

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA



TRABAJO DE GRADUACIÓN

**Caracterización de los Enjambres Sísmicos Ocurridos en los Años 1997,
1999, 2001 y Diciembre De 2007 a Enero de 2008 en el Área de San Vicente,
El Salvador**

PRESENTADO POR:

RAÚL ALFREDO NÚÑEZ VALLEJO

PARA OPTAR AL GRADO:

LICENCIADO EN FÍSICA

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, FEBRERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA



TRABAJO DE GRADUACIÓN

**Caracterización de los Enjambres Sísmicos Ocurridos en los Años 1997,
1999, 2001 y Diciembre De 2007 a Enero de 2008 en el Área de San Vicente,
El Salvador**

PRESENTADO POR:

RAÚL ALFREDO NÚÑEZ VALLEJO

DIRECTOR DOCENTE:

LIC. GUILLERMO NAPOLEÓN MORÁN ORELLANA

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, FEBRERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA



TRABAJO DE GRADUACIÓN

**Caracterización de los Enjambres Sísmicos Ocurridos en los Años 1997,
1999, 2001 y Diciembre De 2007 a Enero de 2008 en el Área de San Vicente,
El Salvador**

PRESENTADO POR:

RAÚL ALFREDO NÚÑEZ VALLEJO

F: _____

LIC. GUILLERMO NAPOLEÓN MORÁN ORELLANA

DIRECTOR DOCENTE

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, FEBRERO DE 2012

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR: ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO GENERAL: DRA. ANA LETICIA DE AMAYA

FISCAL GENERAL: M.SC. NELSON BOANERGES LÓPEZ CARILLO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

DECANO: M. Sc. MARTÍN ENRIQUE GUERRA CÁCERES

SECRETARIO: LIC. NELSON EDYLTRUDIS GÓMEZ CEDILLOS

DIRECTOR DE LA

ESCUELA DE FÍSICA: M. SC. VÍCTOR LAUREANO CORTEZ LARA

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, FEBRERO DE 2012

DEDICATORIA

Al Dios de Jesús de Nazaret, en el cual he tenido gozo y esperanza.

A mis padres Ermelinda Vallejo de Núñez (QDDG) quién siempre esperó mucho de mí y de mis estudios y Raúl Núñez Castro por su ayuda completa y desinteresada.

A mi amada esposa Rosa Mirian Parada de Núñez por su amor y acompañamiento incondicional.

A mis hermanos Patricia del Carmen y Amílcar Ernesto Núñez por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi director docente Lic. Guillermo Napoleón Morán por haberme ofrecido este tema tan interesante e importante. Además por sus oportunas observaciones y apoyo constante durante la investigación.

Al Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) por proporcionarme la base de datos, necesaria para realizar esta investigación.

A M. Sc. Martha Griselda Marroquín Parada, del SNET, por ayudarme con el manejo del software y por el tiempo que me dedicó para consultas. En verdad las aprecio mucho.

Al Lic. José Rivas, de LaGeo, por ayudarme con el análisis de los enjambres sísmicos.

Al M. Sc. Luis Alfonso Castillo Ramos por el tiempo dedicado a la enseñanza con la parte del manejo del SIG y sus observaciones acertadas en la revisión de este trabajo.

A la Profa. Militza Ramírez García por su gestión en las entrevistas a profesionales y las reuniones de trabajo que me han servido de continuo recordatorio de lo aprendido.

Al Lic. Abel Torres por su inapreciable ayuda en la elaboración de los mapas.

A todos los amigos y compañeros que me apoyaron y alentaron a terminar este trabajo
¡Gracias!

ÍNDICE

Índice de figuras	iii
Índice de tablas.....	ix
Índice de anexos	x
Resumen.....	xi
Introducción	xii
Capítulo 1 Marco teórico	1
1.1 Marco tectónico y sísmico	1
1.2 Enjambres sísmicos y área de estudio	3
1.3 Teoría de ondas en un medio elástico	7
1.3.1 Ecuación de movimiento	8
1.3.2 Ecuación de ondas sísmicas.....	9
1.3.3 Ondas P y S	10
1.4 Mecanismo focal	14
1.4.1 Mecanismo focal a partir de la polaridad de las ondas P	16
1.4.2 Mecanismo focal compuesto	20
1.5 Magnitud de un terremoto	20
1.6 Relación frecuencia-magnitud.....	22
1.7 Análisis de poblaciones de mecanismos focales	23
1.7.1 Método de los diedros rectos	25
Capítulo 2 Diseño Metodológico	28
2.1 SEISAN.....	28

2.2	Sistema de información geográfica.....	29
2.3	Método de localización de sismos de Geiger.....	30
2.4	Métodos utilizados en la investigación.....	31
2.5	Elaboración de base de datos y selección la información.....	32
2.6	Relocalizar los sismos.....	33
2.7	Cálculo del mecanismo focal.....	36
2.8	Cálculo de los valores a y b de la relación Gutenberg-Richter.....	38
2.9	Determinación de los esfuerzos en la zona de San Vicente.....	39
Capítulo 3 Presentación y discusión de resultados.....		41
3.1	Distribución espacial y temporal de la sismicidad de los enjambres sísmicos.....	41
3.1.1	Enjambre sísmico de marzo de 1997.....	42
3.1.2	Enjambre sísmico de marzo a mayo de 1999.....	45
3.1.3	Enjambre sísmico de enero a junio de 2001.....	48
3.1.4	Enjambre sísmico de diciembre-2007 a enero-2008.....	51
3.2	Mecanismo focal simple y compuesto de los enjambres sísmicos.....	54
3.2.1	Mecanismo focal compuesto del enjambre sísmico de 1997.....	54
3.2.2	Mecanismo focal de enjambre sísmico de 1999.....	56
3.2.3	Mecanismo focal del enjambre sísmico de 2001.....	62
3.2.4	Mecanismo focal compuesto de enjambre sísmico de 2007 a 2008.....	69
3.3	Calculo de la relación frecuencia-magnitud para la zona de estudio.....	70
3.4	Análisis poblacional de fallas para el área de San Vicente.....	75
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones.....		80
Referencias y Bibliografía.....		83
Anexos.....		92

Índice de figuras

Figura 1-1. Marco tectónico de América Central. Las flechas indican el desplazamiento relativo entre las placas (en líneas negras) y la zona en gris, el graben que atraviesa la región. Tomada de Frez & Gámez (2008).	2
Figura 1-2. Sismos registrados entre enero de 1984 y junio de 2008 en el área de San Vicente. Tomada de SNET (2008)	3
Figura 1-3 Principales zonas de enjambres sísmicos en El Salvador A: Candelaria de la frontera, B: Juayúa, C: Valle de Zapotitán, D: Volcán de San Salvador-Lago de Ilopango, E: San Vicente F: Berlín-Santiago de María, G: Volcán de San Miguel H: Conchagua.	4
Figura 1-4. Área de estudio en la región de San Vicente, la cual esta encerrada en un cuadro rojo.	5
Figura 1-5. Red telemétrica de El Salvador que registró los cuatro enjambres sísmicos del estudio durante los años 1997 a 2008.	6
Figura 1-6. Red telemétrica de El Salvador a junio de 2010, según información proporcionada por el SNET.	7
Figura 1-7 Fuerza sobre una de las caras del cubo infinitesimal. Tomado de Shearer (2009)	9
Figura 1-8. Desplazamiento horizontal de ondas de cuerpo. Arriba, ondas longitudinales (ondas P) y abajo ondas transversales (ondas S). Tomada de Shearer (2009).	12
Figura 1-9. Parámetros para la fuente sísmica. Tomado de Shearer (2009).....	15
Figura 1-10. Mecanismo focal y sus tipos de fallas respectivas. a) desgarre o transcurrente b) normal c) inversa d) oblicua(combinación de la primera con la segunda o tercera).....	16

Figura 1-11. Fractura de cizalla. Tomada de Udías & Mezcúa-Rodríguez (1996).....	17
Figura 1-12. Patrón de radiación para las ondas P y S de una fractura de cizalla. Tomada de Udías & Mezcúa-Rodríguez (1996).	17
Figura 1-13. Identificación de la polaridad del primer pulso de la onda P.....	18
Figura 1-14. Representación del cálculo del mecanismo de foco del terremoto mediante el método de las primeras polaridades de Ondas P.....	19
Figura 1-15. Relación frecuencia-magnitud y su ajuste respectivo para la zona de San Vicente para los enjambres sísmicos de 1997 a 2008.	23
Figura 1-16. Sistema de fallas según el modelo de fracturación de Anderson.....	24
Figura 1-17. Esquema de diedros rectos. A) plano de falla (F) y auxiliar (A) en perspectiva, donde P es el diedro compresivo y T el diedro extensivo. B) Proyección estereográfica en el hemisferio inferior del mecanismo focal de la falla.	25
Figura 1-18. Forma gráfica de aplicar el método de diedros rectos para tres tipos de fallas. Las áreas blancas y negras finales muestran las posibles orientaciones comunes de máxima compresión y máxima dilatación. Tomada de Vicente y Muñoz-Martín (2010).	26
Figura 2-1. Estructura de directorios del SEISAN (Havskov & Ottemöller, 2003).....	29
Figura 2-2. Proceso de picado de las fases para un evento sísmico. En el sismograma se muestra una fase impulsiva de dilatación.	34
Figura 2-3. Modelo de velocidades para relocalizar los eventos sísmicos en el área de estudio. Donde h es la profundidad y V_p es la velocidad de la onda P.	35
Figura 2-4 Interfaz gráfica del WIN TENSOR. Se digitan los parámetros de los mecanismos (óvalo azul) y se presiona el botón Processing (óvalo rojo) para aplicar el método de diedros rectos.	40

Figura 3-1 Región de San Vicente donde ocurrieron los tres enjambres sísmicos del estudio, A. Región del enjambre sísmico de marzo de 1997 B. Región del enjambre sísmico de marzo-mayo de 1999 C. Región del enjambre sísmico de diciembre de 2007 a enero de 2008. El enjambre de 2001 abarca la totalidad del área de estudio.	41
Figura 3-2. Distribución de epicentros para el enjambre sísmicos ocurrido entre el 2 y 27 de marzo de 1997 en el área A de San Vicente.....	42
Figura 3-3. Distribución temporal del enjambre sísmico de marzo de 1997.....	43
Figura 3-4. En la parte superior los epicentros del enjambre. En la parte inferior el perfil de la sismicidad del enjambre de marzo de 1997 con orientación E-O con una profundidad de 16 km y las magnitudes M_c calculadas.	44
Figura 3-5. Distribución temporal del enjambre sísmico del mes de marzo a mayo de 1999	45
Figura 3-6. Distribución de epicentros para el de enjambre sísmico de marzo a mayo de 1999 en la región B de San Vicente.....	46
Figura 3-7. Perfil de la sismicidad del enjambre de marzo a mayo de 1999 con orientación NE y sus respectivas magnitudes M_c	47
Figura 3-8. Distribución de epicentros para el de enjambre sísmico de enero a junio de 2001 en toda la región de San Vicente.	48
Figura 3-9. Distribución temporal del enjambre sísmico del mes de enero a junio de 2001. La actividad sísmica fue mayor durante los meses de febrero y mayo.	49
Figura 3-10. Perfil de la sismicidad del enjambre de enero a junio de 2001 con orientación EO y sus respectivas magnitudes.	50
Figura 3-11. Distribución de epicentros para el de enjambre sísmico de 2007-2008.....	51

Figura 3-12 Distribución temporal para el enjambre sísmico de diciembre-2007 y enero-2008.....	52
Figura 3-13. Perfil de la sismicidad del enjambre de diciembre de 2007 a enero de 2008 con orientación N-E y las magnitudes M_c calculadas.	53
Figura 3-14. Mecanismos focal compuesto para el enjambre sísmico de marzo de 1997. El número de errores de polaridad es 11 y el grado de búsqueda es 5.....	55
Figura 3-15. Principales sistemas de falla en el área de estudio A junto con el diagrama del mecanismo focal compuesto. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones.....	56
Figura 3-16. Principales sistemas de falla en el área de estudio B junto con los diagramas de mecanismo focal de desgarre encontrados para los sismos seleccionados.	57
Figura 3-17. Mecanismo focal para los eventos comprendidos entre el 17 de marzo y 2 de mayo con el sistema de fallas local	59
Figura 3-18. Mecanismos focales compuestos de desgarre calculados a partir de los sismos con similar mecanismo focal simple para el enjambre de 1999.	60
Figura 3-19. Mecanismos focales compuestos normales calculados a partir de los sismos con similar mecanismo focal simple para el enjambre de 1999.....	61
Figura 3-20. Mecanismo focal simple de tipo inversos calculados para los sismos con mejor cobertura del enjambre de 1999.....	62
Figura 3-21. Principales sistemas de falla en el área de estudio junto con los mecanismo focal de desgarre e inverso (evento 2) para el enjambre sísmico de 2001. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones	64

Figura 3-22. Mecanismos focales normales calculados para el enjambre sísmico de 2001. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones. 65	65
Figura 3-23. Mecanismos focales compuesto normales calculados para el enjambre sísmico de 2001. Se observa que la mayoría de sismos están ubicados en la zona C de estudio. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones. ... 66	66
Figura 3-24. Mecanismo focal compuesto calculado para la zona C del enjambre sísmico de 2001. Se observa que la mayoría de sismos están ubicados en la zona C de estudio..... 67	67
Figura 3-25. Mecanismo focal compuesto de desgarre calculado para la zona A del enjambre sísmico de 2001. Se observa que los epicentros de los sismos están ubicados a lo largo de la ZFES. 68	68
Figura 3-26. Mecanismo focal para el enjambre sísmico de 2007-2008 69	69
Figura 3-27. Mecanismos focal compuesto de desgarre para el enjambre de 2007-2008 en el área C. 70	70
Figura 3-28. Relación frecuencia-magnitud para el enjambre sísmico de 1997. 72	72
Figura 3-29. Relación frecuencia-magnitud para el enjambre sísmico de 1999 72	72
Figura 3-30. Relación frecuencia-magnitud para el enjambre sísmico de 2001 73	73
Figura 3-31. Relación frecuencia-magnitud para el enjambre sísmico de 2007-2008..... 74	74
Figura 3-32. Relación frecuencia-magnitud para la totalidad de la sismicidad de 1997 a 2008..... 75	75
Figura 3-33. Proyección estereográfica equiarial (hemisferio inferior) de los estados de esfuerzo por el método de diedros rectos para el enjambre de 1999. Las flechas rojas indican el eje horizontal de esfuerzos mínimo (S_{Hmin}) y las azules el eje horizontal de esfuerzos máximo (S_{Hmax}) a) Proyección estereográfica que ajusta los mecanismos de desgarre y	

determina la dirección de esfuerzos b) Proyección estereográfica que ajusta los mecanismos normales y determina la dirección de esfuerzos. Gráficas hechas con el software WIN TENSOR..... 76

Figura 3-34. Proyección estereográfica equiarial (hemisferio inferior) de los estados de esfuerzo por el método de diedros rectos para el enjambre de 2001 a) Proyección estereográfica que ajusta los mecanismos de desgarre b) Proyección estereográfica que ajusta los mecanismos normales. Gráficas hechas con el software WIN TENSOR. 77

Figura 3-35. Orientación de los ejes principales de esfuerzos para el área de San Vicente a partir de los mecanismos focales calculados en el presente estudio. Las flechas azules indican la dirección de S_{Hmax} y las rojas la dirección de S_{Hmin} 78

Figura 3-36. Análisis PBT para los mecanismos focales en el área A con los que se determinaron las orientaciones de los esfuerzos para esta zona. 79

Índice de tablas

Tabla 3-1. Parámetros del mecanismo focal calculados para el enjambre sísmico de 1999.	58
Tabla 3-2 Parámetros del mecanismo focal calculados para el enjambre sísmico de 2001 ..	63
Tabla 3-3. Distribución de los diferentes tipos de magnitudes para toda la sismicidad estudiada.....	71

Índice de anexos

Anexo 1. Distribución temporal de la sismicidad del enjambre de 2001.....	93
Anexo 2. Sismos relocalizados del enjambre sísmico ocurrido en marzo de 1997 y utilizados para el mecanismo focal compuesto.....	96
Anexo 3 Sismos relocalizados del enjambre sísmico ocurrido en marzo de 1999 a los que se les calculó el mecanismo focal simple.	99
Anexo 4. Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 1999.....	101
Anexo 5. Mecanismo focal compuesto de desgarre 1999.....	111
Anexo 6. Sismos seleccionados para el mecanismo focal del enjambre de 2001. Del 41 al 47 son del mecanismo focal compuesto y no simple.	113
Anexo 7. Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001. El orden de aparición es de acuerdo a la fecha en que ocurrió.....	116
Anexo 8. Mecanismo focal compuesto calculado para el enjambre de 2001	130
Anexo 9. Sismos seleccionados para el mecanismo focal compuesto de 2007-2008	132

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar los enjambres sísmicos en el área de San Vicente en los años 1997,1999, 2001 y diciembre de 2007 a enero a 2008 determinando los mecanismos focales simples y compuestos por el método gráfico de primera pulso de la onda P y los coeficientes de la relación frecuencia-magnitud.

El área de estudio está comprendida entre las latitudes $13^{\circ}28'$ - $13^{\circ}48'$ N y longitudes $88^{\circ}35'$ - $89^{\circ}00'$ O, es decir, entre del Lago de Ilopango y el río Lempa. En esta área se han registrado, desde que se instaló la red telemétrica, cuatro enjambres sísmicos.

El análisis se realizó utilizando SEISAN, software que permite la elaboración y manejo de los enjambres como una base de datos. Este software tiene la ventaja que corre en varias plataformas como Windows, Solaris y Mac. Además es uno de los más utilizados en Latinoamérica.

Los mecanismos focales fueron calculados con el programa FOCMEC, el cual utiliza el método de búsqueda de rejilla. Los mecanismos calculados son en su mayoría de desgarre y normales. Con los mecanismos focales simples se pudo calcular mecanismos focales compuestos, los cuales coincidieron mejor con el sistema de fallas en la región.

Se determinó el campo de esfuerzos de la zona a partir de los mecanismos focales encontrados. El método utilizado fue el de diedros rectos, el cual es útil para tener una primera aproximación del régimen de esfuerzos en la zona.

Para la relación Gutenberg-Richter se obtuvieron los valores de los coeficientes, siendo el de interés el *b-value*. Para este último, los resultados mostraron valores adecuados para este tipo de sismicidad. Esto indica que la zona tiene niveles bajos de acumulación de esfuerzos.

Introducción

Una de las sismicidades más frecuentes e importantes en El Salvador es el de enjambres sísmicos. En la presente investigación se ha realizado un estudio de los enjambres sísmicos en la zona de San Vicente en los años 1997,1999, 2001 y diciembre de 2007 a enero de 2008. El estudio consistió en caracterizar la zona de estudio a través de la determinación de los mecanismos focales simples y compuestos de los diferentes enjambres y la relación frecuencia-magnitud para los mismos. Los datos para el estudio se han obtenido de la base de datos del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). El método utilizado para determinar el mecanismo focal simple y compuesto es el del primer pulso de la onda P. En la relación frecuencia-magnitud el ajuste de la distribución de magnitudes locales (Mc) se ha realizado por el método de mínimos cuadrados.

El capítulo uno se hace una introducción teórica para fundamentar el problema de estudio. Se parte del estudio de la tectónica de la región, se define el área de estudio, así como la red telemétrica del país. Se desarrolla la teoría de la generación de ondas sísmicas y su propagación en el interior de la tierra. Se finaliza con la descripción de los mecanismos focales, la relación frecuencia-magnitud y el análisis poblacional de mecanismos focales. En el capítulo dos se enumeran los pasos metodológicos para el desarrollo de la investigación desde la elaboración de la base de datos de los eventos sísmicos hasta su análisis con el software SEISAN versión 8.2.1. Los resultados del procesamiento de la base de datos sísmicos y su respectiva discusión se hacen en el capítulo tres, poniéndose especial cuidado en la descripción de la sismicidad, el mecanismo focal encontrado para cada enjambre, las implicaciones de los valores de la relación frecuencia-magnitud y el régimen de esfuerzos en la zona. Finalmente el capítulo cuatro se dan las conclusiones obtenidas de la investigación y algunas recomendaciones de cara al futuro de otras investigaciones en el área de sismología.

La elaboración de este documento se ha hecho según los lineamientos metodológicos dados por Sampieri (1997) y la Junta Directiva de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática.

Capítulo 1 Marco teórico

1.1 Marco tectónico y sísmico

Las soluciones de mecanismos focales de terremotos es una de las principales herramientas aplicadas en Latinoamérica para caracterizar la sismicidad de una región. Importantes aportes a este tema son los de (Urtado, 2001; Moreno, 2002; Lermo-Samaniego, 2006; López-Fernández, 2004; Gonzáles E., 2005; Buforn & Udías, 2007; García-Cano, 2004) así como en el resto del mundo (Vavrycuk, 2005; Ozel, 2003; Park, 2007; Bailey, 2009; Angelier, 2009; Hicks, 2000; Walsh, 2009). La relación Gutenberg-Richter es otro parámetro importante que suele utilizarse para describir la sismicidad de una región (Qin, 2005; Chen, 2006; Kahraman, 2008; Schmedes, 2005; Mandal, 2005; Morán, 1989) y específicamente de enjambres sísmicos se tienen los trabajos de los autores (Mogi, 1963; Waite, 2002; Mulibo, 2009; Roland, 2009; Kraft, 2006).

La región de América Central forma parte de las placas tectónicas de Norteamérica y Caribe. El Salvador se encuentra en la placa Caribe en la que subduce la placa de Cocos hasta una profundidad de 200 km aproximadamente. La mayor parte de la actividad sísmica de la región ocurre en la zona de subducción, especialmente los terremotos de mayor magnitud ($M \geq 7.0$) (Figura 1-1) (Frez & Gámez, 2008; Rodriguez, 2009; Álvarez-Gómez, 2008) con influencias del movimiento relativo de la placa Caribe y Norteamérica (Jiménez, 2005).

En la descripción de la tectónica en el país se tiene que “El sistema de fallas Este-Oeste controla el Graben Central de El Salvador que atraviesa todo el país y que determina en su parte hundida regiones topográficas de gran importancia, donde se encuentran importantes centros poblacionales. El sistema de fallas E-O se extiende desde la frontera de Guatemala al borde Norte de la cuenca de Olomega. En la parte Occidental de El Salvador toma la

forma de un verdadero graben de 100 Km. de largo y alrededor de 20 Km. de ancho” (Morán, 1989).

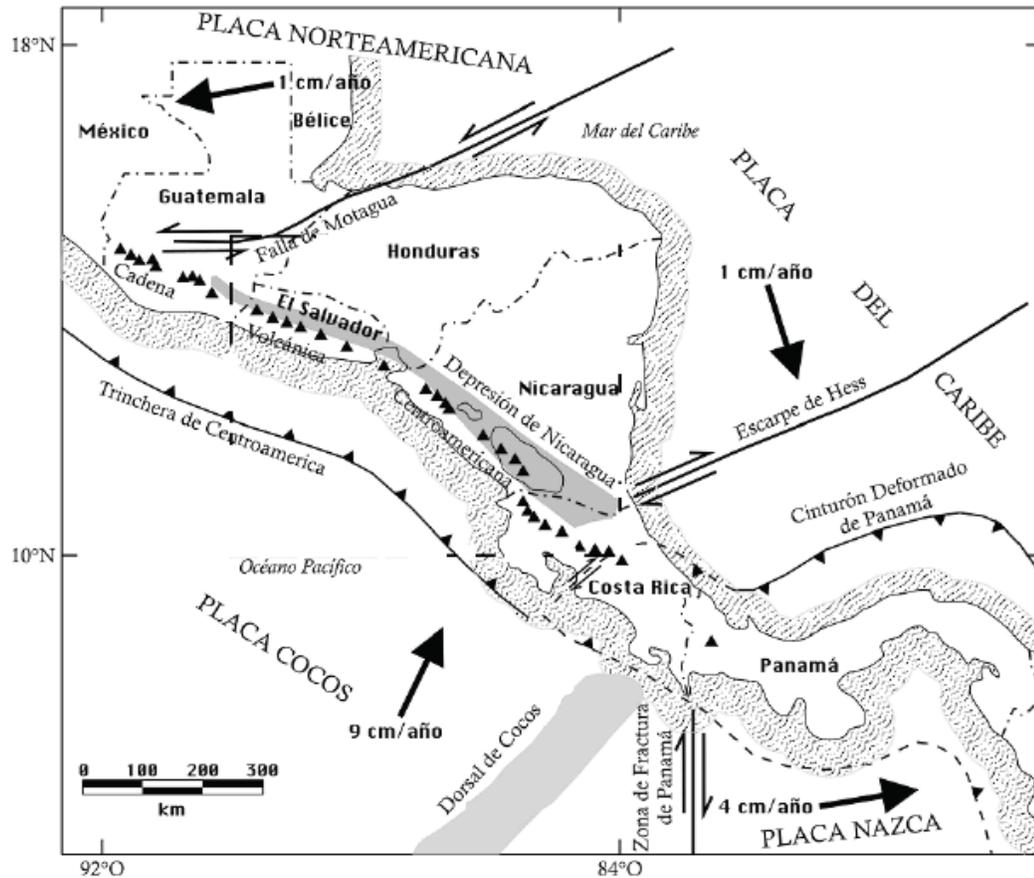


Figura 1-1. Marco tectónico de América Central. Las flechas indican el desplazamiento relativo entre las placas (en líneas negras) y la zona en gris, el graben que atraviesa la región. Tomada de Frez & Gámez (2008).

En el área de San Vicente del año 1783 al año 2001 han ocurrido al menos siete sismos de magnitud mayor que 5 que han afectado significativamente la zona (SNET, 2008). Así como otros sismos de magnitud pequeña y moderada que también han causado daños.

Desde la instalación de la red telemétrica en 1984 se han registrado un considerable número de sismos en la región de San Vicente, siendo más relevantes los de los años de 1997, 1999,

2001 y 2007-2008 (ver Figura 1-2). Según Rodríguez (2009) existe una amplia zona de desgarre, la cual se extiende desde el lado oriental del lago de Ilopango hacia el río Lempa, en el que hay acumulación y liberación de energía en forma continua.

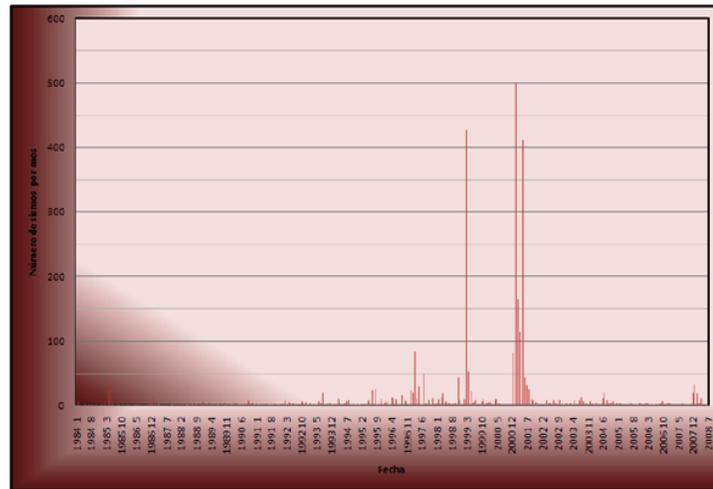


Figura 1-2. Sismos registrados entre enero de 1984 y junio de 2008 en el área de San Vicente. Tomada de SNET (2008)

1.2 Enjambres sísmicos y área de estudio

La sismicidad más frecuente en el país es la sismicidad tipo enjambre (Méndez & Portillo, 2006). Los enjambres son una secuencia de terremotos que ocurren en una zona delimitada y en un corto período de tiempo. Estos se producen en zonas de materiales muy heterogéneos y distribuciones de esfuerzos no uniformes y concentrados (Udías & Mezcúa-Rodríguez, 1996). Los enjambres sísmicos que afectan directamente a la población se localizan normalmente en el graben central de El Salvador (Rivas, 1994).

Según citan las autoras Jiménez (2005) y Méndez & Portillo (2006) el SNET ha reportado que El Salvador se puede dividir en ocho zonas principales de actividad sísmica con un comportamiento de tipo enjambre, como muestra la Figura 1-3. Siendo una de las principales la región de San Vicente (Zona E). Esta última ha sido delimitada desde la

caldera de Ilopango hasta el borde este del volcán de San Vicente (Morán, 1989), pero en esta investigación ha sido extendido hasta el río Lempa.

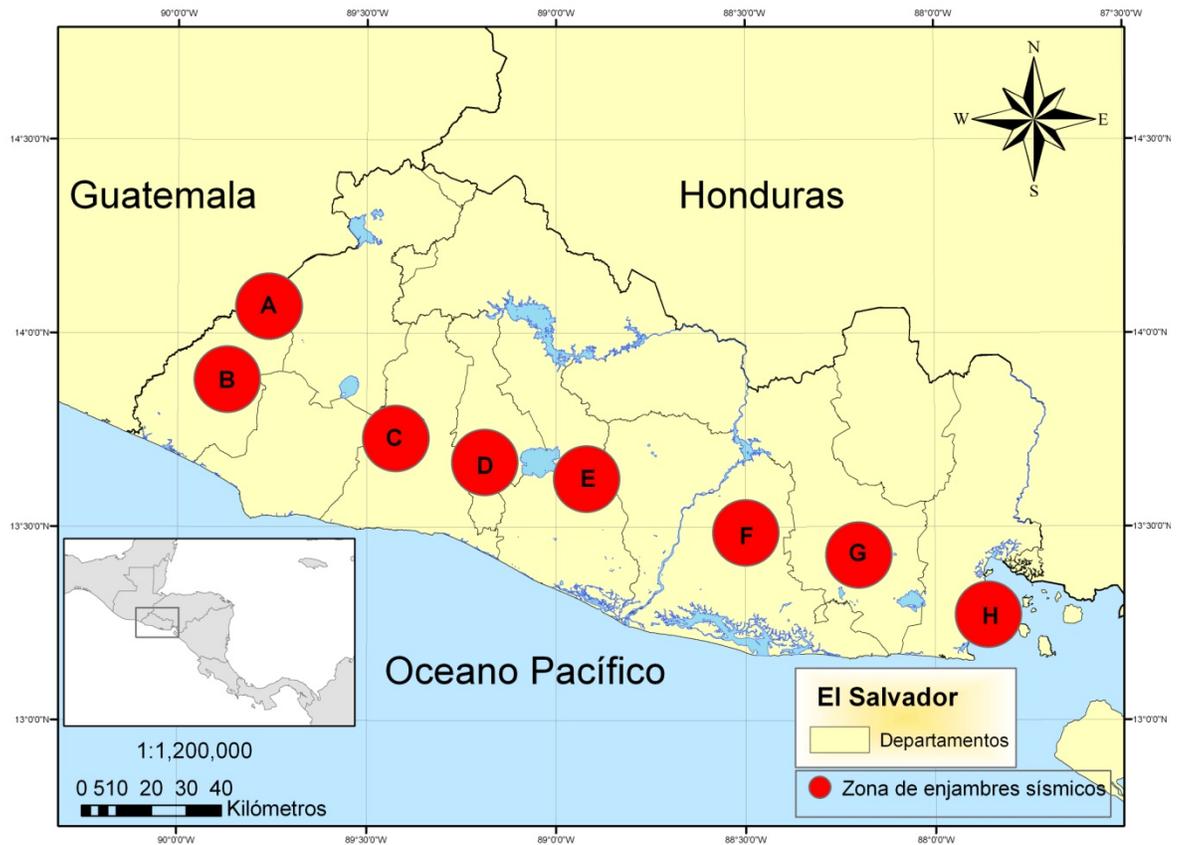


Figura 1-3 Principales zonas de enjambres sísmicos en El Salvador A: Candelaria de la frontera, B: Juayúa, C: Valle de Zapotitán, D: Volcán de San Salvador-Lago de Ilopango, E: San Vicente F: Berlín-Santiago de María, G: Volcán de San Miguel H: Conchagua.

Para la presente investigación el área de estudio se tomó entre las latitudes $13^{\circ}28' - 13^{\circ}48' N$ y longitudes $88^{\circ}35' - 89^{\circ}00' O$ como muestra la Figura 1-4.

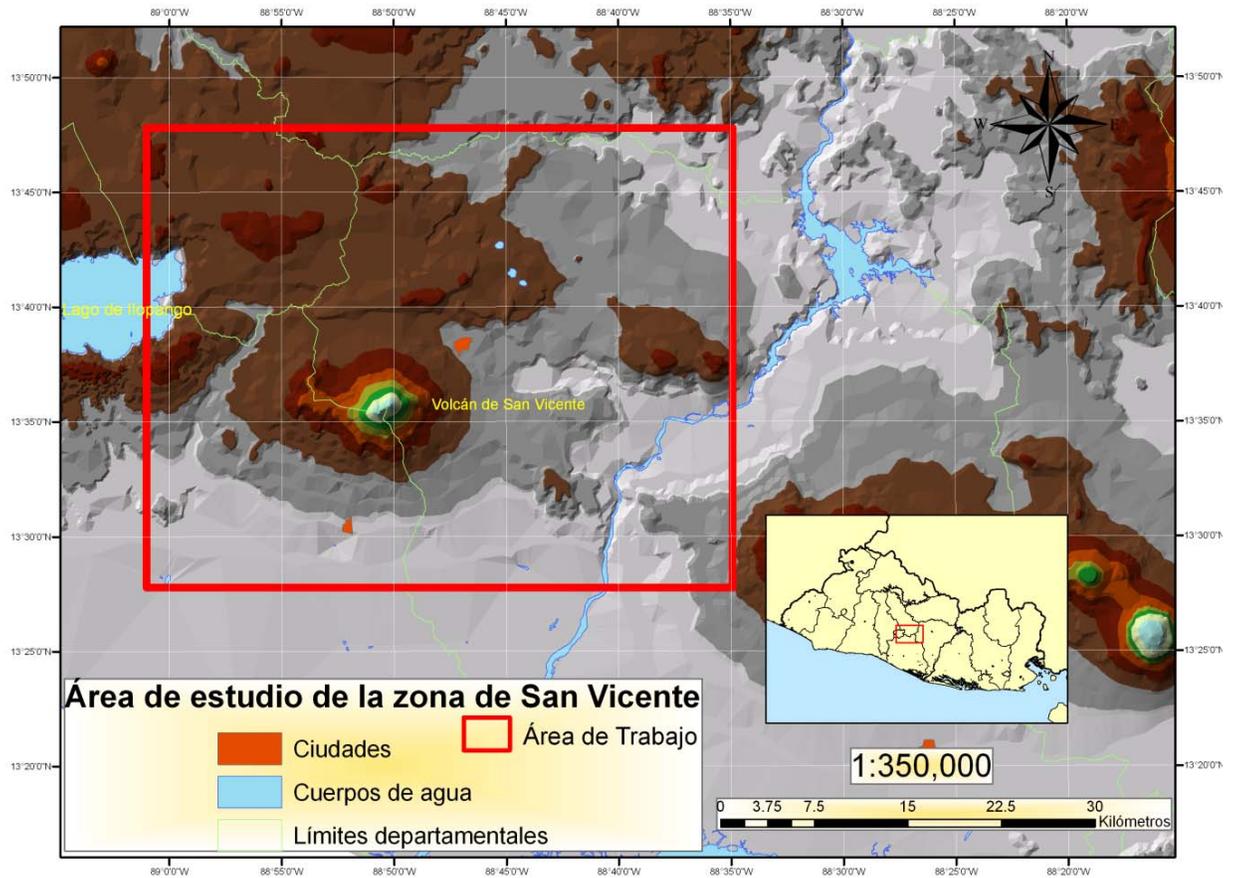


Figura 1-4. Área de estudio en la región de San Vicente, la cual esta encerrada en un cuadro rojo.

Se reportan cuatro enjambres sísmicos en el área de San Vicente (SNET, 2008) en las últimas dos décadas; en los años 1997, 1999, 2001 y diciembre de 2007 a enero de 2008. Siendo el más complejo el del 2001, debido a que la cantidad de sismos es grande y difusa comparada con los otros enjambres.

A finales del siglo XIX comienza la vigilancia instrumental en el país. La primera red es instalada en 1930 con sismógrafos mecánicos tanto de componente horizontal como vertical. El monitoreo sísmico instrumental en El Salvador mejora en 1983 con la instalación de la red telemétrica sísmica. Esta constaba de 11 estaciones y fue ampliada en 1991 (Marroquin Parada, 1994).

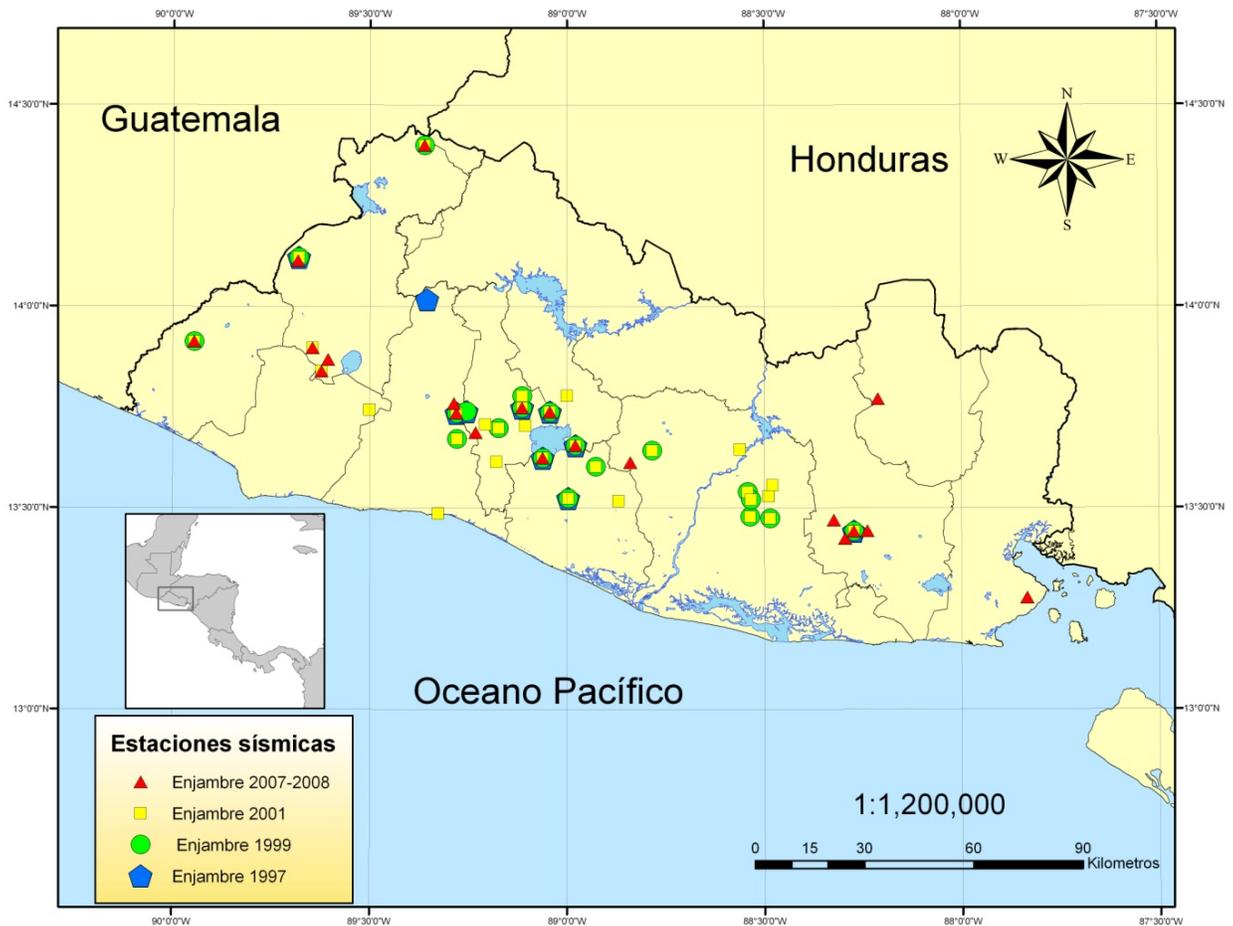


Figura 1-5. Red telemétrica de El Salvador que registró los cuatro enjambres sísmicos del estudio durante los años 1997 a 2008.

En 1991 la red fue ampliada a 22 estaciones, cinco de las cuales se dedicaron a la vigilancia del área metropolitana de San Salvador. Las estaciones sismográficas en El Salvador que registraron los sismos de los enjambres se muestran la Figura 1-5. Según se observa en la última figura la cobertura azimutal muestra deficiencias en la parte norte del país para el área de estudio.

La red telemétrica de El Salvador ha mejorado con la instalación de la red de estaciones acelerográficas, las cuales hacen un mejor registro para eventos de mayor magnitud. La red telemétrica funcionando a junio de 2010 se muestra en la Figura 1-6.

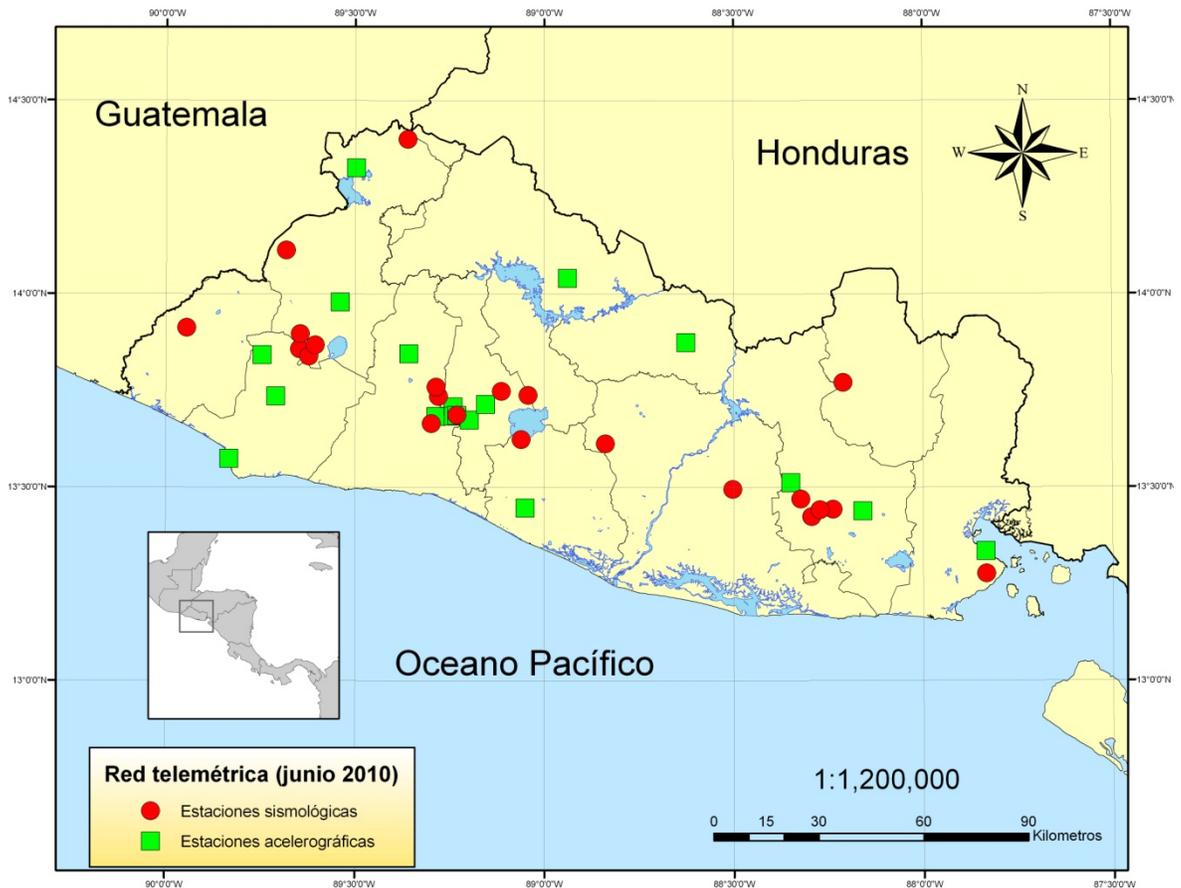


Figura 1-6. Red telemétrica de El Salvador a junio de 2010, según información proporcionada por el SNET.

1.3 Teoría de ondas en un medio elástico

Los primeros en asociar los terremotos al paso de ondas por la tierra fueron John Winthrop en 1755 y John Michell en 1760. Este último afirmaba en una publicación ese año que: “Los terremotos son ondas establecidas por el movimiento de masas de roca a millas debajo

de la superficie de la tierra” (Udías & Mezcúa-Rodríguez , 1996). Michell identificó dos tipos de ondas y afirmó que era posible medir la velocidad de estas ondas. Teniendo la hora de llegada a diferentes puntos se podía establecer métodos para ubicar un terremoto.

Los fundamentos teóricos de la sismología son debidos a las aportaciones en la mecánica de medios continuos, en especial a la teoría de la elasticidad. La aplicación moderna a terremotos fueron desarrollados, entre otros, por E. Wiechert, G. Herglotz y B. Gutenberg a principios del siglo XX (Udías & Mezcúa-Rodríguez , 1996).

La mayoría de la información que podemos obtener de un terremoto es a través de las ondas sísmicas que se registran en los sensores, por lo que es de suma importancia tener un modelo de generación y propagación de estas. Vamos a suponer en primer lugar que el medio en el que se propagan estas ondas es un medio elástico que tiene las propiedades de ser infinito, isotrópico y homogéneo.

1.3.1 Ecuación de movimiento

Consideremos las fuerzas sobre un cubo infinitesimal en un sistema de coordenadas (x_1, x_2, x_3) (ver Figura 1-7). La fuerza sobre cada una de las superficies en el cubo está dada por el producto del vector tracción por el área de la superficie. Cada una de esas fuerzas es parte del tensor de esfuerzos. La fuerza total en todas las caras del cubo está dada por.

$$F_i = \partial_j \tau_{ij} dx_1 dx_2 dx_3 \quad 1.1$$

Donde $\partial_i \tau_{ij}$ es la divergencia del tensor de esfuerzos, utilizando la notación de suma de índices repetidos. También podemos tener sobre el cubo fuerzas exteriores que sean proporcionales al volumen, esto es,

$$F_i^{volumen} = f_i dx_1 dx_2 dx_3 \quad 1.2$$

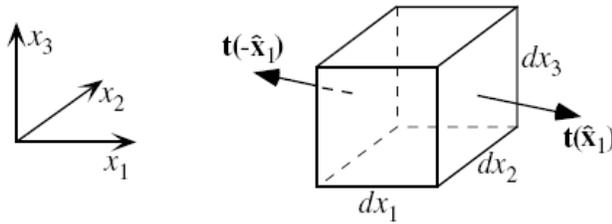


Figura 1-7 Fuerza sobre una de las caras del cubo infinitesimal. Tomado de Shearer (2009)

La fuerza total sobre el cubo es la suma de la fuerza total y la fuerza de volumen. La aceleración del cubo está dado por la segunda derivada del desplazamiento u . A partir de la segunda ley de Newton llegamos a

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \partial_j \tau_{ij} + f_i \quad 1.3$$

Que es la ecuación de movimiento para un continuo. Esta es una de las ecuaciones fundamentales de la sismología, ya que describe cómo se comporta la propagación de onda sísmica.

En el caso de que no se tengan fuerzas de volumen o resulten despreciables, la ecuación de movimiento homogénea está dada por

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \partial_j \tau_{ij} \quad 1.4$$

1.3.2 Ecuación de ondas sísmicas

Para resolver la ecuación 1.4 necesitamos el tensor de esfuerzos en términos del desplazamiento u , así como relacionar el tensor de esfuerzo y deformación, el cual está dado por

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} e_{kk} + 2\mu e_{ij} \quad 1.5$$

donde λ y μ son los parámetros de Lamé. e_{ij} es el tensor de deformaciones que se define como

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_i u_j + \partial_j u_i) \quad 1.6$$

Sustituyendo en 1.5 se obtiene

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} e_{kk} + \mu (\partial_i u_j + \partial_j u_i) \quad 1.7$$

Al sustituir 1.7 en 1.4

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \partial_j [\lambda \delta_{ij} e_{kk} + \mu (\partial_i u_j + \partial_j u_i)] \quad 1.8$$

Desarrollando esta ecuación y arreglando los términos se tiene

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = & \nabla \lambda (\nabla \cdot u) + \nabla \mu \cdot [\nabla u + (\nabla u)^T] \\ & + (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot u - \mu \nabla \times \nabla \times u \end{aligned} \quad 1.9$$

Conocida como la ecuación de onda sísmica.

Si se ignoran los dos primeros términos de 1.9 se tendría la ecuación

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot u - \mu \nabla \times \nabla \times u \quad 1.10$$

Que es la ecuación de Navier en función del desplazamiento. Esta es la forma estándar para medios homogéneos y es la base para generar sismogramas sintéticos.

1.3.3 Ondas P y S

Aplicando el operador divergencia a 1.10 y usando la identidad vectorial $\nabla \cdot (\nabla \times \Psi) = 0$

se puede demostrar que

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad 1.11$$

donde

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad 1.12$$

Siendo α la velocidad de la onda P y $\phi = \nabla \cdot \vec{u}$ es su potencial escalar.

Si ahora se aplica el rotacional a 1.10 y la identidad $\nabla \cdot (\nabla \times \vec{u}) = 0$ se obtiene la ecuación de onda

$$\nabla^2 \vec{\psi} - \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} = 0 \quad 1.13$$

donde

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad 1.14$$

Siendo β la velocidad de la onda S y $\vec{\psi} = \nabla \times \vec{u}$ es el potencial vectorial.

Por lo que la ecuación 1.10 se puede escribir en términos de la velocidad de la onda P y S como

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \alpha^2 \nabla \nabla \cdot u - \beta^2 \nabla \times \nabla \times u \quad 1.15$$

La solución general de 1.15 se puede expresar como la suma de los dos potenciales encontrados en 1.11 y 1.13 como

$$\vec{u} = \nabla\phi + \nabla \times \vec{\psi} \quad 1.16$$

Debiéndose cumplir $\nabla \cdot \vec{\psi} = 0$.

En general $\phi = \nabla \cdot \vec{u}$ es una onda longitudinal y $\vec{\psi} = \nabla \times \vec{u}$ es una onda transversal. Para poder ver esto consideremos la solución de 1.15 con ambos potenciales.

Para el potencial escalar la solución se puede escribir como

$$\phi = \phi_0 \left(t \pm \frac{x}{\alpha} \right) \quad 1.17$$

Ya que $\vec{u} = \nabla\phi$ las componentes del desplazamiento son

$$u_x = \partial_x \phi \quad u_y = u_z = 0 \quad 1.18$$

Por lo que la onda solo se desplaza en la dirección de propagación y es longitudinal. Esta es la llamada onda P, ya que es la primera que generalmente se registra en las estaciones sísmicas (ver Figura 1-8)

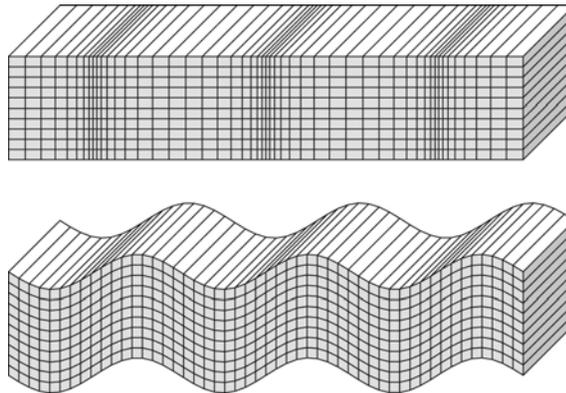


Figura 1-8. Desplazamiento horizontal de ondas de cuerpo. Arriba, ondas longitudinales (ondas P) y abajo ondas transversales (ondas S). Tomada de Shearer (2009).

Para una onda S que se propaga en la dirección positiva de x el potencial vectorial tiene la forma

$$\vec{\psi} = \psi_x \left(t - \frac{x}{\beta} \right) \hat{x} + \psi_y \left(t - \frac{x}{\beta} \right) \hat{y} + \psi_z \left(t - \frac{x}{\beta} \right) \hat{z} \quad 1.19$$

Aplicando el rotacional a este potencial se tiene que el desplazamiento viene dado por

$$\vec{u} = -\partial_x \psi_z \hat{y} + \partial_x \psi_y \hat{z} \quad 1.20$$

Que es un desplazamiento en la dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Por lo que la onda S es de tipo transversal. Además se puede desplazar en dos tipos de movimiento: el que es a través del plano vertical, llamadas ondas SV, y en el plano horizontal, llamadas ondas SH.

Por último se debe mencionar que a partir de las ecuaciones 1.19 y 1.20 la velocidad de las ondas P es mayor que el de las ondas S. Al combinar ambas velocidades se obtiene la relación de Poisson

$$\sigma = \frac{\left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 - 2}{2 \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^2 - 2} \quad 1.21$$

El cual debe variar entre 0 y 0.5 con lo que se imponen límites a la relación de velocidades. Así para un valor de $\sigma=0.25$ se tiene que

$$\alpha = \sqrt{3}\beta \quad 1.22$$

Por lo que la onda P viaja más rápido que la onda S. Estas ondas son llamadas también ondas de cuerpo.

1.4 Mecanismo focal

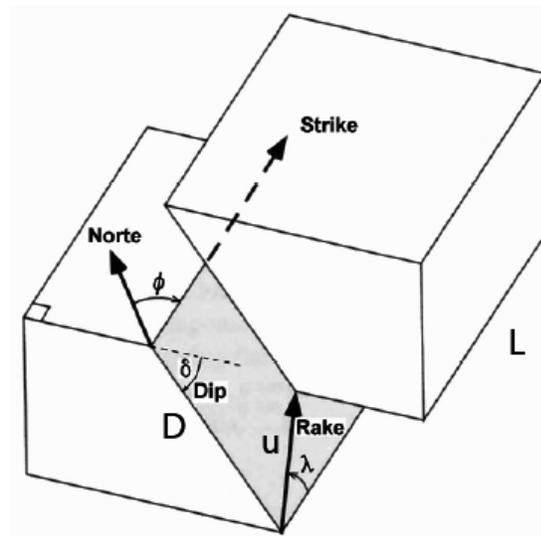
El mecanismo focal es el que nos proporcionan la información sobre los procesos físicos ocurridos en el foco del terremoto (Bufo, 1994). En general es un problema de tipo inverso, es decir, a partir de los sismogramas o de los registros del evento en las diferentes estaciones de observación se trata de deducir que ocurrió en el foco.

El método más sencillo para determinar el mecanismo focal de un terremoto, que fue desarrollado por P. Byerly en diversos trabajos entre 1926 y 1955, se basa en el signo del primer impulso de la onda P. Estos primeros métodos, a los que se unieron los de la onda S desarrollados por Stauder en 1950, son de tipo gráfico y utilizan la proyección estereográfica de la esfera focal. En la actualidad, debido al uso de computadoras, se utilizan también métodos numéricos que utilizan como fuente de información tanto la onda P como la onda S (Bufo, 1994).

Los terremotos son causados en general por fracturas en la corteza terrestre. Para poder hacer un modelo de esta fractura o de la física que ocurre durante el terremoto se pueden tomar una perspectiva ya sea cinemática o dinámica. En los modelos cinemáticos se estudia directamente el vector desplazamiento sin tener en cuenta el estado de esfuerzos (Udías, 1994). En los modelos dinámicos el desplazamiento es calculado a partir de los esfuerzos que actúan en la región focal (Maradiaga, 1994).

Para distancias lo suficientemente grandes la fuente sísmica se puede representar como un foco puntual. Este es el modelo más sencillo. En el caso de una dislocación de cizalla el mecanismo consiste en determinar la orientación del deslizamiento sobre el plano de fractura dado por los parámetros a los ángulos ϕ , δ , λ tal como muestra la Figura 1-9. ϕ es el acimut de la falla o strike y se mide a partir del norte en la dirección de las agujas del reloj. δ es el buzamiento de la falla o dip y se mide a partir de la horizontal. Finalmente λ es el ángulo de desplazamiento o rake siendo positivo hacia arriba y negativo hacia abajo.

Se puede utilizar el sistema de fuerzas equivalente representadas por la orientación de un doble par (DC) sin momento resultante o a la orientación de los ejes de esfuerzo (P y T). Si a estos parámetros le agregamos la función temporal de la fuente sísmica, la cual representa el tiempo de dislocación, ya se tiene el mecanismo focal que representa el terremoto. Si la fuente no es de doble par entonces se deben determinar todas las componentes del tensor momento sísmico M_{ij} (Buforn, 1994).



$$\text{strike: } 0 \leq \phi < 360^\circ$$

$$\text{dip: } 0 \leq \delta \leq 90^\circ$$

$$\text{rake: } -180^\circ \leq \lambda < 180^\circ$$

Figura 1-9. Parámetros para la fuente sísmica. Tomado de Shearer (2009)

Si el foco no se puede considerar como una fuente puntual entonces hay que considerar las dimensiones de la fractura y deben añadirse al mecanismo focal. Dos modelos sencillos son el de fractura circular y el de falla rectangular. El último parámetro es el momento sísmico

escalar, M_0 , el cual puede utilizarse para calcular la magnitud del terremoto según el método propuesto por Kanamori y permite obtener el desplazamiento.

Por último hay que mencionar el centroide o centro de gravedad de la región focal. Con este método se puede calcular a la vez el mecanismo focal, así como el hipocentro y tiempo de origen. Entre los centros que utilizan este método de monitoreo se puede mencionar el CMT, el cual en la actualidad es administrado por la Universidad de Columbia con el nombre “The Global CMT Projec” y hasta 2006 era administrado por Harvard.

1.4.1 Mecanismo focal a partir de la polaridad de las ondas P

Suponiendo un foco de tipo puntual y de doble par de fuerzas se trata de encontrar el mecanismo focal a partir del primer pulso de la onda P. Los tipos de fallas que se pueden representar con el mecanismo pueden ser de varios tipos, siendo los cuatro principales las mostradas en la Figura 1-10.

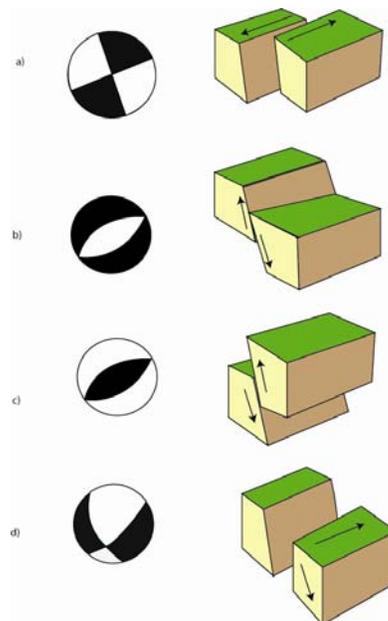


Figura 1-10. Mecanismo focal y sus tipos de fallas respectivas. a) desgarre o transcurrente b) normal c) inversa d) oblicua (combinación de la primera con la segunda o tercera).

Supongamos que el desplazamiento Δu es sobre el eje X_1 para un punto cualquiera. Los desplazamientos de la onda P solo tienen componente radial y los de la S transversal como muestra la Figura 1-11.

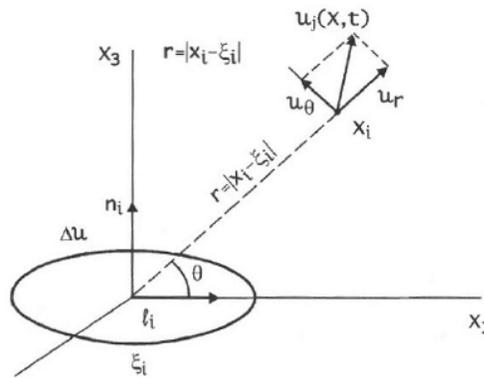


Figura 1-11. Fractura de cizalla. Tomada de Udías & Mezcúa-Rodríguez (1996).

En coordenadas polares los desplazamientos quedan como muestra la Figura 1-12 . Para los desplazamientos de la onda P se tiene que están separados en cuatro cuadrantes, alternantes en dirección al foco y hacia fuera, los cuales son las dilataciones y compresiones en los puntos de observación, con amplitud máxima para $(2n-1)\pi/4$.

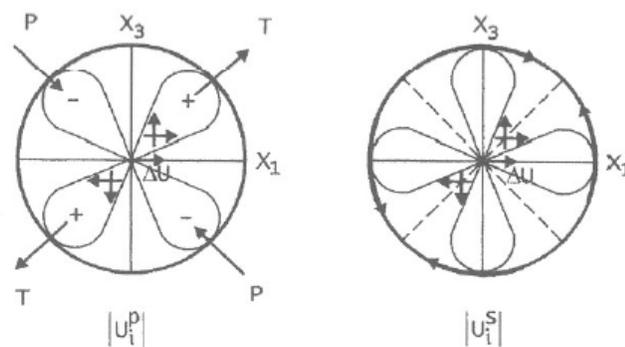


Figura 1-12. Patrón de radiación para las ondas P y S de una fractura de cizalla. Tomada de Udías & Mezcúa-Rodríguez (1996).

El método de la primera polaridad de la onda P consiste en proyectar los puntos de observación en la superficie de la tierra sobre una esfera focal. La esfera se divide en cuatro partes las cuales corresponden a los cuadrantes de dilatación y compresión del patrón de radiación de la onda P. Los puntos proyectados son el azimut de la estación ϕ y con el ángulo de salida i del rayo medido desde la vertical.

Para calcular el ángulo de salida y para distancias epicentrales grandes ($\Delta > 10^\circ$) se puede utilizar la expresión

$$\text{sen}(i) = \frac{v_F}{r_F} \frac{dt}{d\Delta} \quad 1.23$$

Donde v_F es la velocidad de la onda P y r_F el radio terrestre correspondiente al foco. Si las distancias son cortas entonces debe utilizarse modelos de estructura de la corteza y la profundidad del foco.

En el sismograma lo primero que debe hacerse es identificar si el primer pulso de la onda P corresponde a una dilatación o a una compresión (ver Figura 1-13). Aquí también se determina donde inicia la fase del terremoto y así poder localizarlo con varias estaciones.

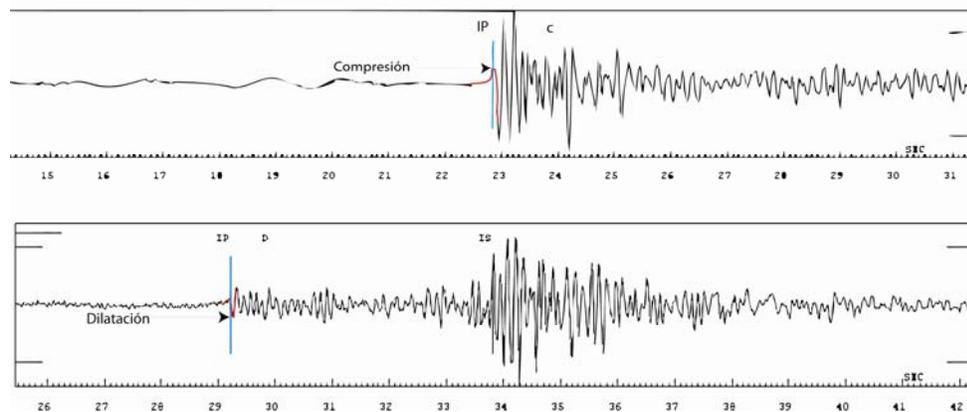


Figura 1-13. Identificación de la polaridad del primer pulso de la onda P.

Con las observaciones representadas en la esfera estereográfica estas deben separarse en cuatro cuadrantes por medio de dos planos ortogonales (Figura 1-14). Uno de estos es el plano de falla y el otro es el plano auxiliar. Para poder distinguirlos se debe recurrir a otro tipo de información como la orientación de las fallas de acuerdo a la geología local.

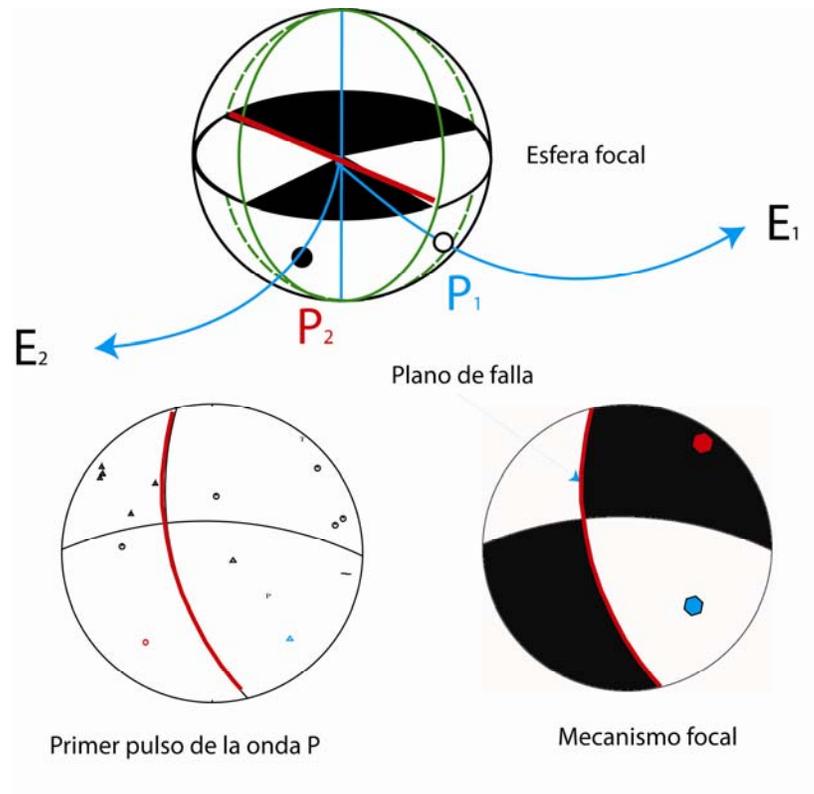


Figura 1-14. Representación del cálculo del mecanismo de foco del terremoto mediante el método de las primeras polaridades de ondas P.

También hay que calcular el porcentaje de observaciones correctas y buscar la solución que contenga el mayor número de aciertos. Hay que mencionar que aparte de los métodos gráficos también existen modelos numéricos (Buforn, 1994).

1.4.2 Mecanismo focal compuesto

En el caso de tener poca cobertura azimutal y de terremotos de pequeña magnitud suele utilizarse la técnica de mecanismos focales compuestos. Según Buforn (1994): “En esta técnica se supone que existe un patrón regional de esfuerzos en la zona estudiada, de forma que los terremotos que ocurren en esa región y están próximos en el espacio y tiempo, obedecen a ese patrón regional que puede obtenerse a partir del mecanismo conjunto de los terremotos estudiados”.

En primer lugar deben seleccionarse los terremotos que correspondan a la misma fuente sísmica. Para esto se debe asegurar que el primer pulso de diferentes eventos sísmicos es el mismo para el grupo de estaciones o correspondan a un mecanismo focal simple similar. Posteriormente se hacen las proyecciones sobre la esfera estereográfica como esta descrito más arriba.

El resultado equivale a tener un mecanismo con muchas estaciones de observación y así se obtiene una mejor solución. El método es útil cuando se da una serie de réplicas o de enjambres sísmicos (Rivas, 1994), que es el caso del presente estudio.

1.5 Magnitud de un terremoto

Para medir la energía liberada por un terremoto se cuantifica de una forma instrumental por medio de la magnitud. Esta se encuentra asociada a la energía liberada en el foco. El primero en definir una escala para la magnitud fue C. F. Richter en 1932 en la forma

$$M = \log A - \log A_0 \quad 1.24$$

Donde A es la máxima traza o amplitud en el sismograma de un temblor medida en milímetros a una distancia epicentral Δ y A_0 es la máxima amplitud del sismo a la misma distancia con una magnitud $M = 0$. El sismograma es el registrado en una estación por un sismógrafo de torsión Wood-Anderson. El sismo patrón, de magnitud cero se define como aquel que, teniendo su epicentro a 100 Km de distancia, deja una traza de una micra en el

registro o sismograma y que corresponde a $M=3$. Debido a que esta escala está determinada para California, referida a un tipo de sismógrafo específico y para distancias menores de 1000 km se le da el nombre de magnitud local (M_L) (Udías, 1994).

Por limitaciones de la escala de magnitud local y para poder utilizar otros tipos de sismógrafos, se ha hecho necesario definir otras escalas de magnitud local. Estas son en función de la duración de la señal τ . La fórmula propuesta en general tiene la forma

$$M_c = a \log \tau - b + c\Delta \quad 1.25$$

Donde a , b y c son ajustados para que M_c corresponda al de magnitud local y Δ es la distancia epicentral en kilómetros. Esta magnitud es conocida como magnitud coda y es la que se calcula generalmente en la red sísmica centroamericana (Luque Vergara, 2011).

A partir de los trabajos de Gutenberg y Richter la escala de magnitud fue extendida para distancias telesísmicas ($\Delta > 100$). Estas dependen si se utilizan ondas internas (P o S) u ondas superficiales (Love y Rayleigh).

Para las ondas internas se tiene que

$$M_b = \log \frac{A}{T} + \sigma(\Delta) + \beta \quad 1.26$$

Y para las ondas superficiales

$$M_s = \log \frac{A}{T} + 1.66(\log \Delta) + 3.3 \quad 1.27$$

donde:

- A es la amplitud del movimiento del suelo en micras
- T el periodo de la onda
- $\sigma(\Delta)$ coeficiente que depende de la distancia

- β corrección para cada estación
- Δ distancia epicentral en grados

Generalmente M_b corresponde a las amplitudes de la onda P en sismogramas de periodo corto. M_s se mide de las amplitudes de la onda Rayleigh con un periodo aproximado de 20 segundos.

Debido a que M_b se satura a magnitudes mayores de 6.5 y M_s a 7.5 se hizo necesario definir una nueva escala de magnitud. Esta fue propuesta por Kanamori y está basada en el valor del momento sísmico M_0 y sirve para ondas de baja frecuencia y se determina por la fórmula

$$M_w = \log \frac{M_0}{1.5} - 10.7 \quad 1.28$$

La cual se utiliza para terremotos de magnitudes mayores a 8.

1.6 Relación frecuencia-magnitud

Si consideramos que al ocurrir un terremoto los esfuerzos en una región se relajan. Es lógico suponer que para esa región, en cierto periodo de tiempo, el número de terremotos pequeños es mucho mayor que el de los grandes. Para expresar este hecho Gutenberg y Richter propusieron la expresión logarítmica

$$\log(N) = a - bM \quad 1.29$$

Donde N es el número de terremotos con magnitud mayor que M ; a es el logaritmo del número de terremotos de magnitud mayor que cero y b la proporción de terremotos de cierta magnitud (Udías & Mezcúa-Rodríguez, 1996). El método utilizado para encontrar la relación entre las variables es el de mínimos cuadrados (ver Figura 1-15).

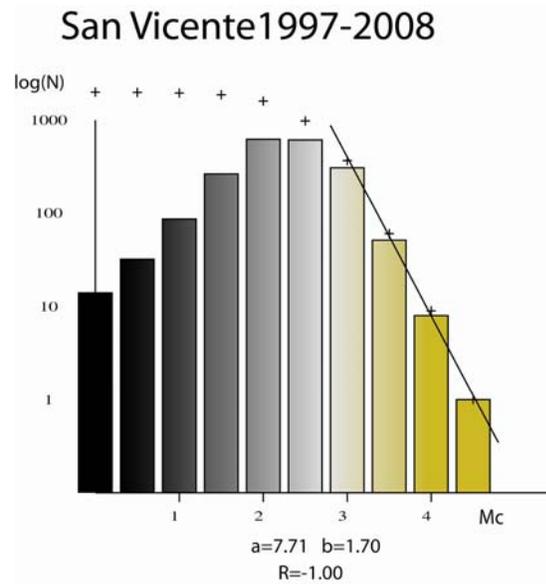


Figura 1-15. Relación frecuencia-magnitud y su ajuste respectivo para la zona de San Vicente para los enjambres sísmicos de 1997 a 2008.

La constante b , que es la pendiente de una relación lineal, puede oscilar entre 0.6 y 2.0, siendo su valor común normalmente cercano a la unidad. El valor de b está relacionado con las características físicas de la región. Un valor alto de b implica que predominan los terremotos de pequeña magnitud, por lo que la región tiene poca resistencia. Por el contrario un valor bajo de b implica que predominan los terremotos de mayor magnitud indicando resistencia del material.

1.7 Análisis de poblaciones de mecanismos focales

El análisis de inversión de esfuerzos asume que la fracturación de la corteza es invariante ante el cambio de escala, lo cual se comprueba con la ley de Gutenberg-Richter (de Vicente & Muñoz-Martín, 2010).

E. M. Anderson en 1951 establece un modelo de fracturación basado en el criterio de Navier-Coulomb. Este se aplica para fallas neoformadas, es decir, las que se forman sobre roca intacta y con fricción interna con buzamientos o cabeceos puros (ver Figura 1-16).

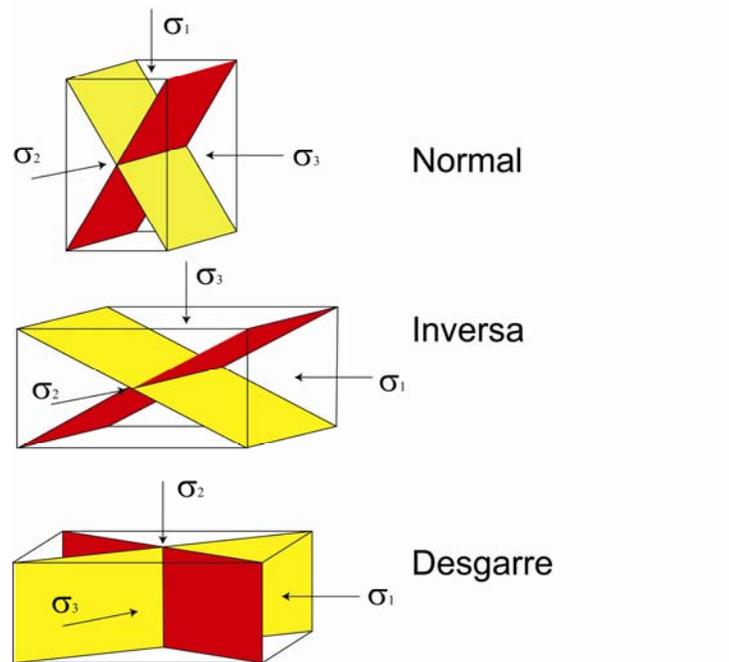


Figura 1-16. Sistema de fallas según el modelo de fracturación de Anderson.

En 1959 M. H. Bott establece la relación entre la forma del elipsoide de esfuerzos y su orientación sobre una fractura ya existente. La orientación de la componente de cizalla sobre un plano se plantea en función de dos parámetros: la orientación respecto a los ejes de esfuerzo y la relación entre los valores de los esfuerzos principales (Casas Sainz et al., 1990). Esto queda expresado en la ecuación de Bott:

$$\tan \theta = \frac{n}{l \cdot m} (m^2 - (1 - n^2) \cdot R) \quad 1.30$$

donde

$$R = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{\sigma_y - \sigma_x} \quad 1.31$$

θ es el ángulo de buzamiento o cabeceo y l , m , n son los cosenos directores del plano de falla. R es el factor de forma y σ_x , σ_y , σ_z son el esfuerzo horizontal mínimo, esfuerzo

horizontal máximo y el esfuerzo vertical. Esta ecuación es la base de numerosos métodos de inversión de esfuerzos.

1.7.1 Método de los diedros rectos

En el año 1972 O. Pegoraro propuso el método de diedros rectos como un método gráfico para determinar las posibles orientaciones comunes de los ejes de máxima compresión y extensión (de Vicente & Muñoz-Martín, 2010).

El método se basa en el hecho de que, para el movimiento de la falla, se tienen diedros rectos opuestos de dilatación y compresión (ver Figura 1-17). Donde los ejes de esfuerzos principales máximos (σ_1) y mínimos (σ_3) están en los diedros de compresión y dilatación respectivamente, no habiendo restricción geométrica a la orientación de σ_2 .

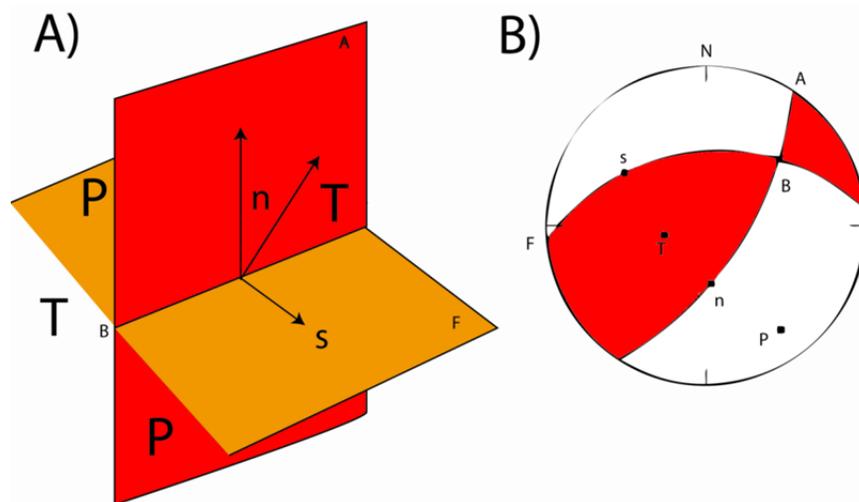


Figura 1-17. Esquema de diedros rectos. A) plano de falla (F) y auxiliar (A) en perspectiva, donde P es el diedro compresivo y T el diedro extensivo. B) Proyección estereográfica en el hemisferio inferior del mecanismo focal de la falla.

Para aplicar el método simplemente se superponen las proyecciones estereográficas del mecanismo focal para encontrar las áreas comunes. Esto es tanto para el área de compresión como dilatación (ver Figura 1-18).

De preferencia debe utilizarse el mayor número de mecanismos focales. Esto tiene el inconveniente de que no resulte ninguna zona 100% compatible en tensión o compresión. Una solución a este problema es trabajar con diagramas de densidad de diedros rectos. Este consiste en aplicar un criterio numérico de porcentajes de compatibilidad con el carácter de compresión o dilatación a la esfera estereográfica (de Vicente et al., 1992).

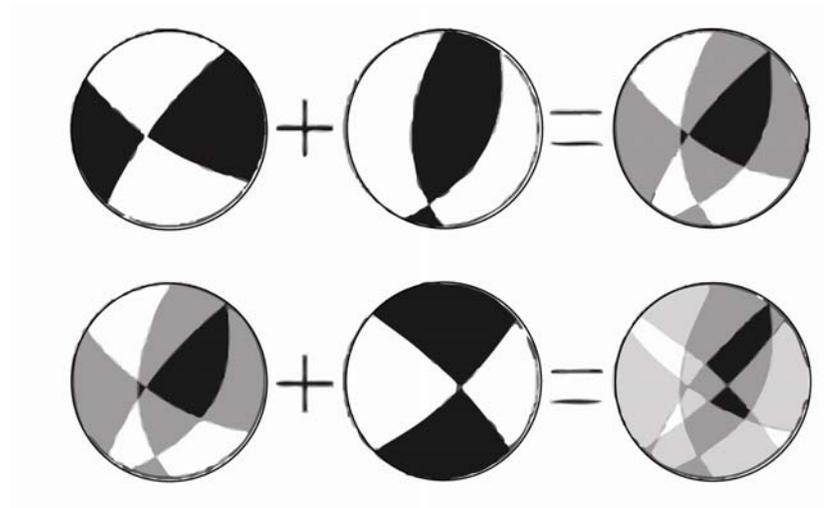


Figura 1-18. Forma gráfica de aplicar el método de diedros rectos para tres tipos de fallas. Las áreas blancas y negras finales muestran las posibles orientaciones comunes de máxima compresión y máxima dilatación. Tomada de Vicente y Muñoz-Martín (2010).

Este método es aplicable tanto a fallas medidas en el campo, como a mecanismos focales determinados con ondas sísmicas. Una ventaja es que proporciona de manera rápida y clara los ejes de esfuerzo capaces de explicar el conjunto de mecanismos focales. Su desventaja es que solo es un indicador a grandes rasgos de la orientación de los ejes de esfuerzos, por lo que se debe aplicar otros métodos posteriormente.

Otra de las limitaciones del método es que no puede discriminar entre fallas pertenecientes a momentos de deformación distintos; pero si la calidad de los resultados es buena entonces se tiene un indicador de un único estado de esfuerzos o que estos estados son parecidos o comparten alguno de los ejes del elipsoide.

Capítulo 2 Diseño Metodológico

2.1 SEISAN

El software utilizado fue The Earthquake Analisis Software (SEISAN) y fue desarrollado por los noruegos Jens Havskov y Lars Ottemöller. Este puede trabajar bajo ambiente Windows, Solaris o Linux indistintamente. SEISAN está conformado por un completo conjunto de programas y una base de datos para análisis de sismos de datos sismológicos (Havskov & Ottemöller, 2003).

El sistema SEISAN está ubicado en subdirectorios bajo un directorio principal denominado SEISMO, el cual consta de los siguientes subdirectorios: REA, almacena los archivos de lectura y solución de epicentros en una base de datos; WOR, lugar de trabajo para los diferentes usuarios; TMP, almacena archivos temporales; PRO, guarda programas, código fuente y ejecutables; LIB, librerías y subrutinas; INC, incluye los archivos de los programas y subrutinas de PRO y LIB; COM, cuenta con los procedimientos de comando; DAT, tiene los archivos de parámetros por defecto; WAV, archivos digitales de formas de onda; CAL, guarda los archivos de respuesta o calibración de las estaciones; INF, documentación e información; PIC, guarda los archivos de imágenes (ver Figura 2-1).

SEISAN tiene la ventaja de facilitar el intercambio de datos mundialmente utilizando el mismo formato. En la actualidad SEISAN es usado en muchos países de Latinoamérica. Otra ventaja de SEISAN es que los programas en su mayoría fueron escritos en lenguaje Fortran y unos pocos en C, todos ellos con su archivo fuente, de tal manera que pudieran ser modificados y ajustados según las necesidades del usuario.

En esta investigación se utilizó la versión para Windows. Esta se puede operar desde una interfaz gráfica o desde la línea de comandos. Según la experiencia al trabajar con ambos ambientes, parece que se tiene mayor control y el programa es más estable desde la línea de comandos.

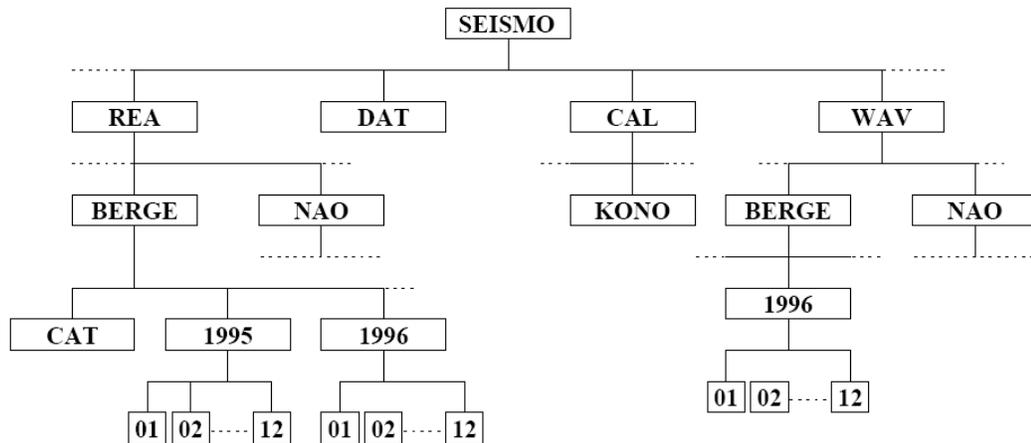


Figura 2-1. Estructura de directorios del SEISAN. Tomada de Havskov & Ottemöller (2003).

2.2 Sistema de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG) o Geographic Information System (GIS) en inglés son programas informáticos que tienen como función principal el almacenamiento, manipulación, análisis, visualización y representación de información espacialmente referenciada (Quintana & Ortega Pérez, 2008).

Los SIG tienen la ventaja que son herramientas de análisis espacial que se pueden adaptar a una gran cantidad de necesidades en las geociencias. En el caso de la sismología se han aplicado a estudios de tectónica (Sarup, 2006), microzonificación sísmica (William K. Mohanty, 2008), así como al procesamiento de información sísmica (Leonard, 2002).

Además permiten la integración de bases de datos, en el caso del presente estudio de tipo sísmica, con la visualización en mapas en los que se puede hacer un análisis más detallado sobre la distribución de la sismicidad y las fallas geológicas de la región de estudio.

Dos de las desventajas que presentan los SIG es que se requiere mapas que estén bien georeferenciados para que la representación de la información sea confiable y que se tenga abundante información de entrada, para que se puedan realizar análisis adecuados.

La utilidad para el presente estudio del SIG se limita a la presentación de la información de los eventos sísmicos de forma espacial. Esto ayudo a determinar la relación entre los mecanismos focales y las fallas geológicas de la región.

2.3 Método de localización de sismos de Geiger

Generalmente en SEISAN siempre es necesario hacer la relocalización de los eventos sísmicos antes de trabajar con ellos. En el caso del cálculo del mecanismo focal se encuentra relocalizando primero un evento o una selección de estos.

Los métodos que se utilizan para hacer la localización hipocentral son básicamente debidos a L. Geiger y V. Inglada (Udías & Mezcúa-Rodríguez , 1996), pero tienen su pleno desarrollo hasta que se empezó hacer uso de computadoras.

El método consiste que teniendo N observaciones de tiempo de llegadas t_i a las estaciones con coordenadas (ϕ_i, λ_i) que serán función de $(t_o, \phi_o, \lambda_o, h)$. Ya que la dependencia de los parámetros del foco no es lineal, por lo que se hace una expansión de Taylor en torno a los valores $(t_o^*, \phi_o^*, \lambda_o^*, h)$ tomando sólo los términos de primer orden.

$$t_i = t_i^* + \delta t + \frac{\partial t_i}{\partial \phi} \partial \phi + \frac{\partial t_i}{\partial \lambda} \partial \lambda + \frac{\partial t_i}{\partial h} \partial h \quad 2.1$$

Se toman las diferencias $r_i = t_i - t_o^*$, siendo las incógnitas los incrementos de las N ecuaciones, se tiene la ecuación de forma matricial

$$r_i = A_{ij} \partial x_j \quad 2.2$$

donde

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial t} & \frac{\partial r_1}{\partial \phi} & \frac{\partial r_1}{\partial \lambda} & \frac{\partial r_1}{\partial h} \\ \frac{\partial r_2}{\partial t} & \frac{\partial r_2}{\partial \phi} & \frac{\partial r_2}{\partial \lambda} & \frac{\partial r_2}{\partial h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_i}{\partial t} & \frac{\partial r_i}{\partial \phi} & \frac{\partial r_i}{\partial \lambda} & \frac{\partial r_i}{\partial h} \end{pmatrix} \quad 2.3$$

La solución es aquella que haga mínima la suma de los cuadrados de los residuos.

2.4 Métodos utilizados en la investigación

El método utilizado para determinar el mecanismo focal de cada uno de los enjambres a estudiar fue el del primer pulso de la onda P. En el caso de los coeficientes de la relación frecuencia-magnitud es por el método de mínimos cuadrados. Para determinar el régimen de esfuerzos se utilizó el método de diedros rectos.

La base de datos sísmica a la que se tuvo acceso fue a la proporcionada por el SNET. De estos datos se hizo una selección con la que se formó la base de datos para el estudio.

El análisis de la base de datos se hizo con el software SEISAN versión 8.2.1. El programa para localizar el hipocentro de los sismos fue HYPOCENTER, el cual utiliza en general variaciones del método de Geiger (Lee & Stewart, 1981). Para construir los mecanismos focales se utilizó el programa FOCMEC, el cual usa la primera polaridad de la onda P. Para los mecanismos focales compuestos SEISAN normalmente utilizaba la función especial FC, pero en las últimas versiones, incluyendo la utilizada en el estudio, esta función fue descontinuada. En el caso de los parámetros a y b el programa utilizado fue BVALUE. La información que se necesita son las magnitudes de coda de los eventos sísmicos.

Finalmente para la determinación de la orientación de los esfuerzos se utilizó el software WIN TENSOR desarrollado por el Dr. Damien Delvaux del Royal Museum for Central Africa, Tervuren, Bélgica. Aunque el software está orientado a la geología estructural y

presenta muchos métodos para el análisis poblacional de fallas, solo se utilizó la parte de diedros rectos. Se puede encontrar abundante documentación sobre este software en la página web <http://www.damiendelvaux.be/Tensor/tensor-index.html> del Dr. Delvaux.

2.5 Elaboración de base de datos y selección la información

Para la elaboración de la base de datos es necesario hacer el procesamiento en SEISAN. En primer lugar se copiaron los archivos de texto, donde se encuentran los registros de todos los sismos, en la carpeta WOR. En segundo lugar se copiaron los archivos con los sismogramas a la carpeta WAV.

Para generar la estructura de la base de datos se usa la instrucción MAKEREA, desde la línea de comandos, en el directorio WOR. Primero pregunta por el nombre de la base de datos, la cual debe tener un máximo de cinco caracteres y estar en mayúsculas. Seguidamente pregunta en que año va iniciar y terminar la base de datos. Con esto solo se ha hecho la estructura de la base, pero aún no tiene información en ella.

Se procedió a darle contenido a la estructura de la base elaborada. Para esto se utilizó la instrucción SPLIT. Lo primero que pide es el nombre del archivo donde están los eventos sísmicos con su respectiva extensión. En segundo lugar pregunta en qué base de datos quiere guardarse la información y finalmente el nombre del operador de la base de datos, el cual no debe tener más de cinco caracteres.

Los criterios utilizados para la selección de los eventos sísmicos fueron los siguientes:

- Que estén localizados en el área de estudio. Para asegurar que solo se incluyeran sismos debido a las fallas locales se puso la restricción que la profundidad fuera menor a 40 km.
- Los sismos tuvieran una buena cobertura azimutal. Esto significa que por lo menos el sismo debe ser registrado por tres estaciones para que pueda hacerse la localización del epicentro e hipocentro.

El comando que se utilizó para hacer las selecciones de los eventos es SELECT. Con este último se pueden aplicar varios criterios de selección, incluidos los enumerados más arriba. SELECT genera un archivo de texto llamado SELECT.OUT, el cual se encuentra ubicado en la carpeta WOR. Este archivo es el que normalmente se utilizó para manipular los datos.

2.6 Relocalización de los sismos

En primer lugar se identificó la polaridad de fase de la onda P. Esto es debido a que el método para construir el mecanismo focal utiliza esta polaridad y así se determina el inicio de la fase del sismo. Esto se logra desplegando en pantalla los sismogramas de los eventos seleccionados y determinando la polaridad de estos por medio de la técnica de picado, el cual consiste en seleccionar si el primer pulso fue de dilatación o de compresión.

Debido a que la base de datos proporcionada por el SNET ya está procesada, el trabajo consistió en revisar el picado ya realizado y hacer posibles correcciones al inicio y final de la fase. Lo cual no fue necesario en la mayoría de casos.

Para realizar la revisión del picado se accedió a los eventos sísmicos a través del comando EEV. Desde la línea de comandos se escribe EEV año-mes y nombre de la base. SEISAN despliega los eventos uno por uno, los cuales están ordenados de forma temporal. Seguidamente se escribe el comando P y se muestran todas las estaciones que registraron el evento con los diferentes canales. Para realizar el picado debe hacerse solo en la componente vertical (

Figura 2-2), ya que esta es menos susceptible a los efectos de sitio.

Una vez seleccionado el canal a picar se colocó el cursor arriba o abajo, dependiendo del tipo de fase, y se presionó 1. Esto último significa que la fase es de tipo impulsiva. De esta manera el sismograma quedó picado.

Se relocalizaron los terremotos con el programa HYPOCENTER, el cual se basa en el método de Geiger. El software necesita un modelo de corteza, el cual se integró a SEISAN

en el archivo STATION0 dentro de la carpeta DAT. Para esto el SNET utiliza el modelo mostrado en la Figura 2-3 y una relación de velocidades para las ondas de cuerpo $V_P/V_S=1.78$ (Jiménez, 2005).

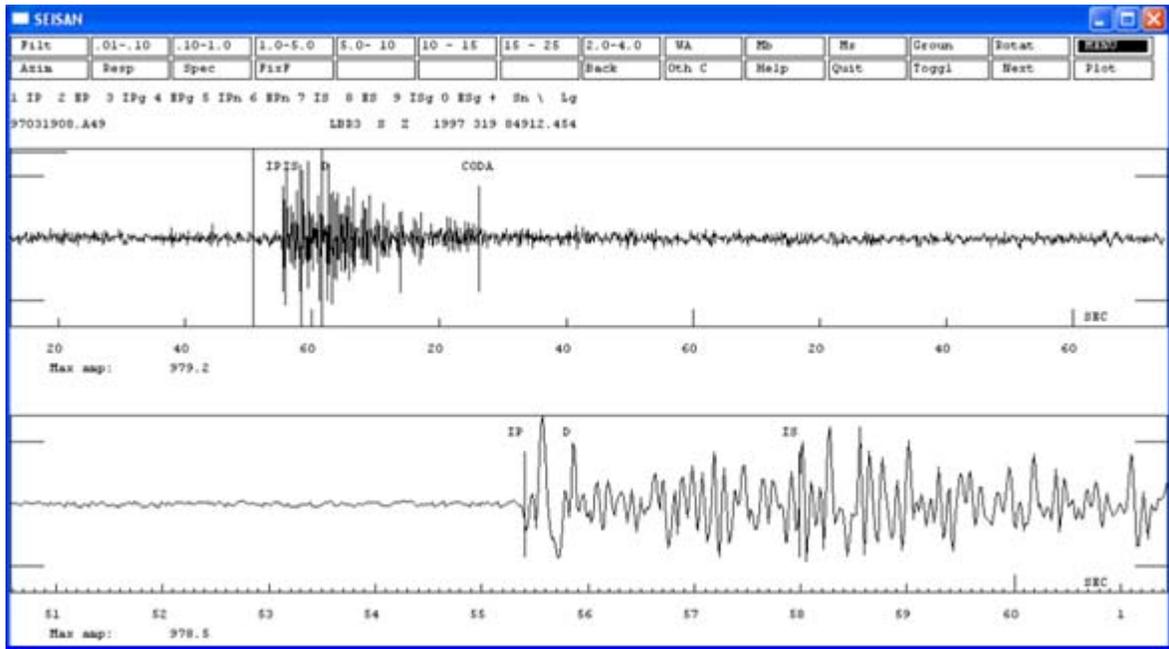


Figura 2-2. Proceso de picado de las fases para un evento sísmico. En el sismograma se muestra una fase impulsiva de dilatación.

SEISAN determinó el azimut de cada estación, así como el ángulo de salida del rayo de la onda P desde la fuente sísmica a cada estación donde se registró el sismo. Este proceso se realiza automáticamente al relocalizar los sismos.

La relocalización puede hacerse individualmente para cada evento o colectivamente para los eventos seleccionados. Si es el mecanismo focal es simple entonces se utilizó la primera opción y para el compuesto la segunda opción.

Los pasos seguidos para relocalizar un evento sísmico son los siguientes:

- Se hace una selección de los sismos con SELECT.

- Se corre HYP desde la línea de comandos sin ningún argumento. El programa pide el nombre del archivo donde están registrados los eventos, que en este caso es el select.out generado en el paso anterior.
- El programa pregunta si se quiere relocalizar los eventos individualmente o todos a la vez. Se escribe N para que los localice todos simultáneamente.

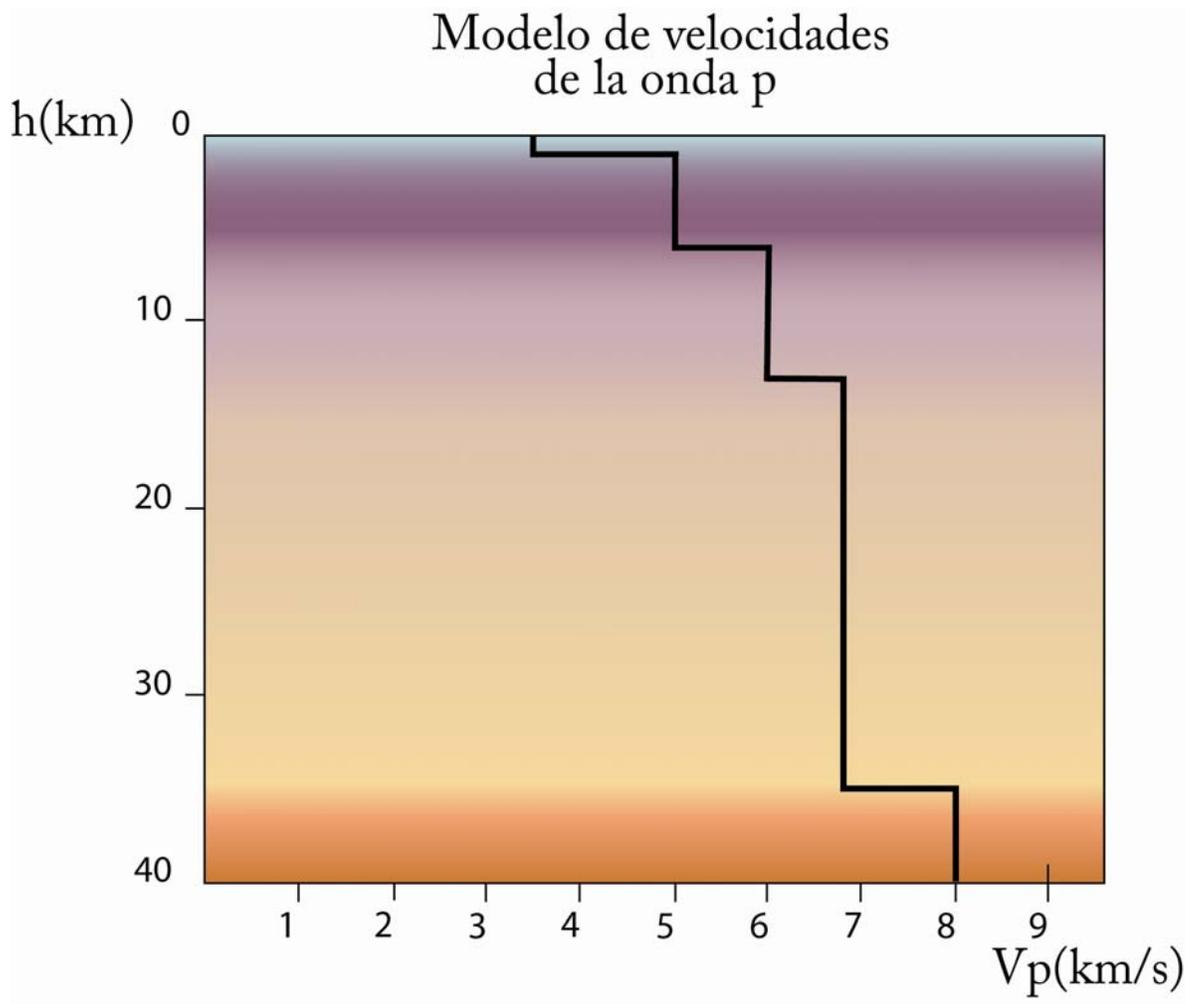


Figura 2-3. Modelo de velocidades para relocalizar los eventos sísmicos en el área de estudio. Este corresponde al utilizado para relocalizar los eventos sísmicos en Centroamérica (Luque Vergara, 2011). Donde h es la profundidad y V_p es la velocidad de la onda P.

2.7 Cálculo del mecanismo focal

Para el cálculo del mecanismo focal simple se realizó desde EEV con el programa FOCMEC y el comando F. Antes del cálculo del mecanismo focal se utiliza HYPOCENTER con el comando L.

FOCMEC ofrece varias opciones. Para el cálculo de un nuevo mecanismo se escribe 4 y seguidamente pide el número de errores de polaridades. Se escogió la opción -1, ya que así busca automáticamente el mejor ajuste. Finalmente se le indica los grados de búsqueda. Generalmente es preferible que sea un valor mayor o igual a 5, pero esto depende de la cobertura acimutal.

Para calcular el mecanismo focal compuesto se utilizó el programa FOCMEC. La primera versión de este programa fue presentada en 1984 (Snoke & Munsey, 1984) y fue escrito en el lenguaje de programación FORTRAN 77. Posteriormente el programa fue integrado a SEISAN donde ha seguido desarrollándose.

FOCMEC utiliza el método llamado de búsqueda de rejilla. Este consiste en calcular las polaridades teóricas para todas las polaridades observadas, utilizando los parámetros de cada estación, para un punto particular de la red, los cuales son el azimut, buzamiento, desplazamiento y contando cuantas polaridades se ajustan a la solución particular examinada. Al verificar sistemáticamente todas las posibles combinaciones de parámetros en una red igualmente espaciada, por ejemplo 5°, encontrando los parámetros con el menor número de errores de polaridad. Lo más común es que no todas las polaridades estén separadas en un área de dilación o compresión, por lo que pueden resultar muchas soluciones, con lo que se tiene un indicativo de la incerteza de la soluciones. Generalmente es necesario que el usuario elija una de las soluciones de acuerdo a la tectónica del lugar de estudio (Havskov & Ottemöller, 2010).

Los pasos seguidos para calcular un mecanismo focal compuestos fueron:

- Hacer una selección de los eventos que se van analizar. En el caso de esta investigación el criterio de selección fue que el sismo tenga un mecanismo focal simple del mismo tipo. Para esto se utiliza el comando SELECT con la opción 1.
- Abrir el archivo SELECT.OUT del cual se seleccionan manualmente los sismos con el mismo tipo de mecanismo y se pegan en otro archivo de texto con otro nombre.
- Se relocalizan los eventos sísmicos con HYP. Este pide el nombre del archivo donde se encuentran los registros seleccionados que en este caso no es el SELECT.OUT, sino el modificado.
- Desde la línea de comandos se escribe el comando FOCMEC. Este presenta cuatro opciones. Para nuestros fines sólo interesan la opción 4 y la 2. Con la opción 4 se calcula un nuevo mecanismo focal compuesto, aunque sirve igual para los simples, pidiendo en primer lugar cuál es el número mínimo de errores aceptables. Si se escribe -1 el programa busca automáticamente la mejor solución. En segundo lugar pregunta el número de grados al que va a realizarse la búsqueda de rejilla. Los mecanismos pueden dividirse en calidad A y B. Los de calidad A son aquellos con un solo tipo de solución y con un ángulo de rejilla menor a 10° . Los de calidad B son aquellos que tienen más de una solución en un rango de 10° a 30° (Montero & Barahona, 2005). Generalmente es necesario ir probando para varios ángulos de búsqueda hasta encontrar el ángulo con menor número de soluciones.
- Para graficar la solución o soluciones encontradas se escoge la opción 2 y el programa presenta las soluciones en la esfera focal. Esta posteriormente se puede editar en la carpeta WOR en el archivo focmec.eps, el cual puede abrirse con un programa que pueda leer PostScript como Adobe Illustrator.

- Finalmente se guarda el mecanismo en la base. Para esto se coloca el cursor sobre la solución, ya sea P o T y se presionan esas mismas letras y el programa pide confirmación para guardarlo.

La ventaja de este método es que sólo se necesita la información de las polaridades de cada estación. En nuestro caso que se tiene poca cobertura azimutal, se puede sumar las de todas las estaciones, como si fuera un solo evento para el cálculo del mecanismo focal compuesto.

Una limitación importante del método es que se necesita determinar cuáles de los eventos corresponden a la misma fuente. Esto se logra compensar teniendo en cuenta la distribución espacial y temporal de los terremotos, así como la solución del mecanismo focal simple. La otra limitación es que el mecanismo por si no identifica el plano de falla, por lo que se hace necesario recurrir a la geología local para determinarlo.

Para poder acceder a los datos procesados se utilizó el comando REPORT. Como siempre primero se hace un SELECT. También es importante actualizar los datos, para lo que se utilizó UPDATE. En la carpeta WOR se puede abrir los archivos de texto con una hoja de cálculo.

2.8 Cálculo de los valores a y b de la relación Gutenberg-Richter

En esta parte se utilizó el programa BVALUE el cual ajusta los datos de entrada, que son el número de eventos a estudiar y la magnitud escogida de estos, por el método de mínimos cuadrados a una línea recta. A la constante b se le llama *b-value*. Las magnitudes también se determinan en la parte del picado y la relocalización.

Desde la línea de comandos se escribe BVALUE. Primero pregunta el nombre del archivo donde están registrados los eventos. Por lo que es necesario primero hacer un SELECT para escoger los sismos para el análisis. Seguidamente pregunta por el tipo de magnitud a utilizar para encontrar la relación. En nuestro caso se utilizó la magnitud de coda, ya que para eventos pequeños es suficiente, por lo que la opción elegida es C.

Lo siguiente es definir el ancho del intervalo a utilizar, el cual puede variar desde 0.1 hasta 1.0. En nuestro caso se escogió un valor de 0.5. Finalmente muestra una tabla con el número de eventos en cada valor de magnitud y nos pregunta si se quieren graficar los datos. Se escribe Y para continuar. Se escribe 1 para poder hacer el ajuste por mínimos cuadrados y se despliega en pantalla la gráfica con el ajuste y los valores de a y b para la relación Gutenberg-Richter.

La ventaja principal de este método es que puede indicarnos cómo se comporta la resistencia a los esfuerzos del material de la zona y es fácil de aplicar, ya que solo requiere un ajuste por mínimos cuadrados.

Una desventaja es que se necesita un catálogo bastante completo de la sismicidad del lugar para obtener un valor confiable de b-value.

2.9 Determinación de los esfuerzos en la zona de San Vicente

Para determinar los esfuerzos en la zona se utilizó Win Tensor 4.0.1. Para esto se necesita definir una región que este bajo el mismo régimen de esfuerzos y tener calculados los mecanismos focales correspondientes.

Los mecanismos se importan o se digitan en Win Tensor (ver Figura 2-4). Se debe asegurar que el formato tenga el código 44 y tipo 1 antes de digitar el mecanismo focal. Se presiona el botón “processing” y el software encuentra, por varios métodos, los esfuerzos principales en la zona.

Las imágenes pueden exportarse en formato bmp haciendo clic derecho sobre estas. También de la opción de varias formas de representar los resultados: como las flechas para los esfuerzos o el mecanismo al que corresponde.

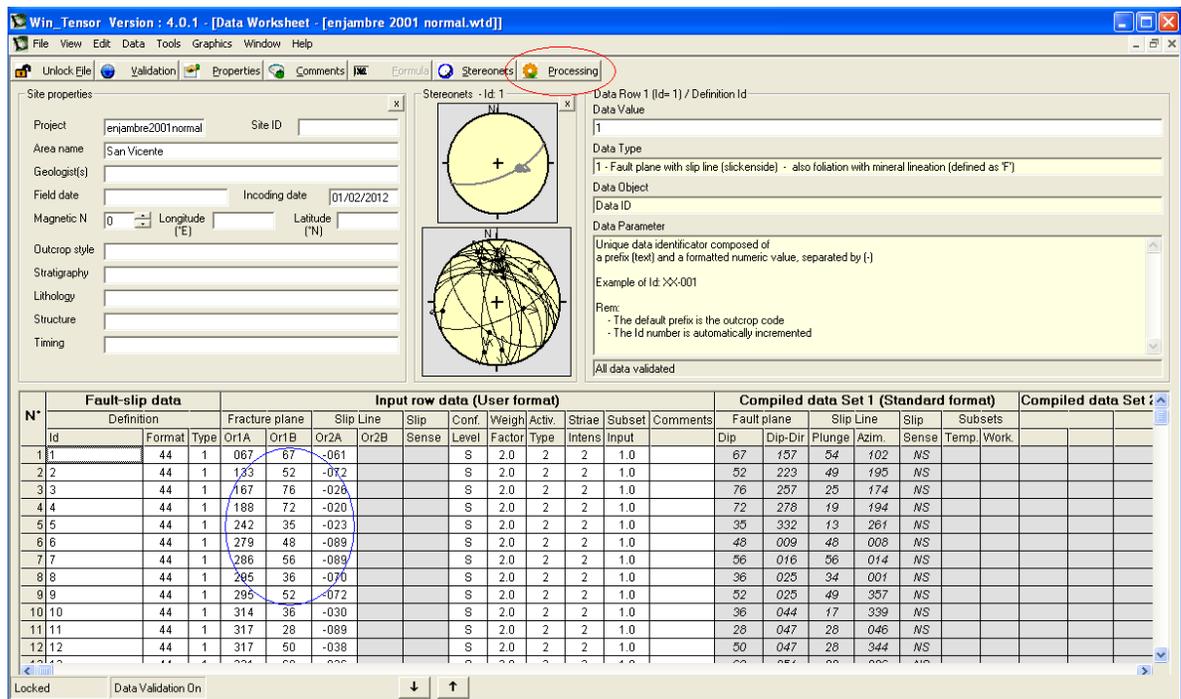


Figura 2-4 Interfaz gráfica del WIN TENSOR. Se digitan los parámetros de los mecanismos (óvalo azul) y se presiona el botón Processing (óvalo rojo) para aplicar el método de diedros rectos.

Capítulo 3 Presentación y discusión de resultados

3.1 Distribución espacial y temporal de la sismicidad de los enjambres sísmicos

Se analizaron cuatro enjambres sísmicos en el área comprendida entre el lago de Ilopango y el río Lempa entre los años 1997 y 2008. Para un mejor análisis y de acuerdo a la distribución de los enjambres en la zona de San Vicente se ha dividido en tres áreas como muestra la Figura 3-1. En el caso del enjambre de 2001 está comprendida la totalidad del área, sin embargo se utilizará la misma división para simplificar su análisis.

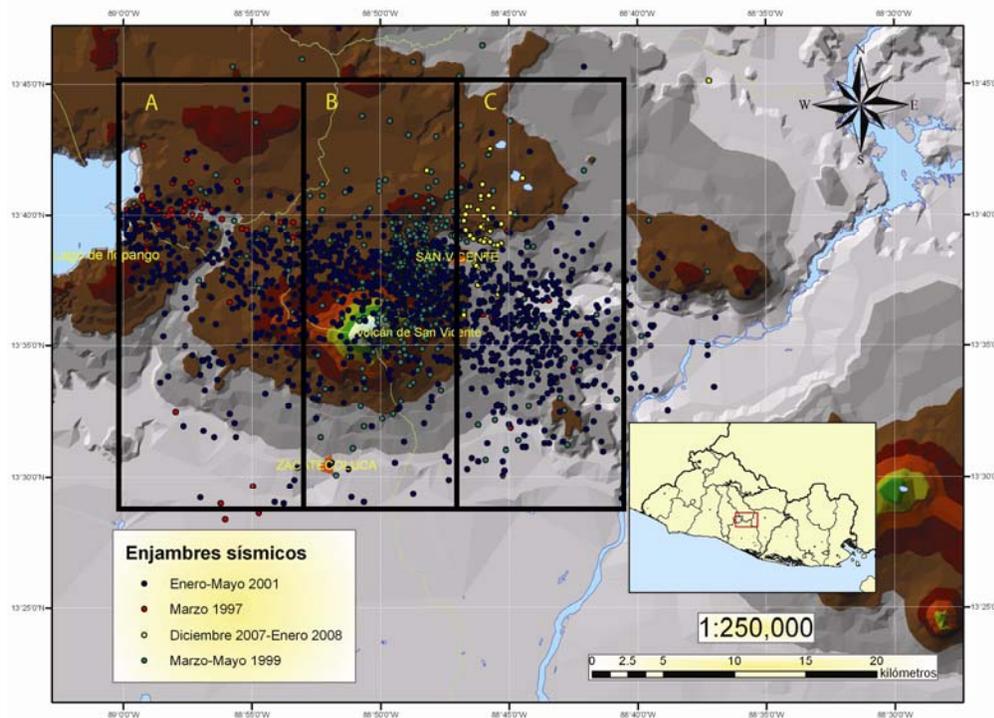


Figura 3-1 Región de San Vicente donde ocurrieron los tres enjambres sísmicos del estudio, A. Región del enjambre sísmico de marzo de 1997 B. Región del enjambre sísmico de marzo-mayo de 1999 C. Región del enjambre sísmico de diciembre de 2007 a enero de 2008. El enjambre de 2001 abarca la totalidad del área de estudio.

3.1.1 Enjambre sísmico de marzo de 1997

El 2 de marzo de 1997 se inició el primer enjambre sísmico bajo el sector oeste del área de San Vicente o área A como se muestra en la

Figura 3-2 . La actividad continuó hasta el día 27 de marzo cuando se registraron los dos últimos de la secuencia (ver Figura 3-3). La actividad sísmica estudiada consistió de 90 temblores, con un promedio diario de 3.6 eventos por día y llegando hasta 31 eventos como máximo el día 19 de marzo.

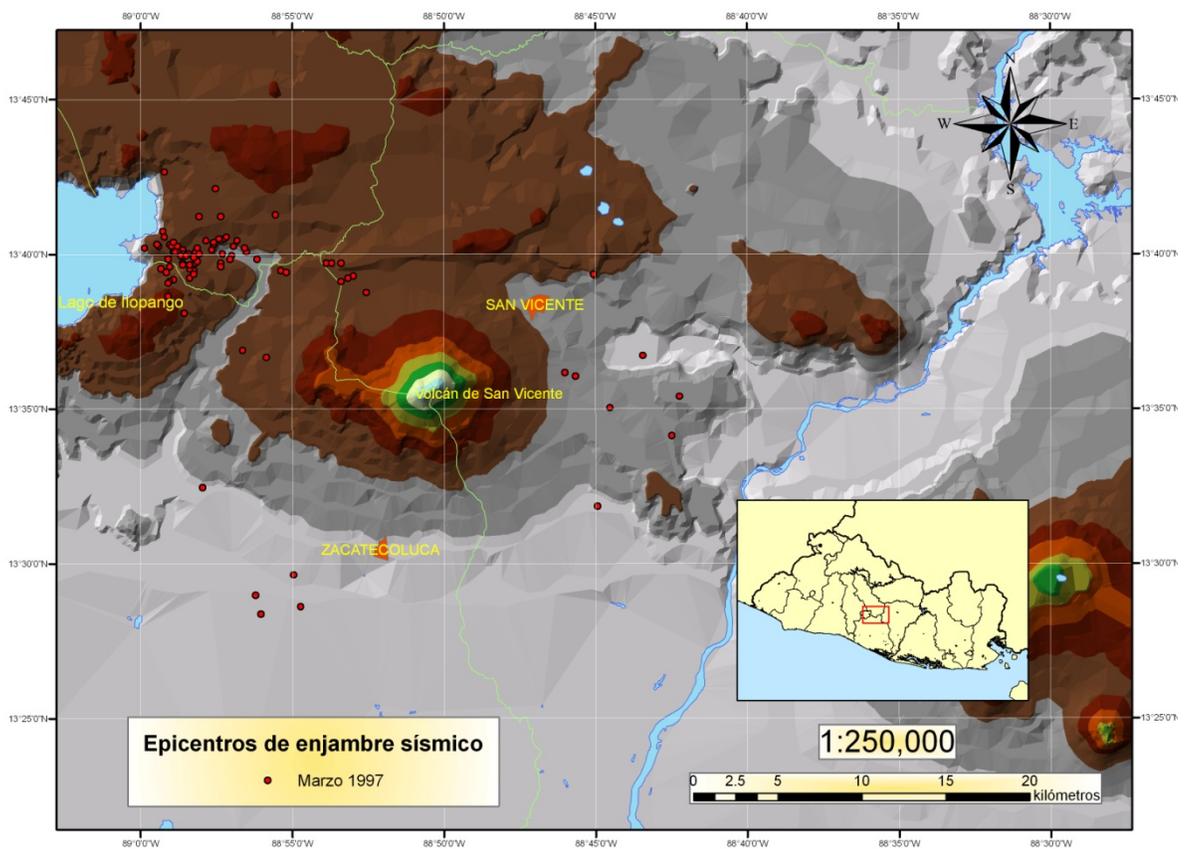


Figura 3-2. Distribución de epicentros para el enjambre sísmicos ocurrido entre el 2 y 27 de marzo de 1997 en el área A de San Vicente.

Las magnitudes variaron entre 0.1 y 3.0 Mc. Los epicentros de los sismos muestran una mayor concentración al este del lago de Ilopango, teniendo una forma alargada con orientación E-O, atravesando el Graben central de El Salvador. Las profundidades de los temblores relocalizados son entre 0.9 y 15 kilómetros, con una concentración entre los 4 y 10 km de profundidad, por lo que en general son de tipo superficial (ver Figura 3-4).

Enjambre sísmico de marzo-1997

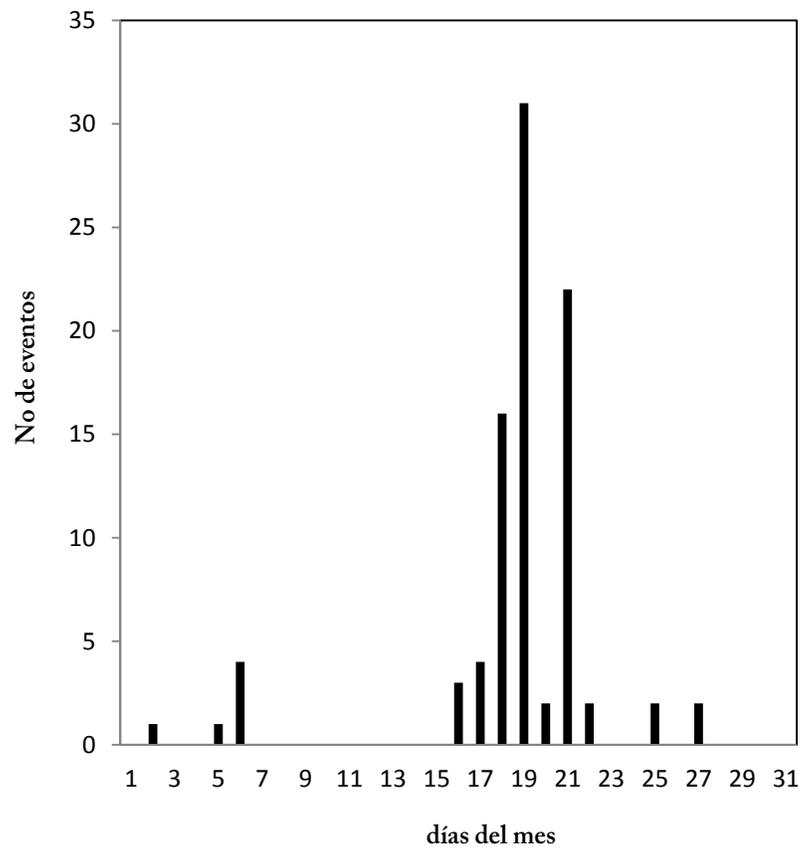


Figura 3-3. Distribución temporal del enjambre sísmico de marzo de 1997.

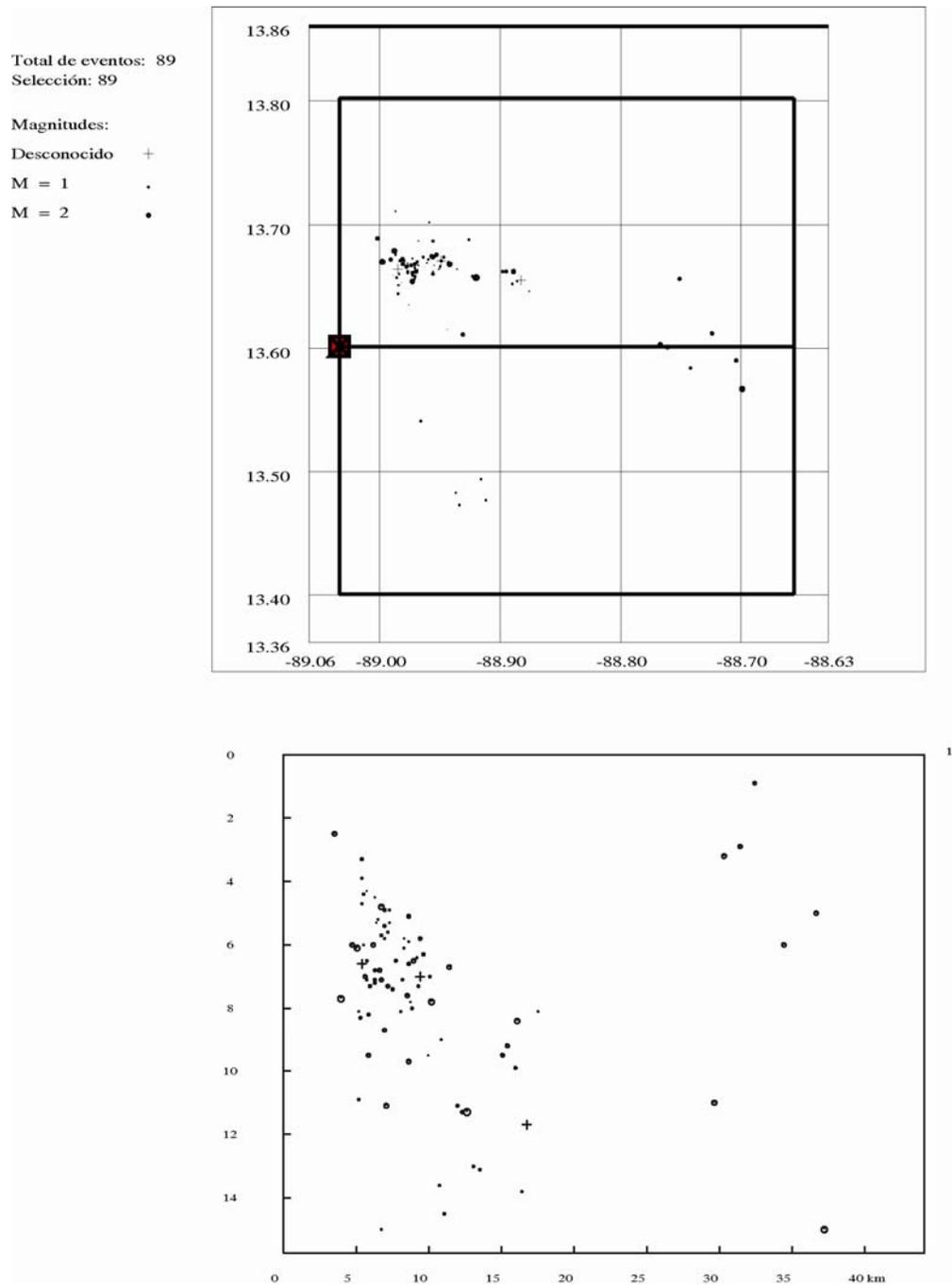


Figura 3-4. En la parte superior los epicentros del enjambre. En la parte inferior el perfil de la sismicidad del enjambre de marzo de 1997 con orientación E-O con una profundidad de 16 km y las magnitudes M_c calculadas.

3.1.2 Enjambre sísmico de marzo a mayo de 1999

El segundo enjambre estudiado se inició el 1 de marzo de 1999 bajo el sector central del área de San Vicente o área B. La actividad continuó hasta el día 25 de mayo de 1999 cuando se registró el último evento de la secuencia. La actividad sísmica consistió de 523 temblores, con un promedio diario de 6.1 eventos por día y llegando hasta 86 eventos como máximo el día 2 de marzo. La mayor concentración de sismos fue en el mes de marzo con 443 eventos, siendo mucho menor la actividad sísmica los siguientes dos meses (ver Figura 3-5).

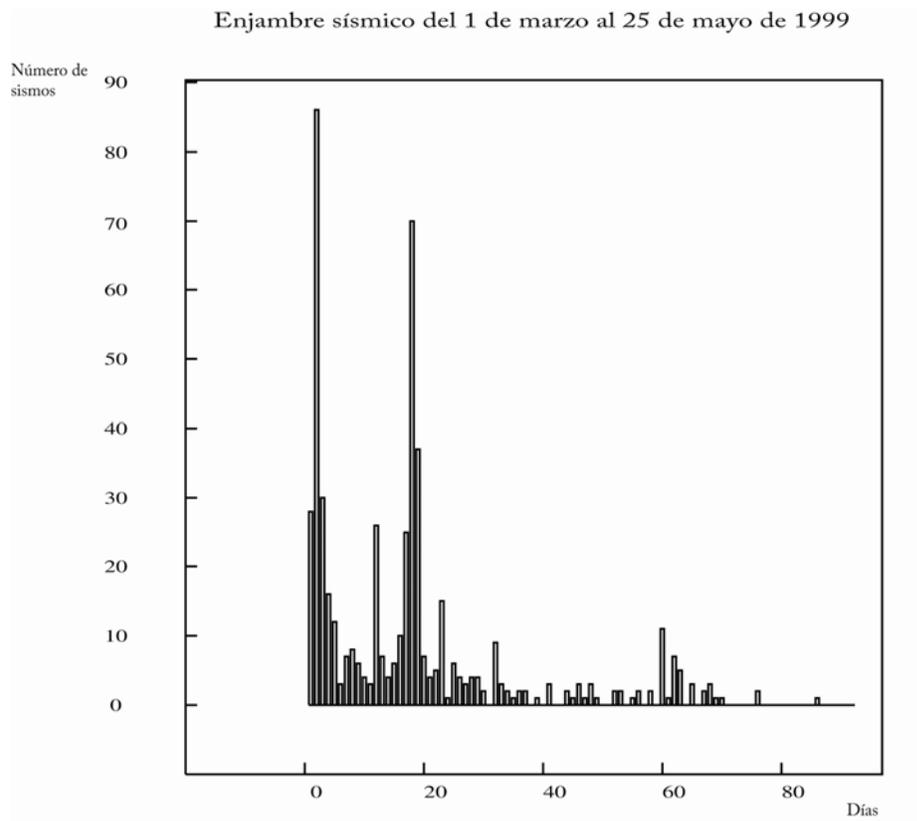


Figura 3-5. Distribución temporal del enjambre sísmico del mes de marzo a mayo de 1999

Las magnitudes variaron entre 0.1 y 4.5 Mc. Los epicentros del sismo muestran una mayor concentración al occidente de la Ciudad de San Vicente, teniendo una forma alargada con orientación N-S a lo largo del graben central del país (ver Figura 3-6).

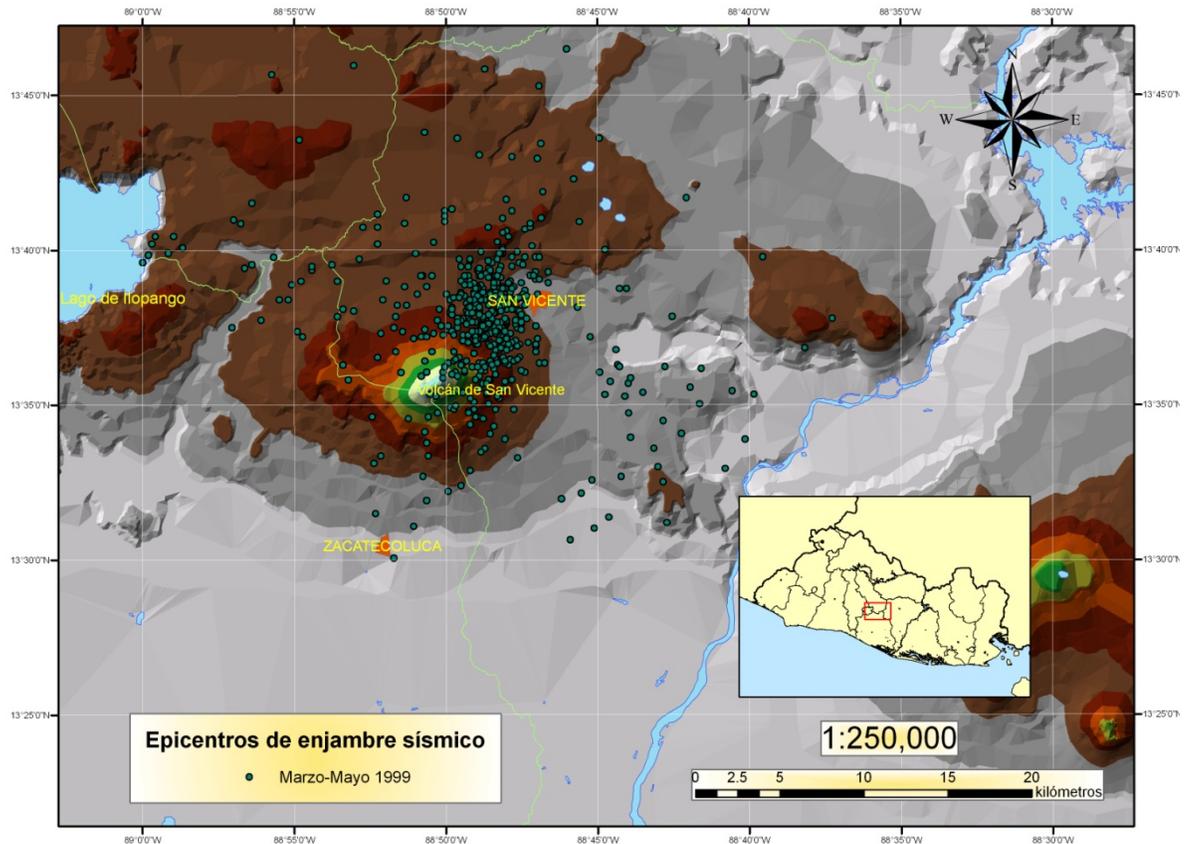


Figura 3-6. Distribución de epicentros para el de enjambre sísmico de marzo a mayo de 1999 en la región B de San Vicente.

Las profundidades de los temblores relocalizados son entre 0.8 y 24.5 km con una concentración entre los 5 y 13 km de profundidad, por lo que en general son de tipo superficial. Hay que mencionar sin embargo, que ocho de los sismos se originaron en la zona de subducción, ya que sus profundidades fueron arriba de los 100 km por lo que no se consideraron para el presente estudio.

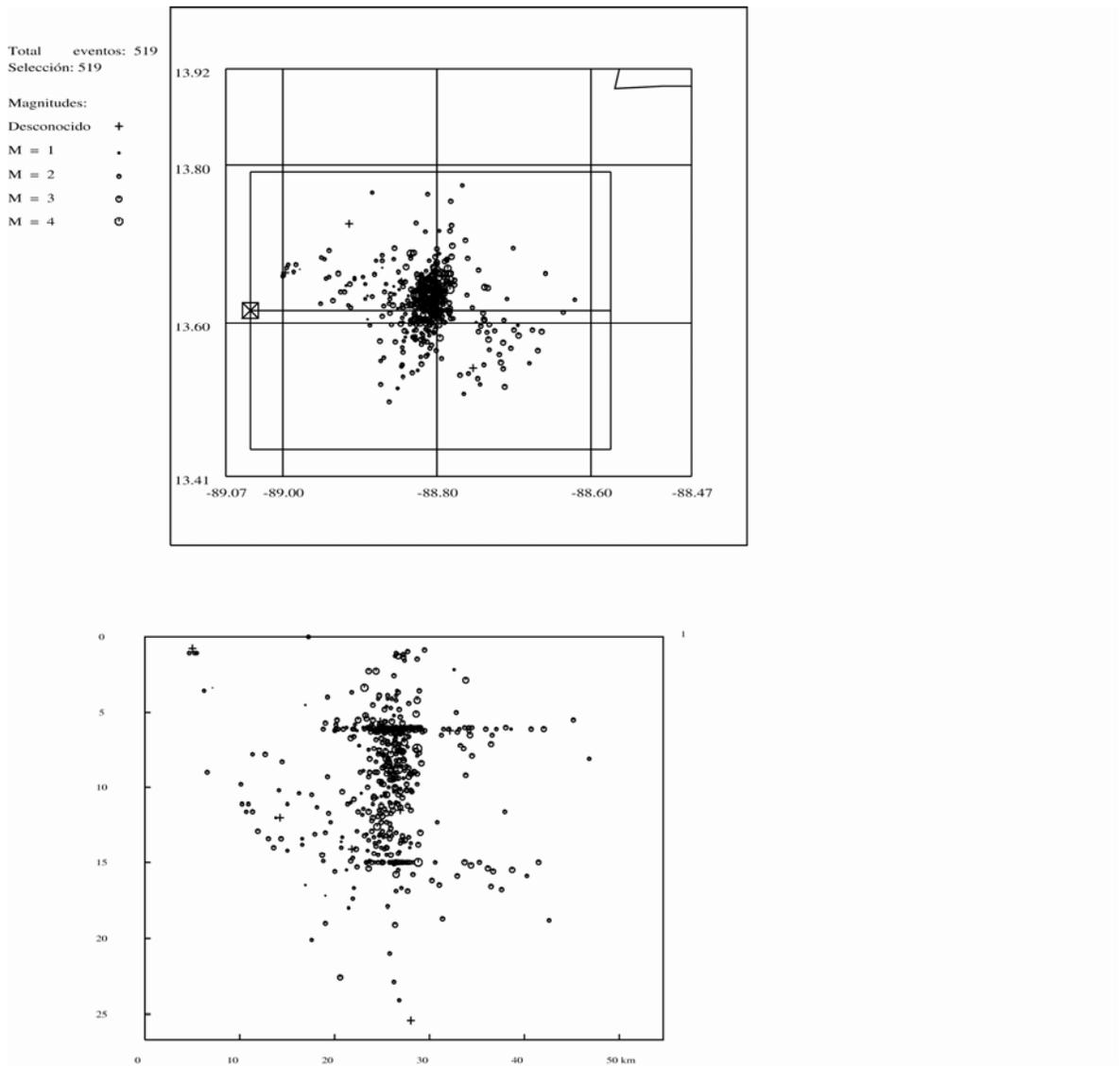


Figura 3-7. Perfil de la sismicidad del enjambre de marzo a mayo de 1999 con orientación NE y sus respectivas magnitudes M_c .

3.1.3 Enjambre sísmico de enero a junio de 2001

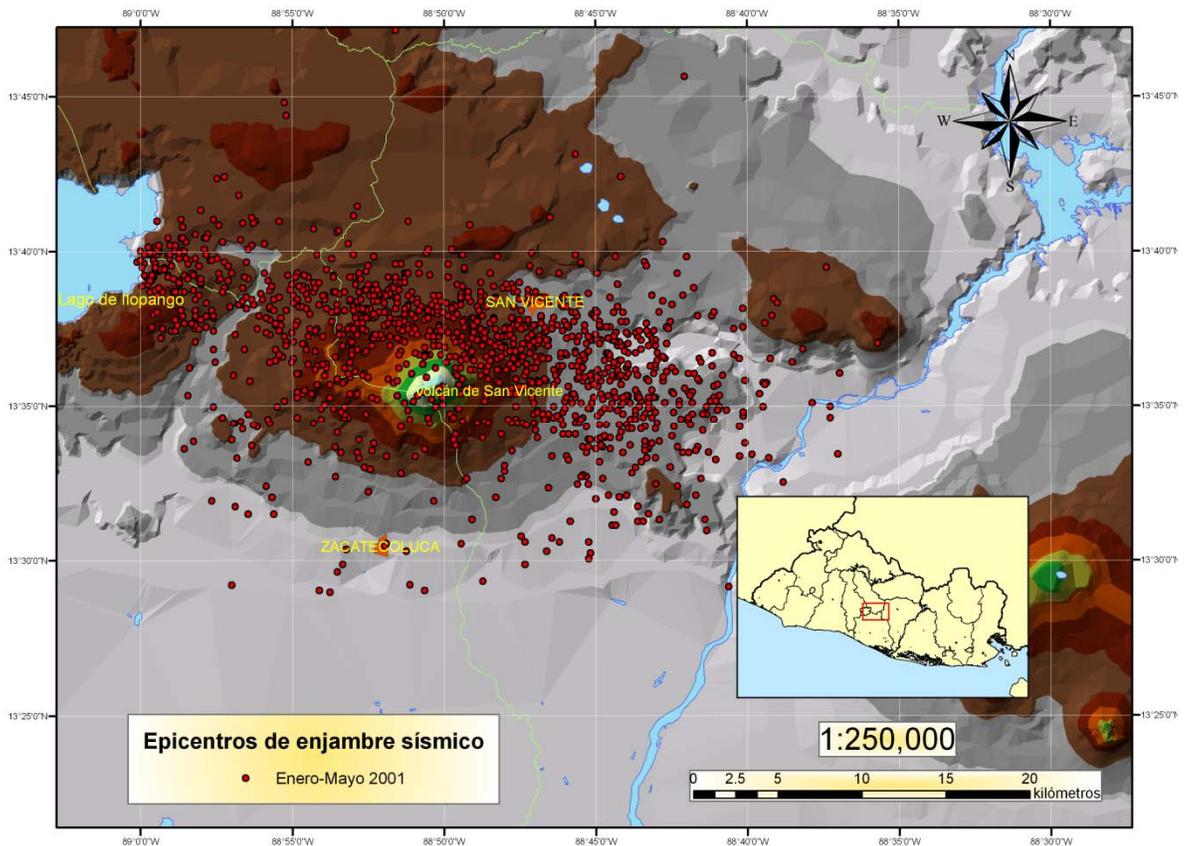


Figura 3-8. Distribución de epicentros para el de enjambre sísmico de enero a junio de 2001 en toda la región de San Vicente.

El tercer enjambre estudiado se inició el 13 de enero de 2001 y cubre toda el área de estudio. La actividad continuó hasta el día 27 de junio de 2001 cuando se registró el último evento de la secuencia. La actividad sísmica consistió de 1 378 temblores, de los cuales 1372 fueron de tipo superficial y de origen tectónico. El resto fue en la zona de subducción, siendo el principal el sismo de 7.7 M_w (Cepeda et al., 2004) ocurrido el 13 de enero. Se tuvo un promedio diario de 7.5 eventos por día, llegando hasta 137 eventos como máximo el día 14 de febrero, posterior al segundo sismo de mayor magnitud de 6.6 M_w (Cepeda et al., 2004). La mayor concentración de sismos fue en el mes de febrero con 531 eventos (ver

Anexo 1), siendo mucho menor la actividad sísmica los siguientes dos meses, pero teniendo un aumento significativo el mes de mayo con 420 sismos. En el mes de junio la actividad sísmica disminuyó y finalizó (ver Figura 3-9).

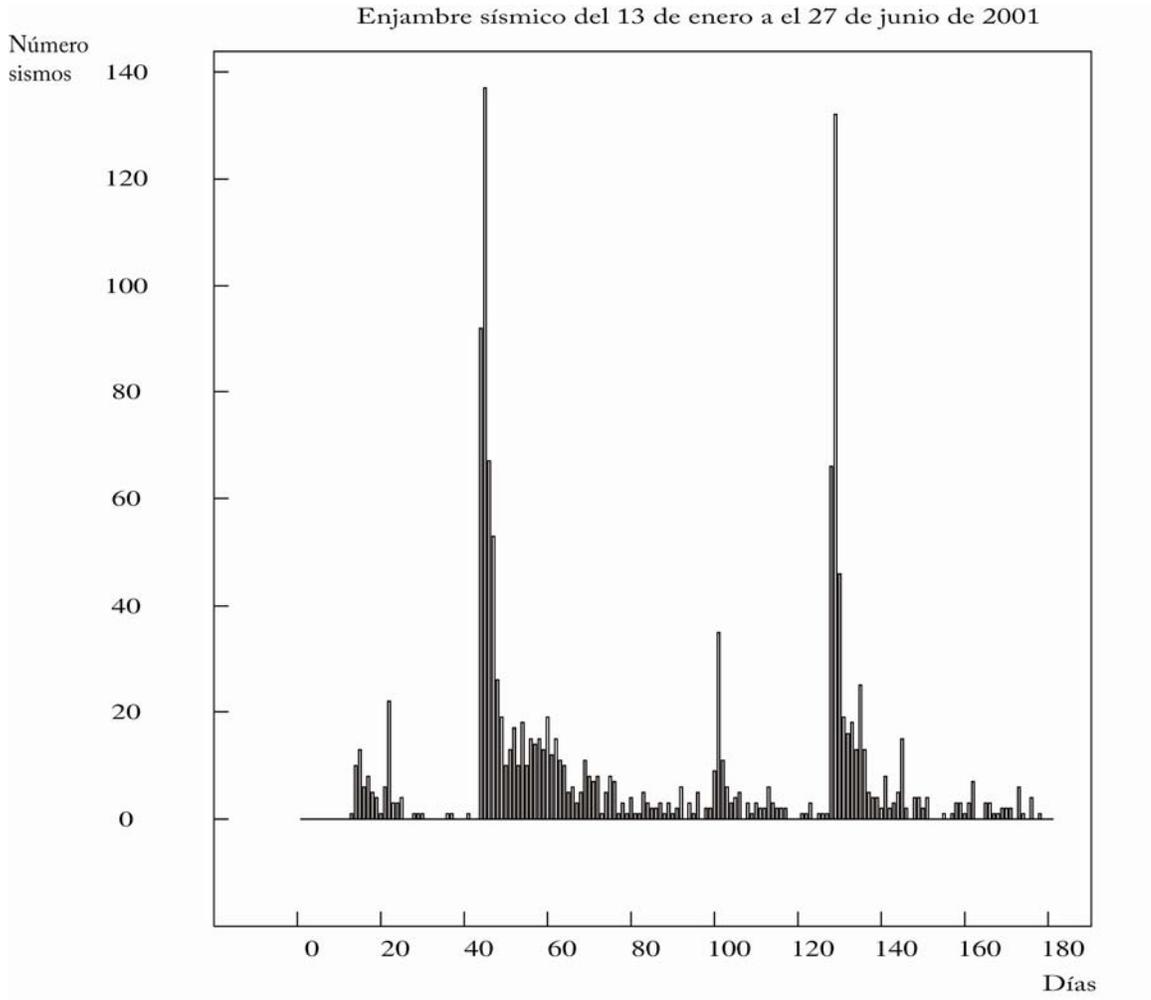


Figura 3-9. Distribución temporal del enjambre sísmico del mes de enero a junio de 2001. La actividad sísmica fue mayor durante los meses de febrero y mayo.

Las magnitudes variaron entre 0.9 y 4.5 Mc. Las profundidades de los temblores relocalizados fueron entre 0 y 34 km con una concentración entre los 5 y 15 km de profundidad, siendo en general de tipo superficial.

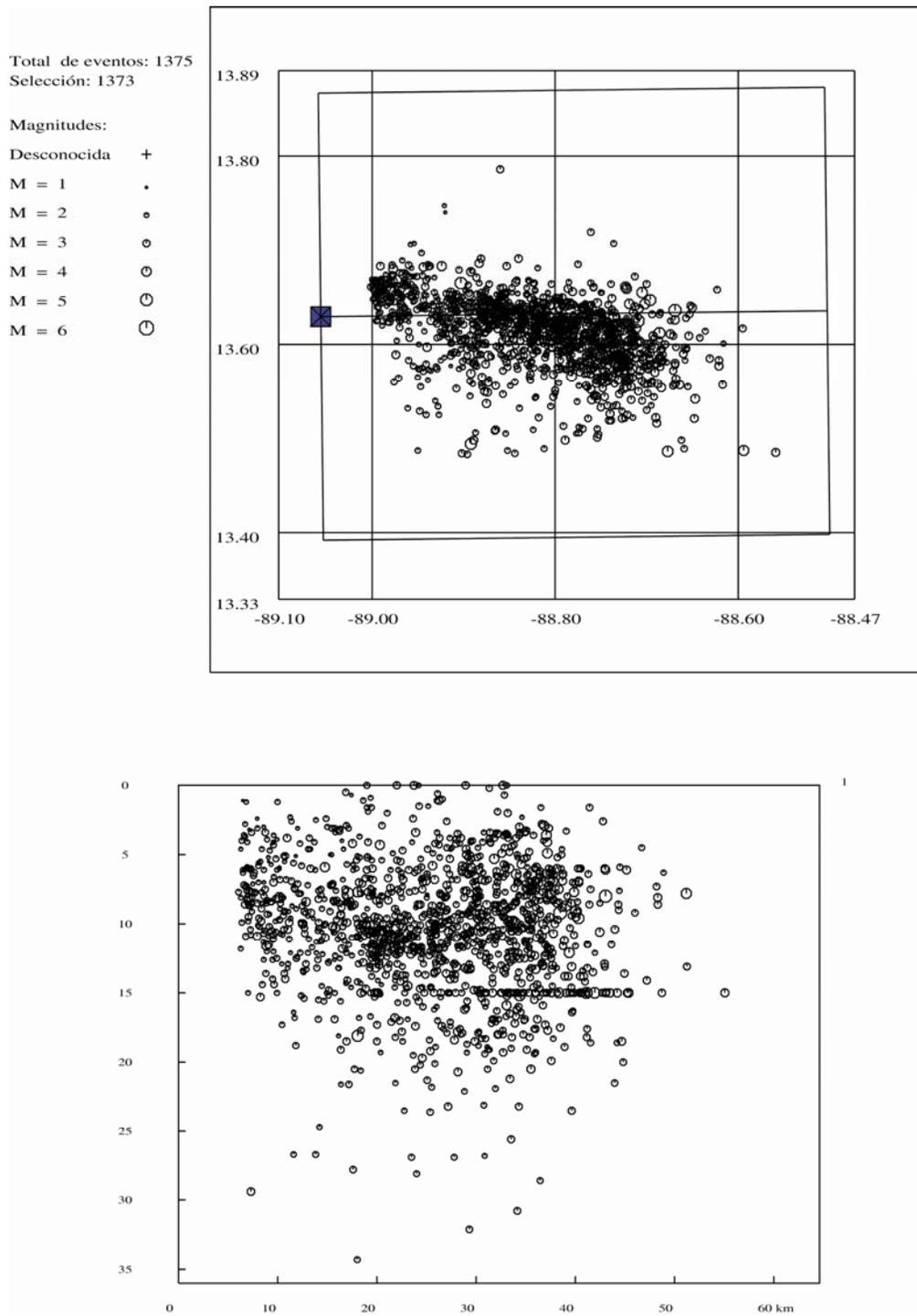


Figura 3-10. Perfil de la sismicidad del enjambre de enero a junio de 2001 con orientación EO y sus respectivas magnitudes.

3.1.4 Enjambre sísmico de diciembre-2007 a enero-2008

El 22 de diciembre de 2007 se inició un enjambre sísmico bajo el sector este del área de San Vicente o área C (ver Figura 3-11). La actividad continuó hasta el día 27 de enero cuando se registró el último sismo de la secuencia. La actividad sísmica estudiada consistió de 55 temblores, con un promedio diario de 1.2 eventos por día y llegando hasta 5 eventos como máximo el día 29 de diciembre (ver Figura 3-12).

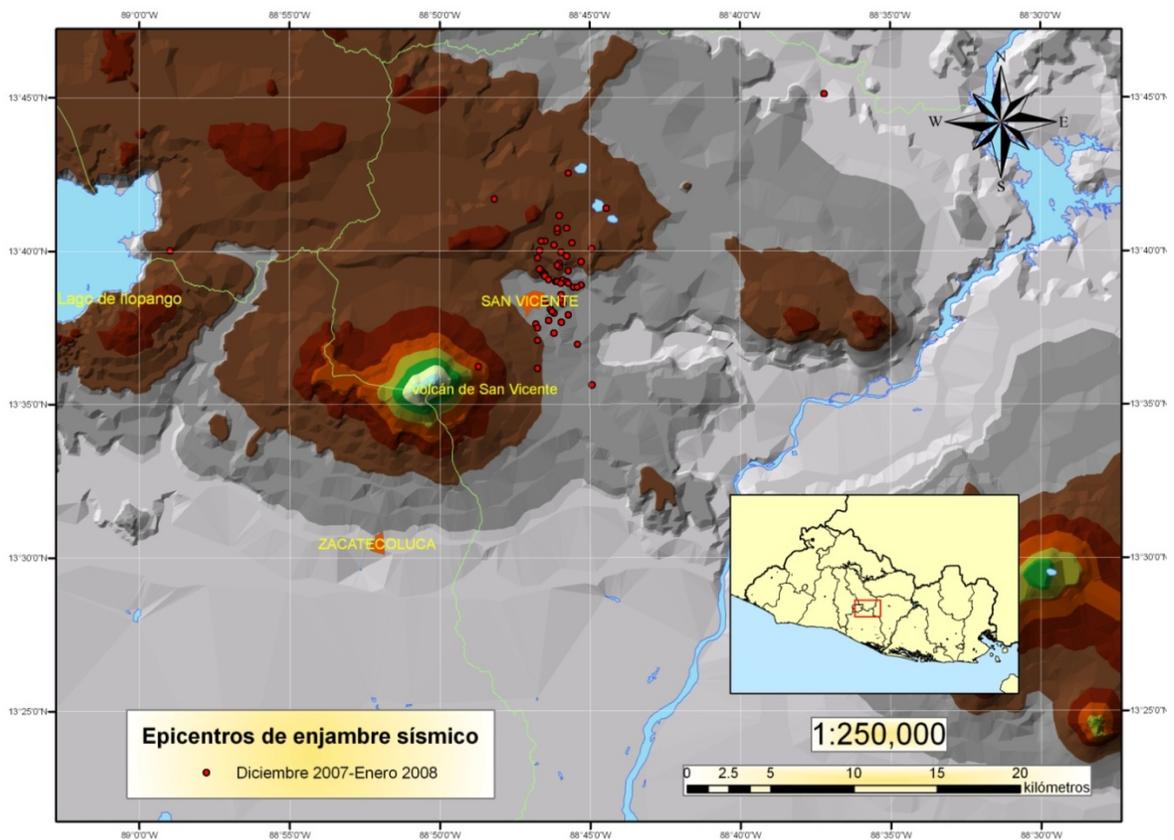


Figura 3-11. Distribución de epicentros para el de enjambre sísmico de 2007-2008.

Las magnitudes variaron entre 0.9 y 3.3 Mc. Los epicentros del sismo muestran una mayor concentración al este de la Ciudad de San Vicente, teniendo una forma alargada con

orientación N-S a lo largo del graben central del país. Las profundidades de los temblores relocalizados fueron entre 6 y 15 kilómetros con una concentración entre los 9 y 13 km de profundidad, por lo que en general son de tipo superficial (ver Figura 3-13). 41 de los sismos no pudieron ser relocalizados de manera precisa, ya que mostraban errores hipocentrales muy grandes, esto debido probablemente a problemas de cobertura de las estaciones sísmicas.

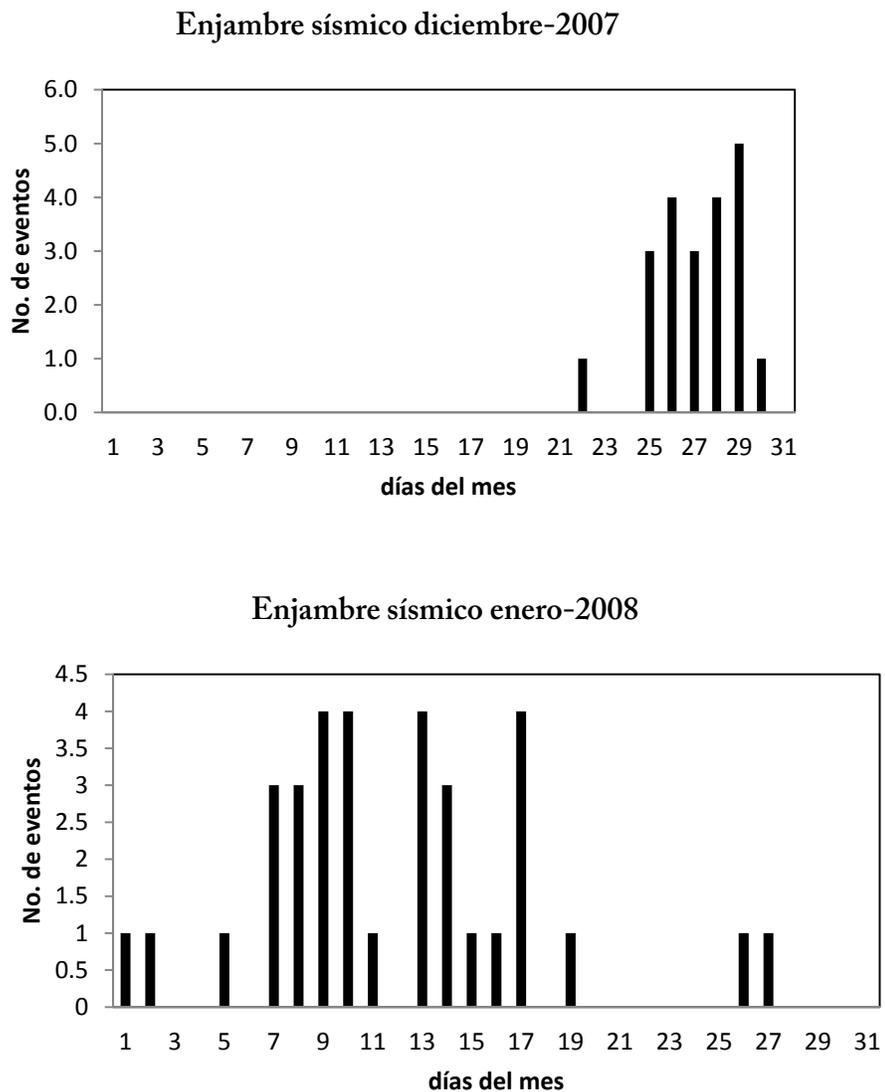


Figura 3-12 Distribución temporal para el enjambre sísmico de diciembre-2007 y enero-2008

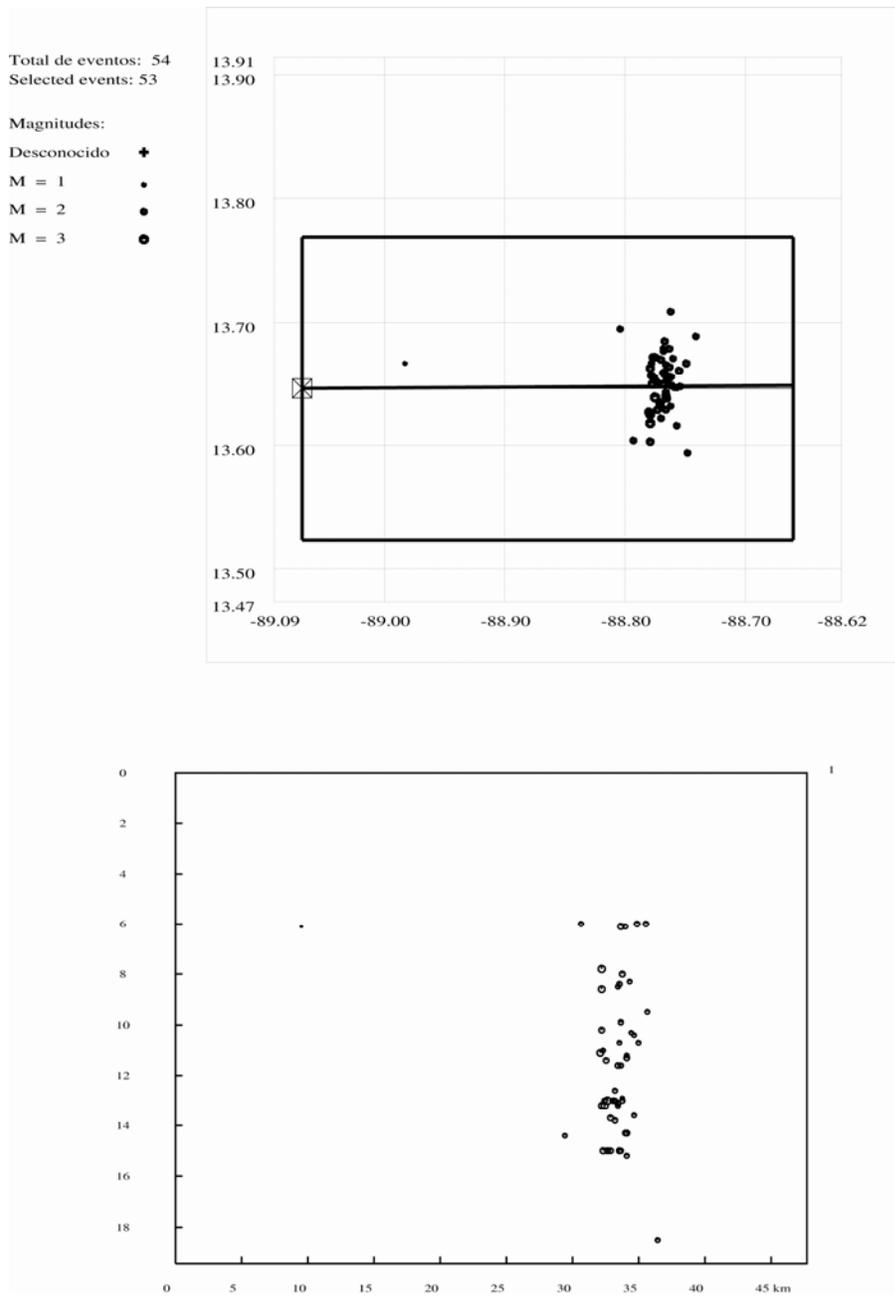


Figura 3-13. Perfil de la sismicidad del enjambre de diciembre de 2007 a enero de 2008 con orientación N-E y las magnitudes M_c calculadas.

3.2 Mecanismo focal simple y compuesto de los enjambres sísmicos

Para el cálculo del mecanismo focal compuesto primero se calcularon los simples. El primer criterio de selección fue el número de polaridades, el cual debía ser mayor que cinco y con una profundidad menor a la 40 km. El último criterio de selección, para solo tomar sismos de importancia, fue la magnitud del terremoto. Los valores tomados variaron para cada enjambre, dependiendo el número de terremotos.

3.2.1 Mecanismo focal compuesto del enjambre sísmico de 1997

Para este enjambre sísmico no pudo calcularse un mecanismo focal simple satisfactorio, por lo que se procedió a calcular de una vez el compuesto.

Se tomó como criterio de selección que los sismos tuvieran comprendidos entre las latitudes 13.65° y 13.70° . Se relocalizaron con éxito 40 sismos (ver Anexo 2), obteniéndose el mecanismo focal compuesto mostrado en la Figura 3-14.

La solución obtenida es un mecanismo focal compuesto de desgarre con componente inversa. Su acimut es de 81.44° , buzamiento de 81.46° y ángulo de desplazamiento de 162.62° . El mecanismo focal compuesto es mostrado en la Figura 3-15 junto con las principales fallas geológicas del área A. De esta última figura se observa que la mayor concentración de eventos ocurre en la parte más próxima al Lago de Ilopango.

El azimut del plano de falla de la solución coincide con la falla orientada de E-O, teniendo un buzamiento de alto ángulo y un desplazamiento de tipo dextral. El mecanismo focal concuerda en el acimut y buzamiento reportado por (Martínez-Díaz et al., 2004) para la zona en estudio y la falla denominada “Zona de Falla de El Salvador” o ZFES por el mismo autor; pero difiere en cuanto a la componente, ya que el mecanismo reportado en 2001 es de componente normal y este es de componente inverso. De hecho la aparición de componentes inversos se dio en varias soluciones de otros enjambres.

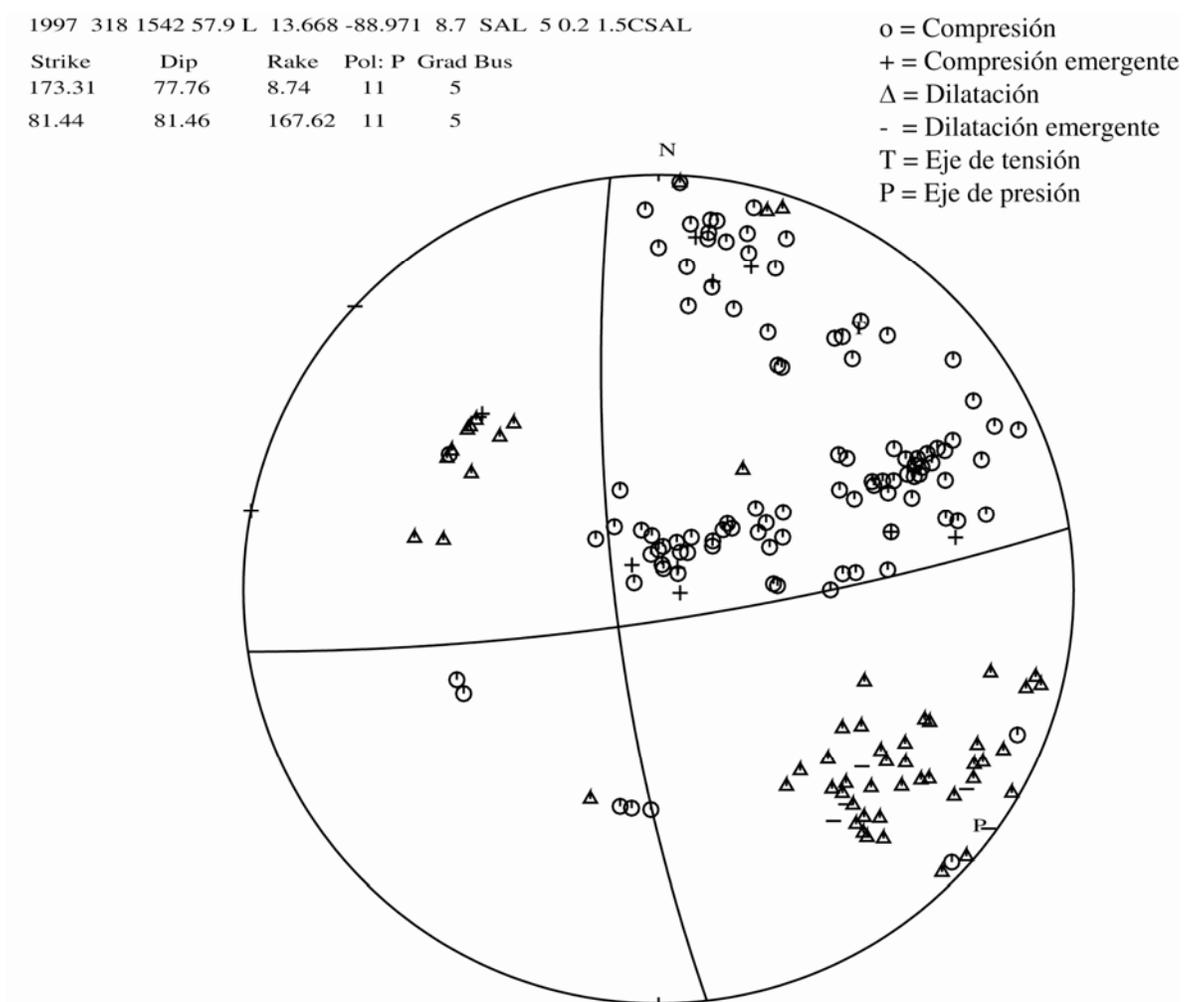


Figura 3-14. Mecanismos focal compuesto para el enjambre sísmico de marzo de 1997. El número de errores de polaridad es 11 y el grado de búsqueda es 5.

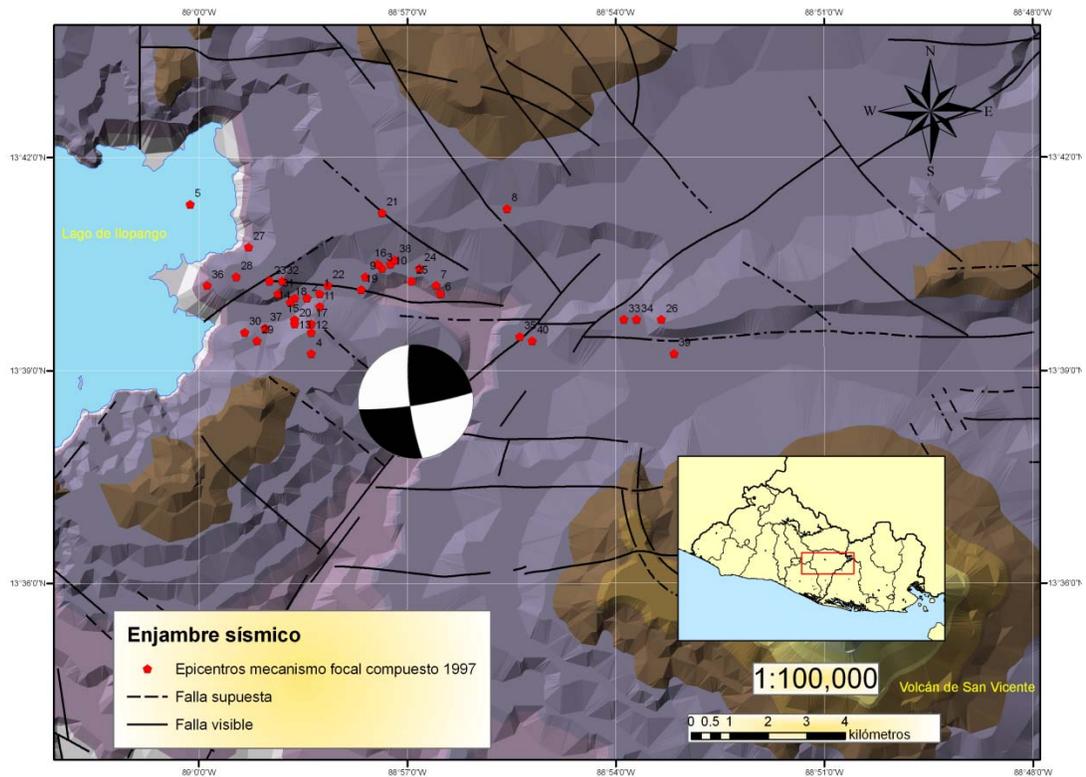


Figura 3-15. Principales sistemas de falla en el área de estudio A junto con el diagrama del mecanismo focal compuesto. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones.

3.2.2 Mecanismo focal de enjambre sísmico de 1999

El enjambre de 1999 es uno de los más complejos, ya que el número de sismos registrados fue de 523. Para poder determinar el mecanismo focal se impuso la condición que de que $M_c > 2.4$ y el número de polaridades fuera mayor o igual a 5. Con estos criterios se seleccionaron 28 eventos sísmicos (ver Anexo 3).

De las 28 eventos a los que se les calculó el mecanismo focal simple se tiene que: 13 son de desgarre, 12 normales y 3 inversos como muestra la Tabla 3-1.

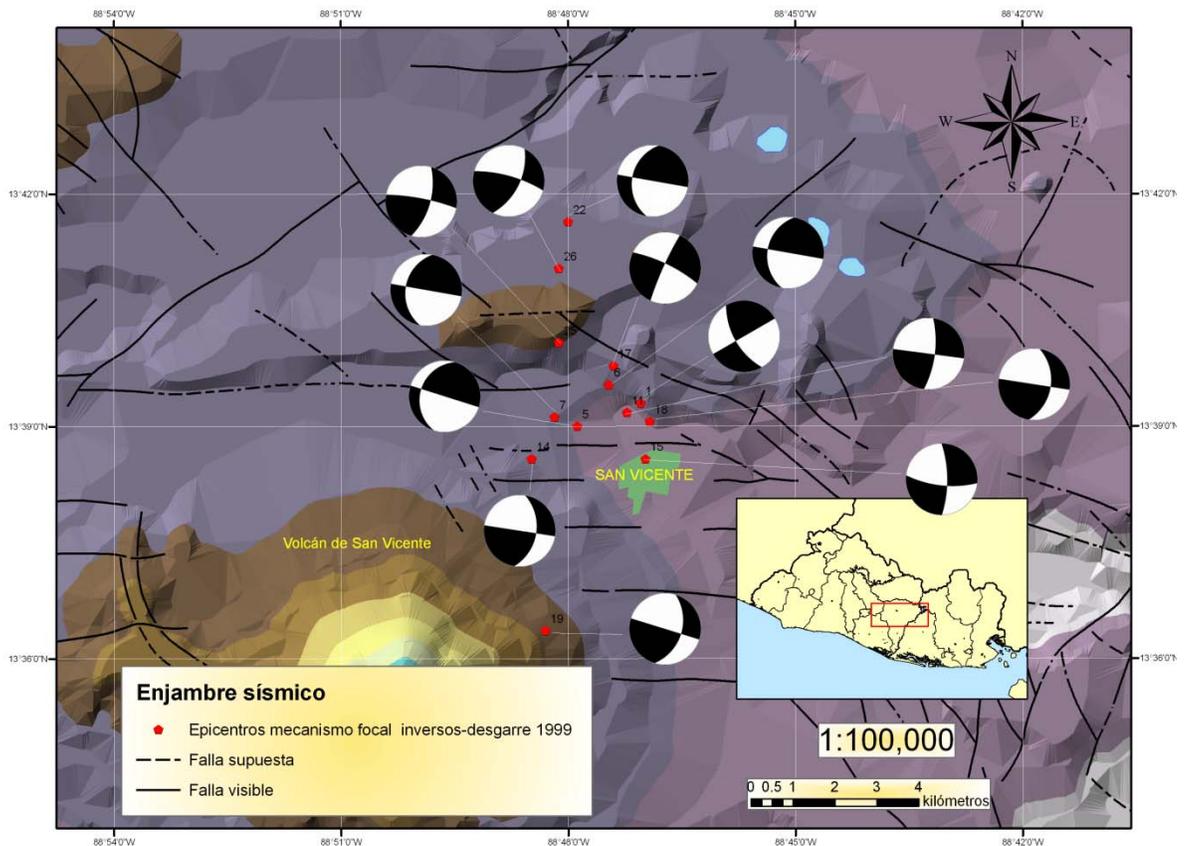


Figura 3-16. Principales sistemas de falla en el área de estudio B junto con los diagramas de mecanismo focal de desgarre encontrados para los sismos seleccionados.

Respecto a los mecanismos de desgarre (ver Figura 3-16) se observa que son sinestrales con orientación N-S y NNE-SSO. Tomando como plano de falla el auxiliar se tendrían fallas inversas con orientación E-O y ONO-ESE. Aunque las orientaciones si corresponde al acimut de fallas en la zona, no así al tipo de fallas encontradas. La razón principal de que esto ocurra es debido a las pocas polaridades de los mecanismos focales (ver Anexo 4).

Para los mecanismos focales normales (ver Figura 3-17) se tiene que predominan, de mayor a menor, las de orientación NNO-SSE, N-S y ONO-ESE. En el plano de falla auxiliar la mayoría son de orientación E-O y N-S. Estos resultados están de acuerdo a los reportados por Corti et al. (2005) y Canora Catalán (2010) para este tipo de falla.

Tabla 3-1. Parámetros del mecanismo focal calculados para el enjambre sísmico de 1999.

No.	STRIK	DIP	RAKE	STRIK-AUX	DIP-AUX	RAKE-AUX
1	156	70	0	66	90	160
2	180	50	-89	358	40	-91
3	166	61	-27	271	65	-147
4	344	64	56	221	42	139
5	198	21	0	207	90	111
6	190	30	0	100	90	120
7	190	30	0	100	90	120
8	219	61	42	104	54	142
9	281	50	-89	101	40	-90
10	159	40	-60	302	56	-112
11	8	70	0	277	90	160
12	292	76	-74	64	21	-136
13	313	45	-89	133	45	-90
14	9	40	0	279	90	130
15	9	40	0	96	70	-161
16	154	54	-36	269	60	-138
17	204	84	-13	296	76	-173
18	9	40	0	279	90	130
19	17	40	0	287	90	130
20	345	44	-89	165	46	-90
21	154	54	-36	268	60	-137
22	190	30	0	100	90	120
23	53	62	22	312	70	150
24	189	60	-34	298	60	-145
25	16	62	11	281	80	151
26	26	56	19	285	74	144
27	180	50	-89	0	40	-90
28	336	61	-27	81	66	-147

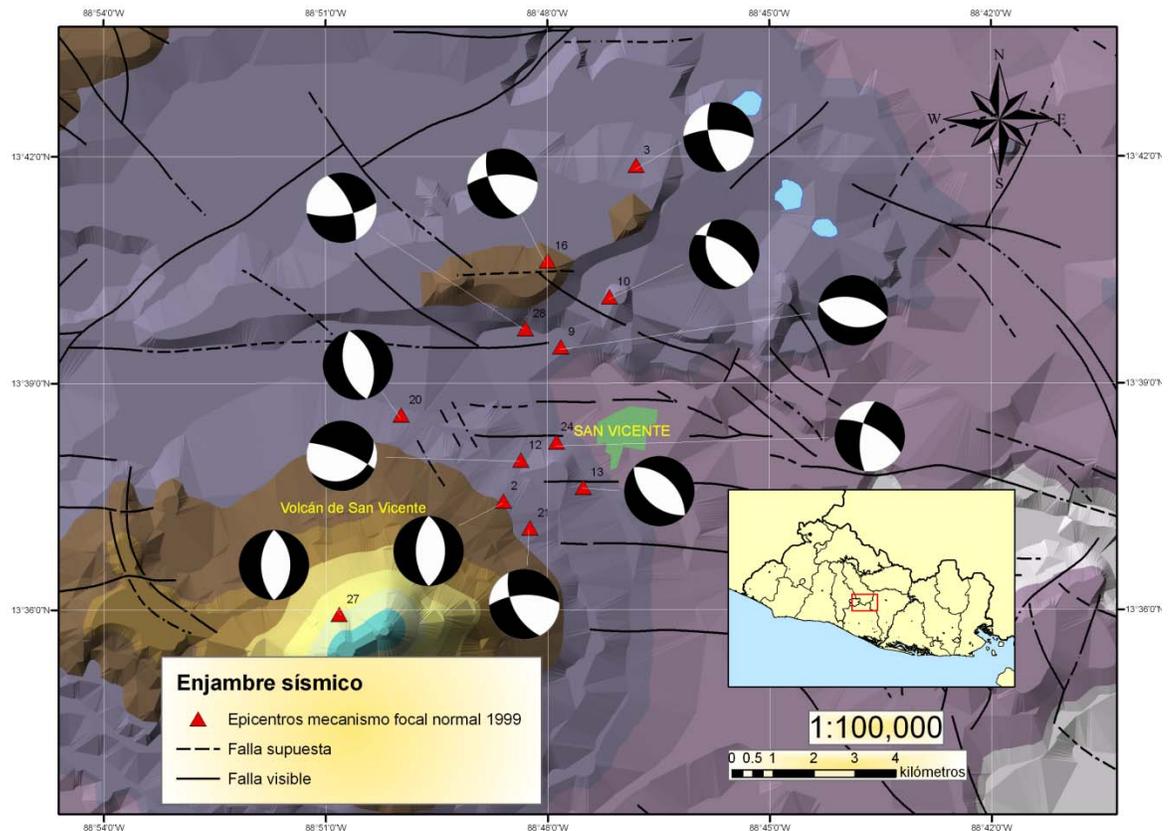


Figura 3-17. Mecanismo focal para los eventos comprendidos entre el 17 de marzo y 2 de mayo con el sistema de fallas local

Para compensar el problema de la poca cobertura acimutal, se calculó el mecanismo focal compuesto de los eventos con similar mecanismo focal simple. Solo 21 eventos sísmicos se pudieron utilizar para el cálculo del mecanismo focal compuesto.

Se obtuvieron 3 mecanismos focales compuesto de desgarre (ver Figura 3-18). Lo que resultó interesante es que dos de estos se obtuvieron de mecanismos focales simples de tipo normal. Los 3 mecanismos son dextrales con orientación E-O, uno con componente inversa y los otros dos con componente normal (Ver Anexo 5). Por lo que el origen de estos sismos se debe muy probablemente al sistema de falla ZFES.

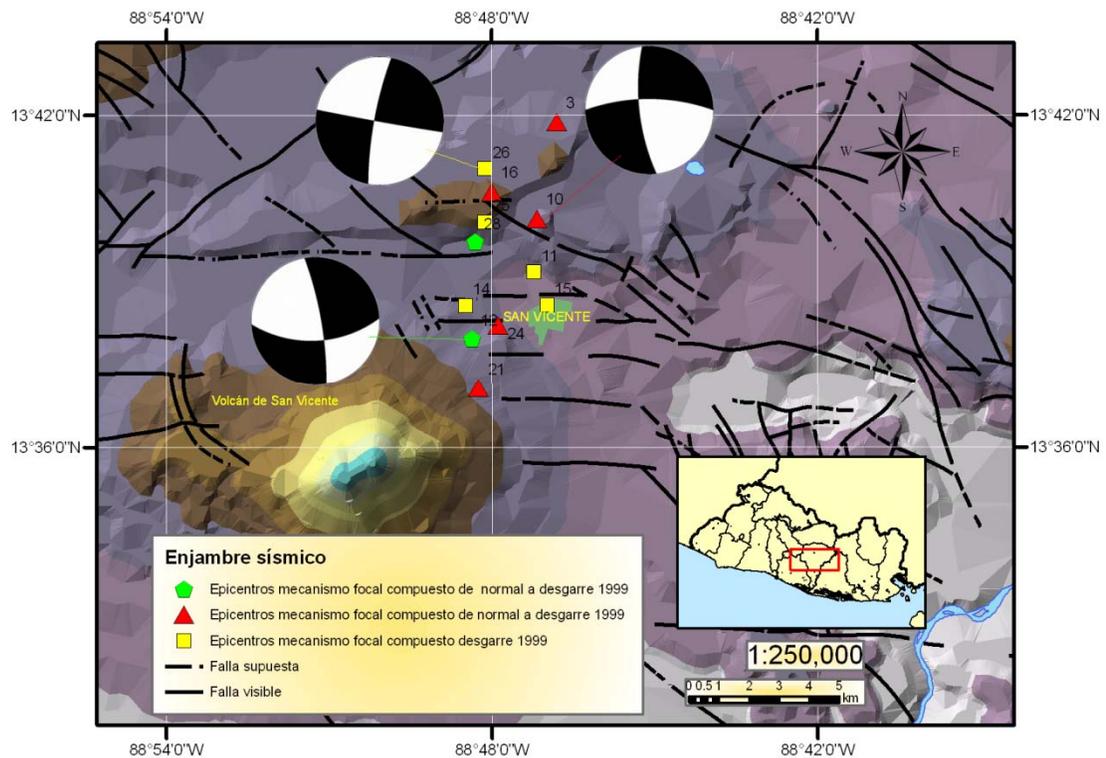


Figura 3-18. Mecanismos focales compuestos de desgarre calculados a partir de los sismos con similar mecanismo focal simple para el enjambre de 1999.

Respecto a los mecanismos focales compuestos normales (ver Figura 3-19) se obtuvieron 2. Un mecanismo con orientación ONO-ESE y de alto ángulo de buzamiento. El mecanismo fue normal puro con una orientación NNO-SSE (ver Anexo 5). Estos resultados están de acuerdo a los reportados por Corti et al. (2005) para este tipo de falla en la zona.

Finalmente se obtuvieron tres mecanismos focales simples de tipo inversos (ver Figura 3-20) los cuales no se pueden explicar con el sistema de fallas reportados hasta el momento. Sin embargo Jiménez (2005) y Méndez & Portillo (2006) han encontrado mecanismos de este tipo para el occidente y centro del país respectivamente, aunque las autoras no destacaron, ni explicaron este punto. Posiblemente estos resultados podrían ser producto de la poca cobertura acimutal en el registro de los eventos sísmicos.

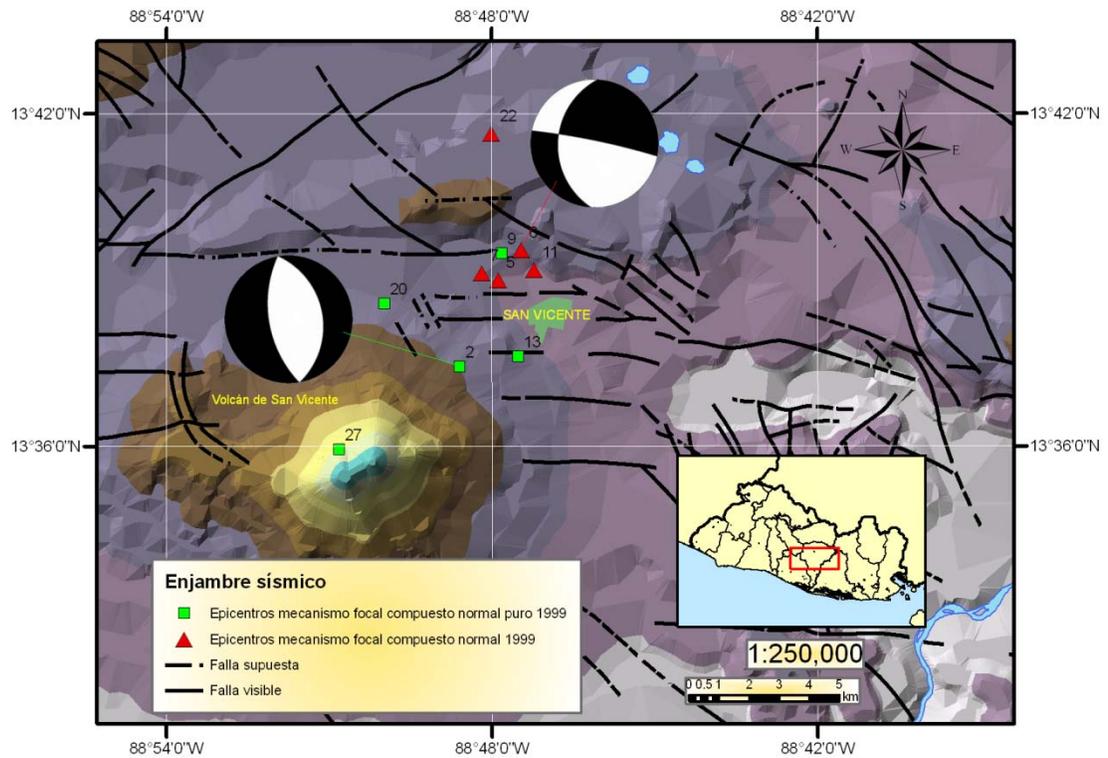


Figura 3-19. Mecanismos focales compuestos normales calculados a partir de los sismos con similar mecanismo focal simple para el enjambre de 1999.

Específicamente para la zona de San Vicente Canora Catalán (2010) reporta haber encontrado en la falla de desgarre ZFES una estructura de flor con componente inversa. Hasta el momento no se le ha dado la suficiente atención a este tipo de falla en la zona; pero según parece esta tiene una presencia importante, que debe ser investigada con más detalle en el futuro.

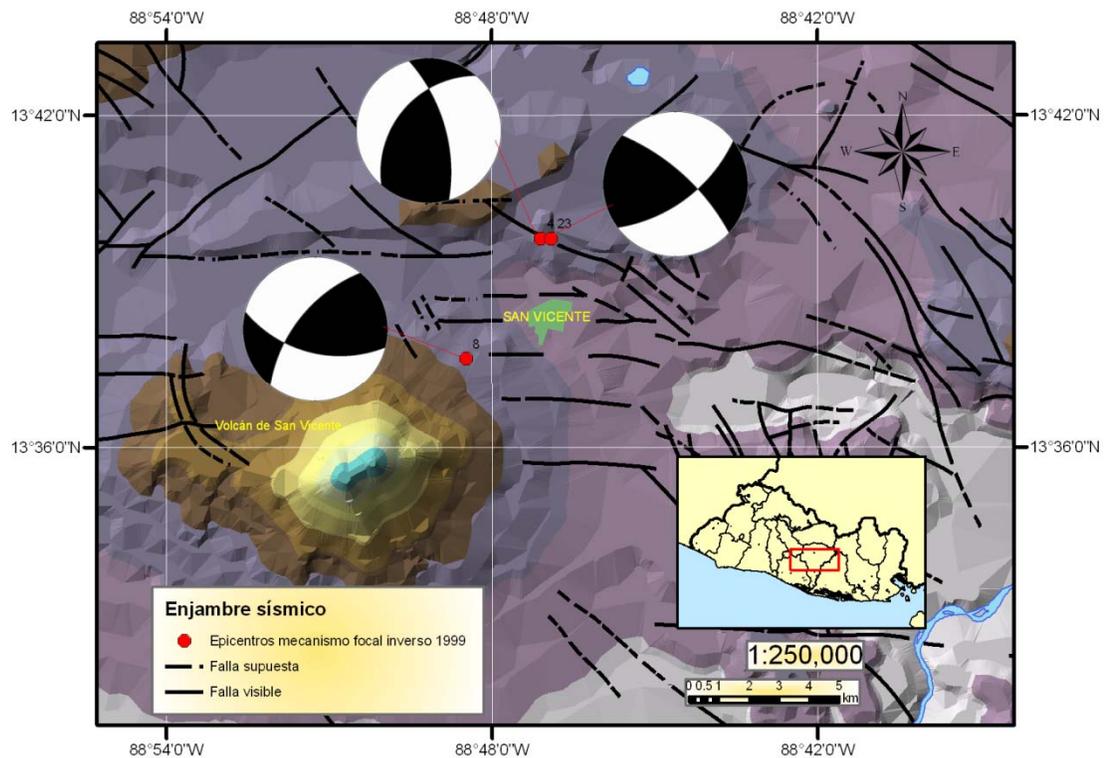


Figura 3-20. Mecanismo focal simple de tipo inverso calculados para los sismos con mejor cobertura del enjambre de 1999.

3.2.3 Mecanismo focal del enjambre sísmico de 2001

Los criterios de selección de los sismos para este enjambre fueron que el número de polaridades fuera mayor a o igual a 5. La profundidad no fuera superior a 40 km y la magnitud fuera mayor o igual que 2.5 Mc. Al aplicar estos criterios se tuvo un total de 40 sismos a los que pudo calcularse el mecanismo focal (ver Anexo 6 y Anexo 7)

De las 40 eventos a los que se les calculó el mecanismo focal simple se tiene que: 19 son de desgarre, 20 normales y 1 inverso como muestra la Tabla 3-2. Se observa que la mayoría de los mecanismos están en la zona C, mientras que en el enjambre de 1999 estaban en la zona B.

Tabla 3-2 Parámetros del mecanismo focal calculados para el enjambre sísmico de 2001

No.	STRIK	DIP	RAKE	STRIK	DIP	RAKE
				AUX	AUX	AUX
1	314	36	-30	69	73	-121
2	31	60	35	282	60	145
3	18	24	0	288	90	114
4	242	35	-23	351	76	-123
5	43	45	0	313	90	135
6	167	76	-26	264	64	-163
7	195	75	0	104	90	165
8	357	42	0	267	90	132
9	194	42	0	104	90	132
10	349	60	-34	98	60	-144
11	317	28	-89	136	62	-90
12	188	72	-20	284	70	-161
13	8	38	0	278	90	128
14	349	60	-34	98	60	-145
15	195	36	0	105	90	126
16	349	60	-34	98	60	-145
17	193	41	0	103	90	131
18	341	69	-64	109	32	-137
19	133	52	-72	287	41	-110
20	317	50	-38	74	61	-133

No.	STRIK	DIP	RAKE	STRIK	DIP	RAKE
				AUX	AUX	AUX
21	17	52	-19	120	74	-141
22	193	41	0	103	90	131
23	295	36	-70	92	56	-103
24	194	42	0	104	90	132
25	9	40	0	279	90	130
26	349	60	-34	98	60	-145
27	43	45	0	313	90	135
28	279	48	-89	99	42	-90
29	349	60	-34	98	60	-145
30	333	58	-17	73	74	-147
31	166	72	-12	259	78	-161
32	352	74	-36	93	54	-160
33	321	69	-36	66	55	-155
34	67	67	-61	193	36	-138
35	295	52	-72	89	41	-110
36	286	56	-89	106	34	-90
37	7	68	0	277	90	158
38	195	90	20	105	70	180
39	199	42	0	109	90	132
40	197	54	0	106	90	144

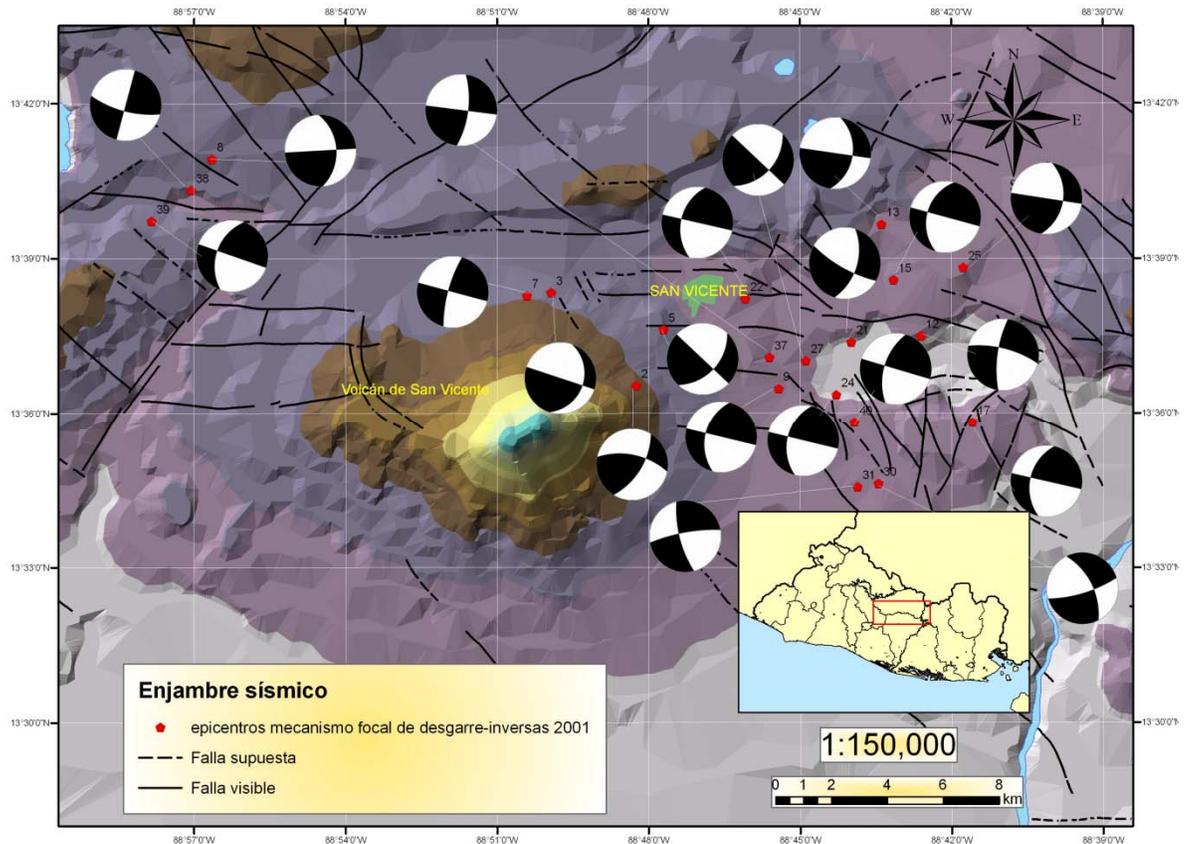


Figura 3-21. Principales sistemas de falla en el área de estudio junto con los mecanismo focal de desgarre e inverso (evento 2) para el enjambre sísmico de 2001. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones

Los mecanismos focales de desgarre calculados (ver Figura 3-21) son sinestrales con una orientación NNE-SSO, N-S y NE-SO en el plano de falla. Mientras que en el plano auxiliar son inversos con componente dextral y orientación ONO-ESE, E-O y ENE-OSO.

Para los mecanismos focales normales (ver Figura 3-22) se tiene que predominan, de mayor a menor, las de orientación NNO-SSE, NO-SE y ONO-ESE. En el plano de falla auxiliar la mayoría son de orientación E-O, ONO-ESE y ENE-OSO. Estos resultados muestran similitud con los mecanismos normales de 1999. Hay que observar que para el evento

principal del 13 de febrero, evento 1 en la Figura 3-22, no se pudo calcular un mecanismo focal adecuado con los datos proporcionados por la red telemétrica local.

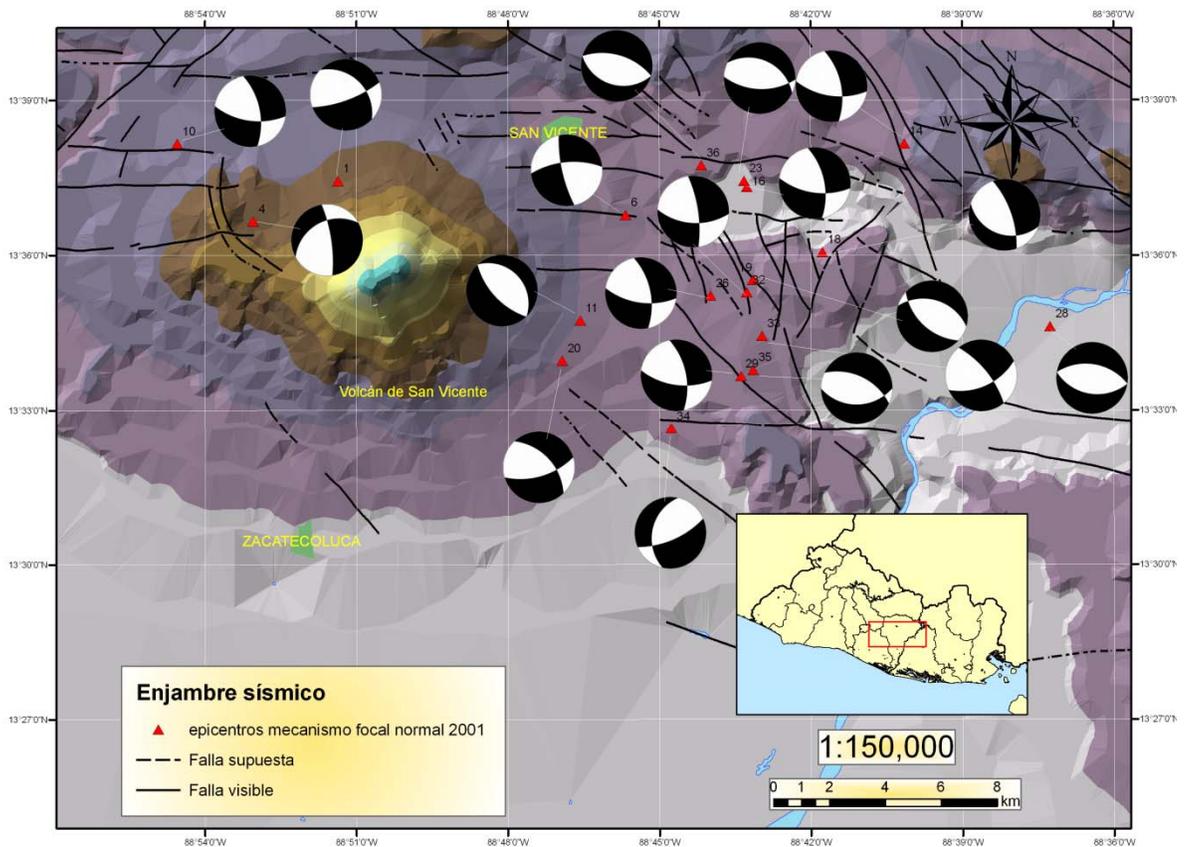


Figura 3-22. Mecanismos focales normales calculados para el enjambre sísmico de 2001. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones.

De los 40 sismos solo 27 se pudieron utilizar para el cálculo del mecanismo focal compuesto. De estos se obtuvieron 3 mecanismos normales y dos de desgarre (ver Anexo 8).

Los 3 mecanismos focales compuestos de tipo normal (ver Figura 3-23) están ubicados en la zona C de estudio con orientaciones NO-SE y NNO-SSE y buzamiento de alto ángulo. Esto esta de acuerdo con las fallas normales reportadas por Álvarez-Gómez et al (2006) para la parte oriental de la ZFES.

El otro mecanismo calculado para la zona C es de desgarre (ver Figura 3-24) con sentido de movimiento dextral, orientación E-O y buzamiento de alto ángulo. Este mecanismo corresponde al de ZFES, ubicada al norte de la ciudad de San Vicente.

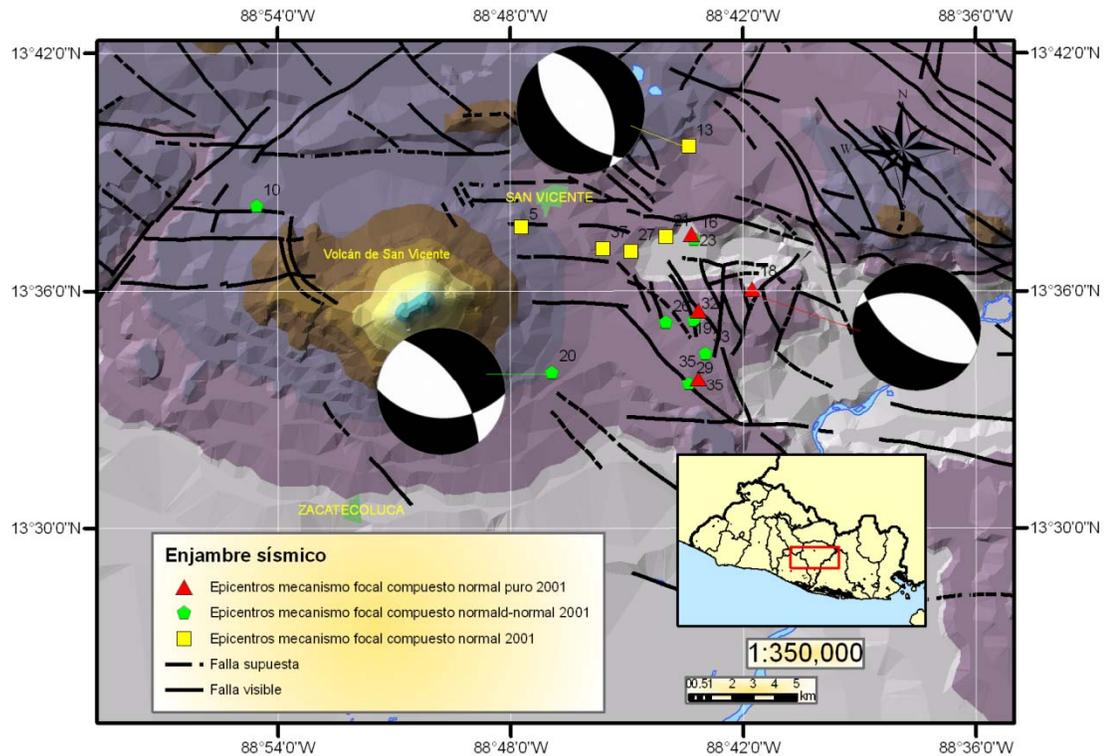


Figura 3-23. Mecanismos focales compuestos normales calculados para el enjambre sísmico de 2001. Se observa que la mayoría de sismos están ubicados en la zona C de estudio. En el diagrama del mecanismo focal la parte blanca son dilataciones y la negra compresiones.

Para la zona A se calculó un mecanismo focal compuesto de desgarre puro (ver Figura 3-25) con orientación E-O y buzamiento de alto ángulo. Este al igual que el mecanismo anterior corresponde a la falla ZFES. Para el cálculo del mecanismo se tomaron los 3 mecanismos focales simples encontrados en la zona y además se incluyeron 7 sismos adicionales. Los criterios de selección de estos sismos fueron que tuvieran más de 5 polaridades, con una magnitud comprendida entre 2.5 M_c y 4.5 M_c y que fueran de origen tectónico.

Si comparamos este mecanismo con el obtenido para el enjambre de 1997 en la misma zona; se observa que coinciden en el acimut y con el buzamiento de alto ángulo. La diferencia esta en el ángulo de desplazamiento, ya que para el de 1997 se tiene una componente inversa, mientras que para el de 2001 el mecanismo es de desgarre puro.

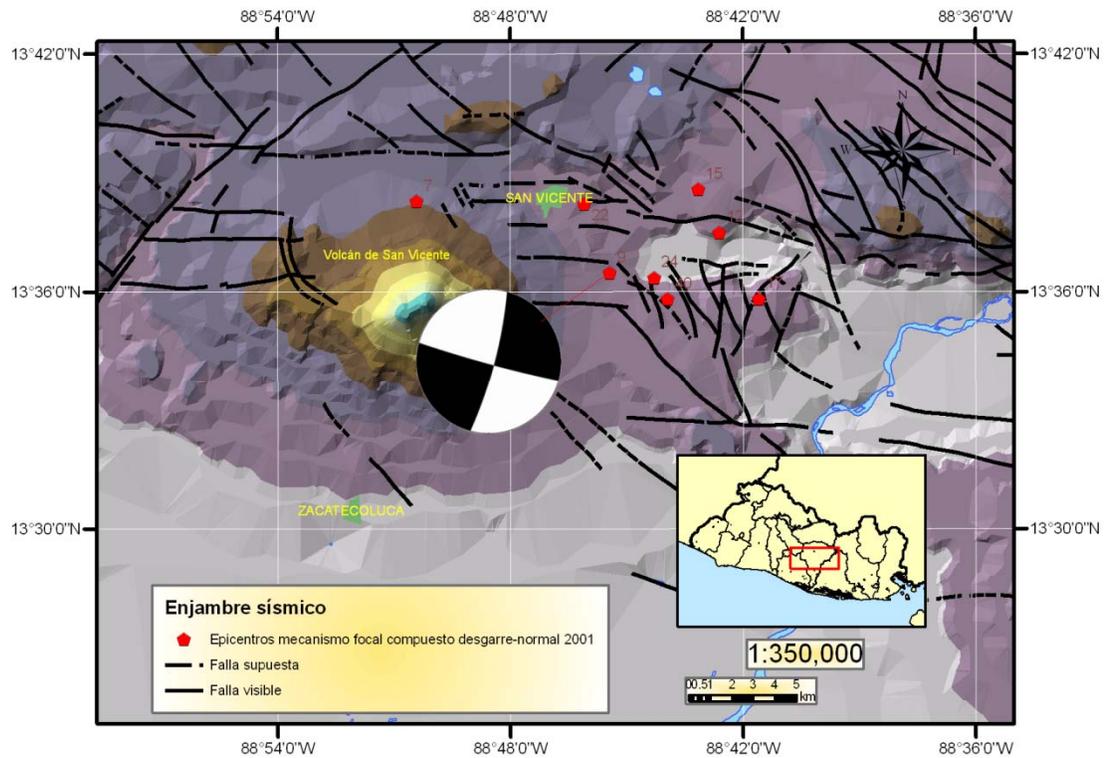


Figura 3-24. Mecanismo focal compuesto calculado para la zona C del enjambre sísmico de 2001. Se observa que la mayoría de sismos están ubicados en la zona C de estudio.

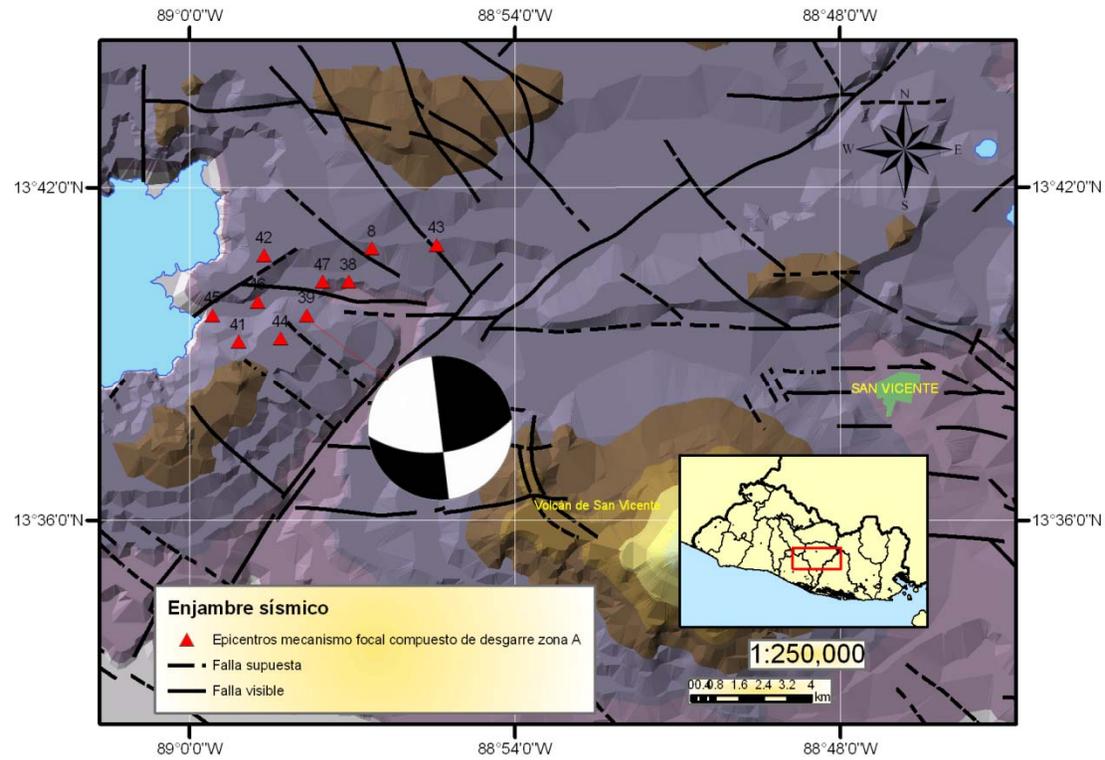


Figura 3-25. Mecanismo focal compuesto de desgarre calculado para la zona A del enjambre sísmico de 2001. Se observa que los epicentros de los sismos están ubicados a lo largo de la ZFES.

3.2.4 Mecanismo focal compuesto de enjambre sísmico de 2007 a 2008

Para el enjambre sísmico de 2007 a 2008 los criterios de selección fueron que la profundidad fuera menor a los 16 km y que el número de polaridades fuera mayor o igual a 3. Con estos criterios solo 6 sismos (ver Anexo 9) cumplieron estas condiciones obteniéndose la solución mostrada en la Figura 3-26.

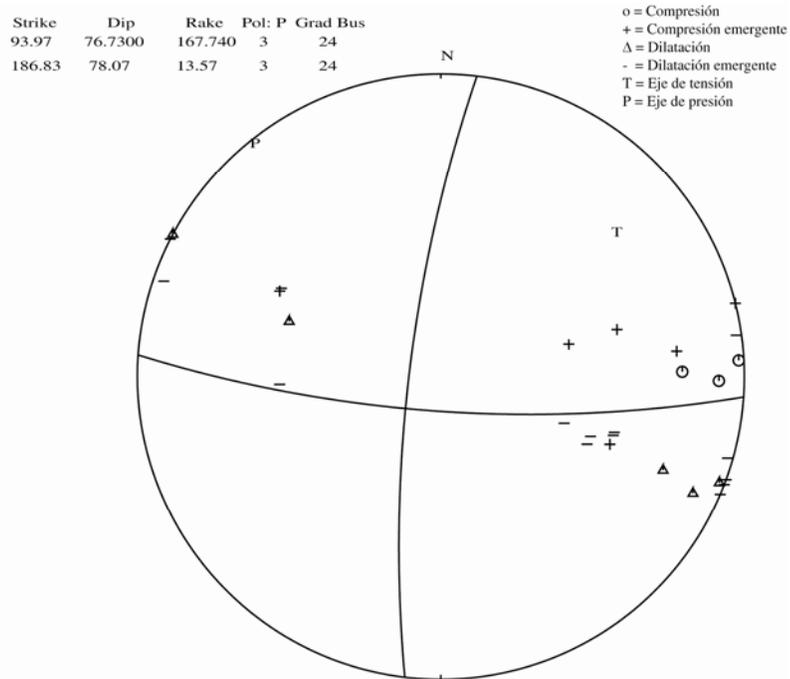


Figura 3-26. Mecanismo focal para el enjambre sísmico de 2007-2008

La solución obtenida es un mecanismo focal compuesto de desgarre con acimut de 93.97° , buzamiento de 76.73° y ángulo de desplazamiento de 167.74° . El mecanismo focal compuesto (ver Figura 3-27) con orientación E-O es dextral, con buzamiento de alto ángulo y cierta componente inversa. Esta solución también corresponde a la falla ZFES, con la excepción que la componente es inversa y no normal como se esperaría.

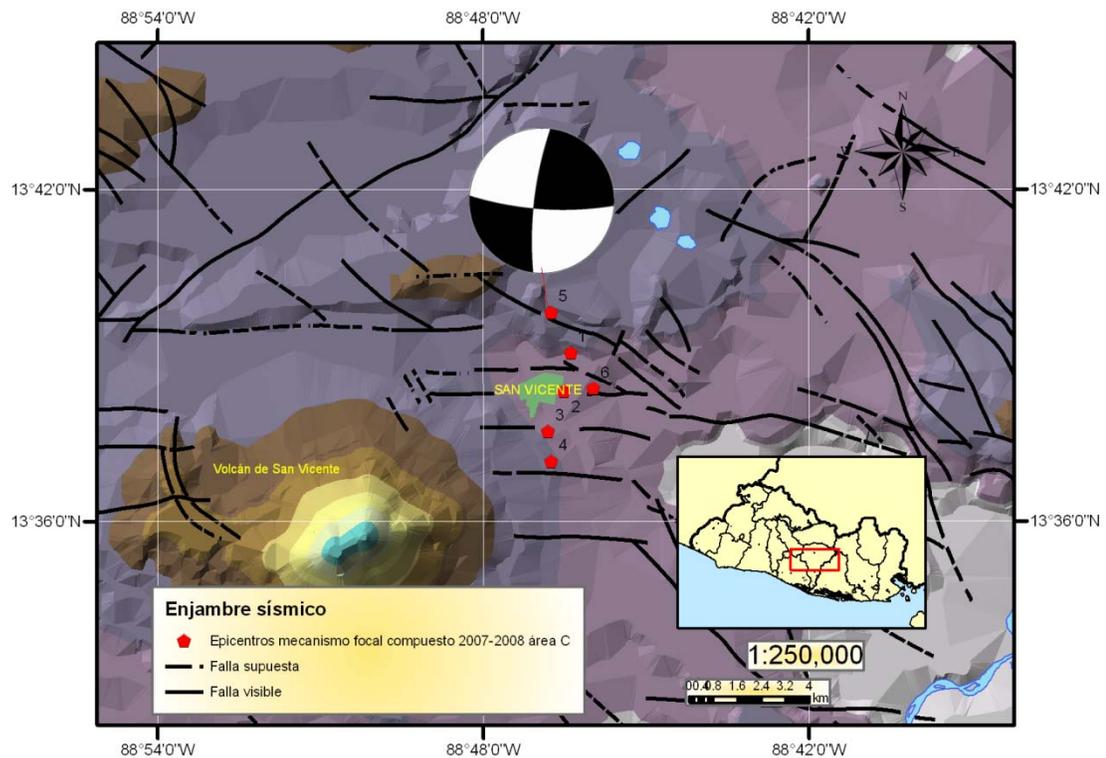


Figura 3-27. Mecanismos focal compuesto de desgarre para el enjambre de 2007-2008 en el área C.

3.3 Calculo de la relación frecuencia-magnitud para la zona de estudio

Un parámetro importante al momento de hacer una descripción de la sismotectónica de una región es la relación Gutenberg-Richter, ya que esta última da una idea del comportamiento de la resistencia del material que conforma la región de estudio. Además es un criterio importante para estudios de amenaza sísmica (Climent et al., 2008; Bendito et al., 2002; Zamudio Díaz, 2003).

Ya que la mayoría de los sismos son de magnitud pequeña e intermedia, lo cual puede verse en los tipos de magnitud de los eventos sísmicos (ver Tabla 3-3), se utilizó únicamente la magnitud coda para el análisis de la relación Gutenberg-Richter.

Tabla 3-3. Distribución de los diferentes tipos de magnitudes para toda la sismicidad estudiada.

Tipo de magnitud	No. de sismos
Mw	9
Mb	23
Ml	59
Mc	1997

Los valores obtenidos para a y b con los sismos del enjambre de 1997 dieron un valor de 2.63 y 0.85 respectivamente (ver Figura 3-28). Los trabajos de Takuo & Setsuro (2002), Sebastian & Tomas (2003) y Morán (1989) han reportado valores inferiores a la unidad para enjambres sísmicos. Sin embargo este valor, inferior a la unidad para b -value, se puede explicar como una consecuencia del número pequeño de sismos, 88 en total, registrados con Mc en el enjambre sísmico y no como un valor representativo de la sismicidad de la región.

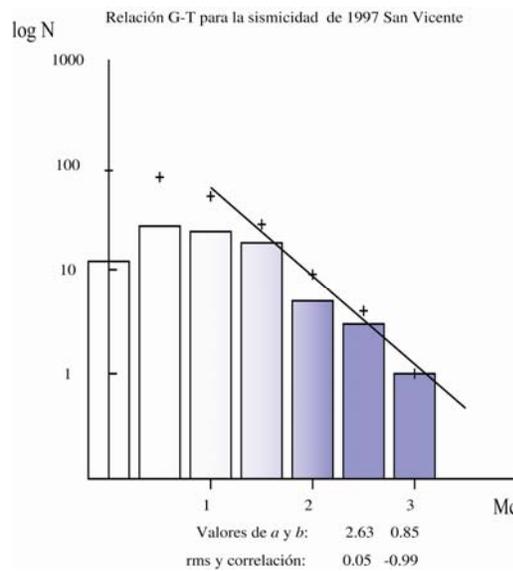


Figura 3-28. Relación frecuencia-magnitud para el enjambre sísmico de 1997.

Para el enjambre de 1999 el valor obtenido para fue $b=1.64$ (ver Figura 3-29). Este es un valor esperado para un enjambre sísmico, en el cual se utilizaron 504 eventos sísmicos.

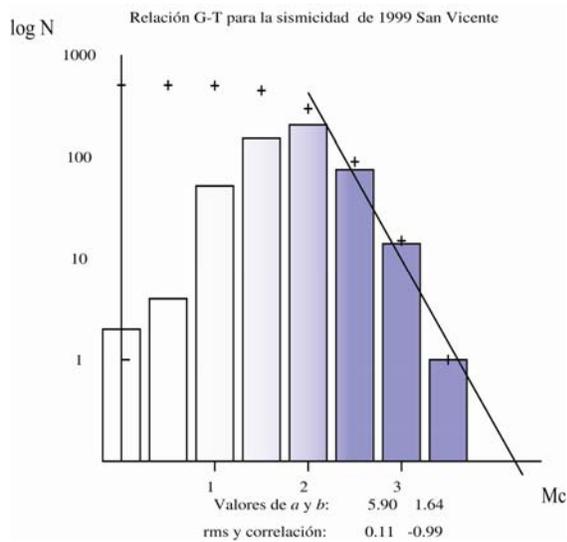


Figura 3-29. Relación frecuencia-magnitud para el enjambre sísmico de 1999

En 2001 se tuvo el enjambre sísmico con el mayor número de eventos, un total de 1 350. Los valores calculados para a y b (ver Figura 3-30) son de 7.64 y 1.69 respectivamente. Este valor superior a la unidad para b -value es característico de este tipo de sismicidad y muestra como se liberó la energía en la región después de los dos eventos principales de enero y febrero ocurridos en este año. Este valor difiere con el encontrado por Benito et al. (2004), el cual fue de $b=1.1$, aunque el autor no aclarará el tipo de magnitud utilizado.

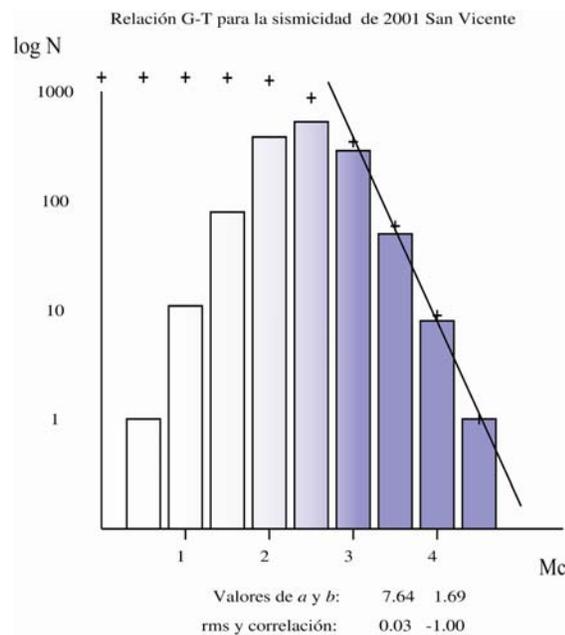


Figura 3-30. Relación frecuencia-magnitud para el enjambre sísmico de 2001

Para el enjambre sísmico de 2007-2008 (ver Figura 3-31) se tiene un valor de $b=1.09$. Este valor cercano a uno, está dentro del rango de valores reportados para sismicidad alrededor del mundo (Udías & Mezcúa-Rodríguez, 1996) y concuerda con los reportados para catálogos más completos en la región de Centroamérica (Frez & Gámez, 2008) y para otros enjambres en El Salvador (Jiménez, 2005); aunque difiere con los otros valores obtenidos en este trabajo.

Finalmente se hizo el ajuste para todos los enjambres sísmicos juntos (ver Figura 3-32) y así poder evaluar el comportamiento de la zona en un periodo de 10 años. Se utilizaron un total de 1 997 sismos, con los que se obtuvo un ajuste de a y b de 7.71 y 1.70 respectivamente. Estos resultados concuerdan con los calculados para los dos enjambres con mayor cantidad de sismos en 1997 y 2001.

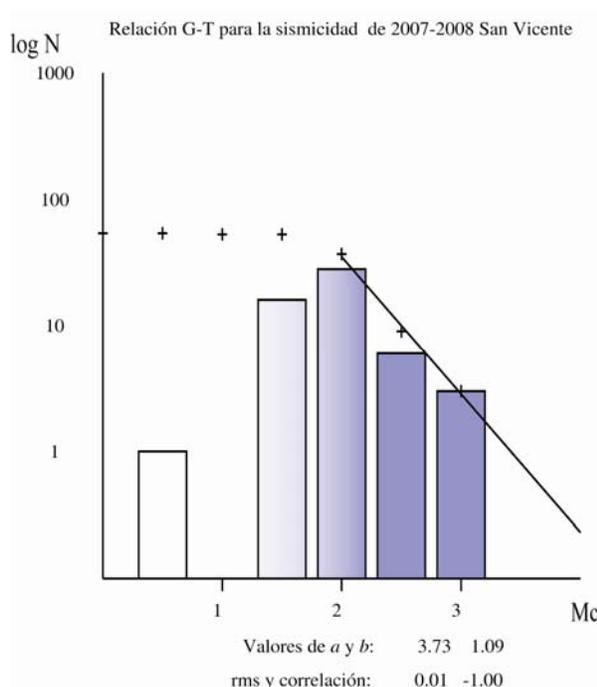


Figura 3-31. Relación frecuencia-magnitud para el enjambre sísmico de 2007-2008

Un parámetro importante que se puede tener del ajuste según Bendito et al. (2002) es la magnitud de completitud o magnitud mínima de reporte homogéneo durante determinado periodo de tiempo. Para el ajuste de todo el periodo de estudio se tiene un valor de 2.7 Mc. Este valor refleja la magnitud a partir de la cual la red telemétrica registra de forma adecuada los sismos en la región.

El valor alto de b -value indica que zona de estudio tiene niveles de acumulación de esfuerzos bajos, ya que estos se van liberando lentamente con el tiempo.

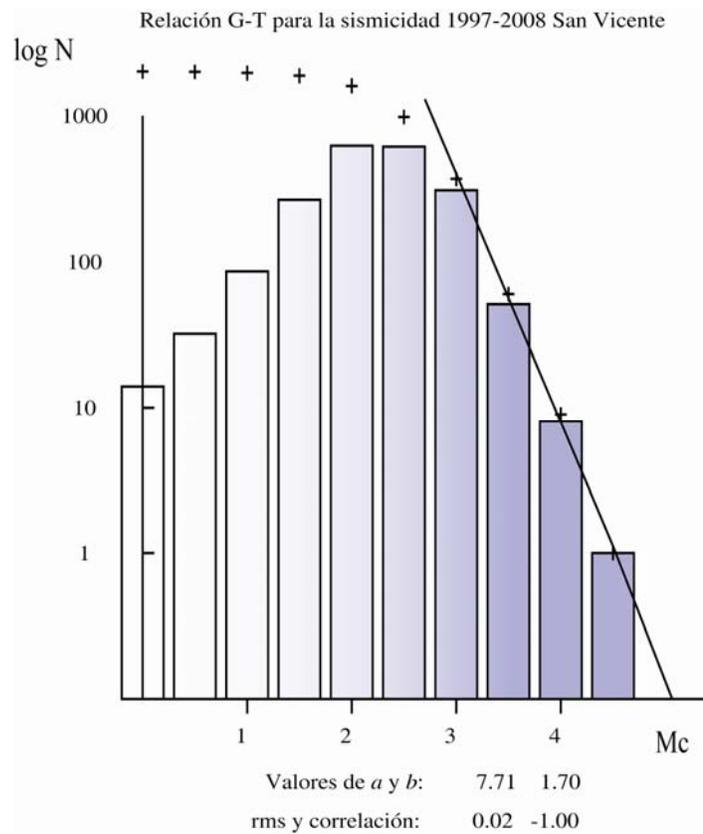


Figura 3-32. Relación frecuencia-magnitud para la totalidad de la sismicidad de 1997 a 2008.

3.4 Análisis poblacional de fallas para el área de San Vicente

El método de diedros rectos identifica los campos compatibles de extensión y compresión para un conjunto de mecanismos focales (Martín Velázquez et al., 1998). Para el presente estudio solo se utilizaron los mecanismos de los enjambres sísmicos de 1999 y 2001, ya que estos disponen de un buen número de mecanismos focales.

Para el enjambre de 1999 se identificaron dos regímenes de esfuerzos. El primero es el correspondiente a las fallas de desgarre y el segundo al de fallas normales. Al aplicar el método de diedros rectos utilizando estas dos poblaciones de mecanismos focales se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 3-33.

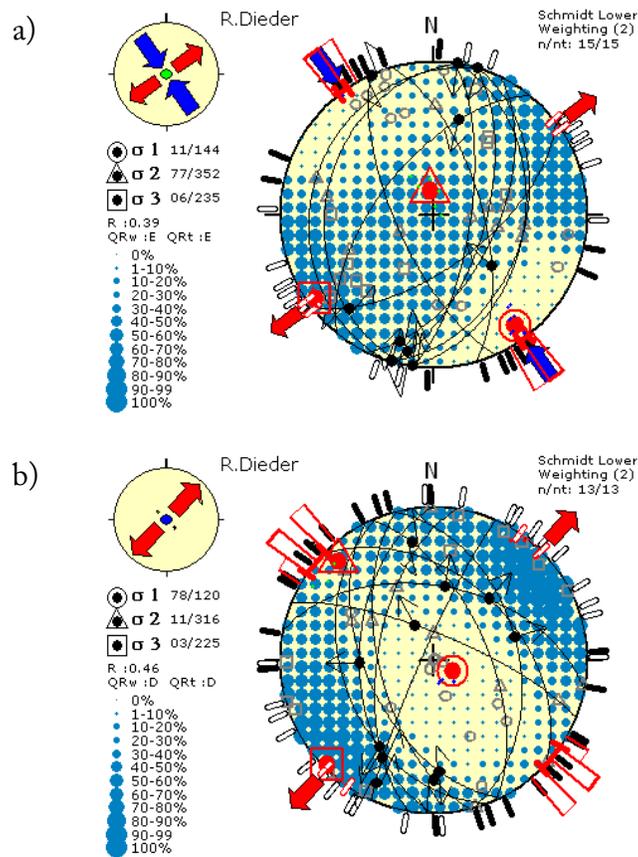


Figura 3-33. Proyección estereográfica equiarial (hemisferio inferior) de los estados de esfuerzo por el método de diedros rectos para el enjambre de 1999. Las flechas rojas indican el eje horizontal de esfuerzos mínimo (S_{Hmin}) y las azules el eje horizontal de esfuerzos máximo (S_{Hmax}) a) Proyección estereográfica que ajusta los mecanismos de desgarre y determina la dirección de esfuerzos b) Proyección estereográfica que ajusta los mecanismos normales y determina la dirección de esfuerzos. Gráficas hechas con el software WIN TENSOR.

Según muestra el ajuste por diedros rectos se tiene un régimen de esfuerzos de desgarre con un eje horizontal de esfuerzos máximo (S_{Hmax}) y mínimo (S_{Hmin}) con orientación NO-SE y NE-SO respectivamente. El régimen de esfuerzos normal presenta un S_{Hmin} con orientación NE-SO. Se observa que para ambos regímenes, el esfuerzo mínimo (σ_3) presenta una dirección similar.

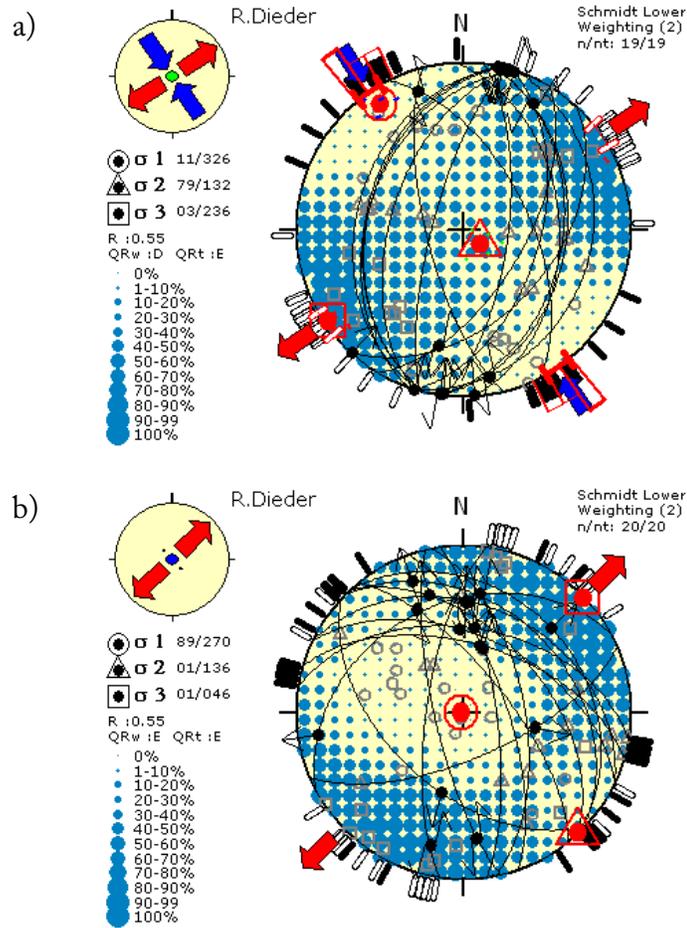


Figura 3-34. Proyección estereográfica equiarial (hemisferio inferior) de los estados de esfuerzo por el método de diedros rectos para el enjambre de 2001 a) Proyección estereográfica que ajusta los mecanismos de desgarre b) Proyección estereográfica que ajusta los mecanismos normales. Gráficas hechas con el software WIN TENSOR.

De igual forma para el enjambre de 2001 se encontraron dos regimenes de esfuerzos del mismo tipo que para el de 1999. El ajuste por diedros rectos (ver Figura 3-34) muestra un regimen de esfuerzos de desgarre y normal. Las orientaciones de S_{Hmax} y S_{Hmin} son NNO-SSE y ENE-OSO respectivamente. El campo de esfuerzos concuerda con los entrados por Canora Catalán (2010) y Corti et al. (2005) en la zona de San Vicente. Por lo que estos resultados sugieren un campo de esfuerzos predominantemente transtensional con ligeras

diferencias para la zona B y C de estudio como se observa en la Figura 3-35. Esto puede deberse probablemente al ligeros cambios de dirección en ZFES.

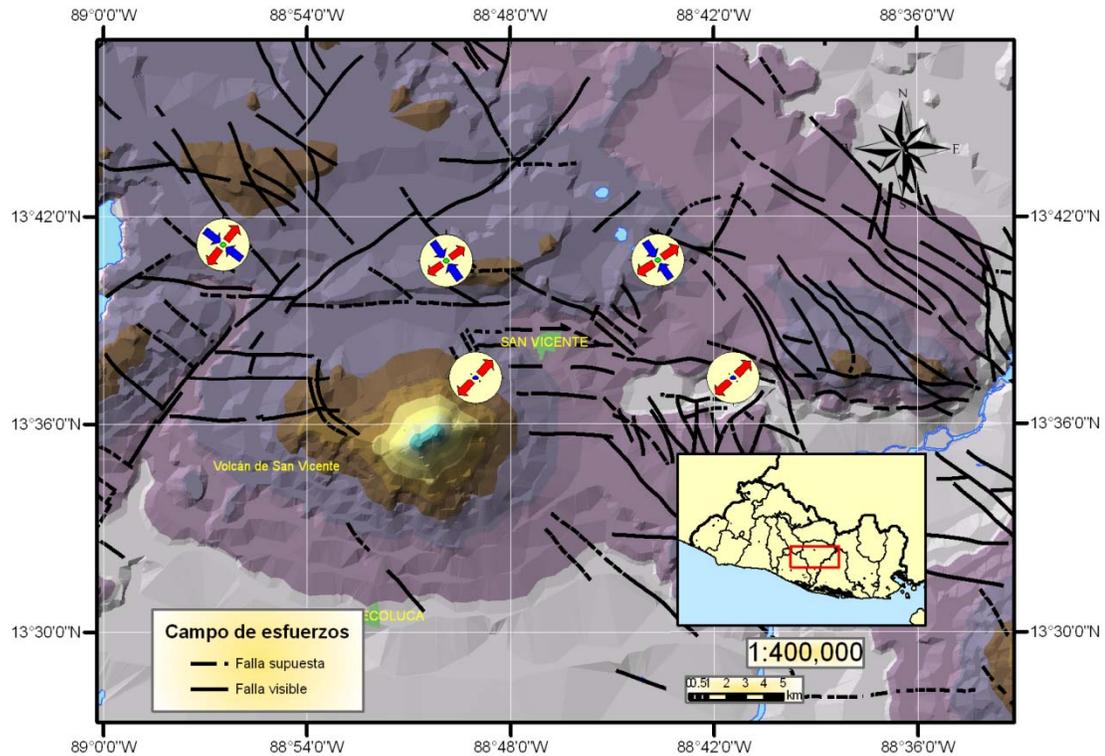


Figura 3-35. Orientación de los ejes principales de esfuerzos para el área de San Vicente a partir de los mecanismos focales calculados en el presente estudio. Las flechas azules indican la dirección de S_{Hmax} y las rojas la dirección de S_{Hmin} .

Para el área A no se pudo aplicar el método de diedros rectos ya que solo se dispone de dos mecanismos focales (el de 1997 y 2001). Sin embargo para tener un indicio de los esfuerzos en esta zona se utilizó la orientación de los ejes P y T de los dos mecanismos focales y se obtuvo el resultado mostrado en la figura 3-36. Las orientaciones de S_{Hmax} y S_{Hmin} son NO-SE y NE-SO respectivamente y están de acuerdo a los resultados encontrados en las otras dos áreas.

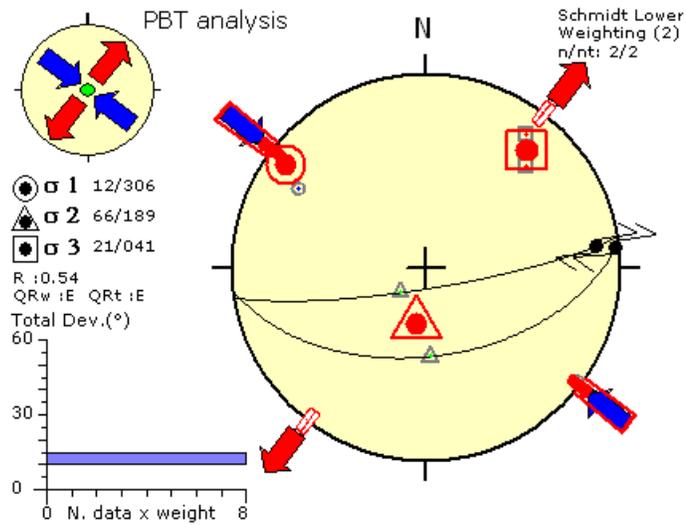


Figura 3-36. Análisis PBT para los mecanismos focales en el área A con los que se determinaron las orientaciones de los esfuerzos para esta zona.

Estos resultados muestran similitud con los obtenidos aplicando el método de mecanismo focal compuesto. Ambos dan como resultado mecanismos de desgarre y normales, aunque difieran en los parámetros específicos.

Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

La zona de San Vicente es una de las que presenta más actividad sísmica en El Salvador: En los últimos años ha sido objeto de varios estudios importantes, principalmente después de los eventos de enero y febrero de 2001. A continuación se exponen las principales conclusiones que se deducen de los resultados de esta investigación.

En el área A de la zona de San Vicente se observa que la responsable de la sismicidad es una falla de desgarre dextral que concuerda con la Zona de Falla de El Salvador (ZFES) con orientación E-O. Hay que notar que las soluciones encontradas tienen una componente inversa y no normal como la del sismo de febrero de 2001. La sismicidad en el área es de carácter cortical, ya que la profundidad oscila entre los 4 y 15 km. Debido al rango de magnitudes los eventos sísmicos se ubican dentro de la categoría de microtemblores.

El área B presenta mecanismos focales de desgarre y normales con planos de falla orientados de NNE-SSO a ONO-ESE. Las profundidades de los eventos son de tipo superficial con una mayor frecuencia entre los 5 y 15 km. Los mecanismos focales compuestos de desgarre son dextrales con orientación E-O, lo que sugiere que corresponden a la ZFES. Los mecanismos focales compuestos normales tienen orientación ONO-ESE y NNO-SSE y un alto ángulo de buzamiento. Hay que destacar que para esta área se encontraron tres mecanismos focales simples inversos. También es importante la componente inversa que apareció en varios mecanismos de desgarre.

El área C presenta una sismicidad de carácter superficial con predominancia de microtemblores, aunque hay que destacar que en esta área se dio el mayor número de eventos sísmicos con magnitudes superiores a 3.5 Mc. De manera similar al área B presenta mecanismos focales de desgarre y normales. Los de tipo normal tienen una orientación NNO-SSE y NO-SE y buzamiento de alto ángulo. Los mecanismos de desgarre son dextrales con orientación E-O y se debe a la misma fuente que en las otras dos áreas.

El método de mecanismo focal compuesto puede resultar más efectivo si primero se calculan mecanismos focales simples. A partir de los mecanismos que presentan semejanza, y están en una misma área, se calculan los compuestos. Esto se ha mostrado en los resultados de la presente investigación.

De los mecanismos focales calculados y aplicando el método de diedros rectos se sugiere un campo de esfuerzos predominantemente transtensional. Las orientaciones de S_{Hmax} y S_{Hmin} son NO-SE y NE-SO respectivamente. Estos resultados muestran concordancia con los del mecanismo focal compuesto sobre el régimen tectónico en la región.

A partir de los resultados del *b-value*, de 0.85 a 1.70, se puede concluir que la zona de San Vicente tiene bajos niveles de acumulación de esfuerzos, cuya energía se libera lentamente como enjambres sísmicos. La magnitud de completitud para la región es de 2.7 Mc.

El *b-value* muestra un valor estable para los enjambres con mayor número de eventos, con promedio (1.68 ± 0.03), lo que sugiere que se necesita un buen catálogo para su cálculo. Por lo que se debe tener una buena cantidad de sismos para obtener un valor confiable de *b-value*. Esto quedó evidenciado en el enjambre de 1997 donde se encontró un valor pequeño de *b-value* y donde se esperaba un valor mayor. En contraste los enjambres con más eventos mostraron unos resultados más acordes con este tipo de sismicidad.

Para finalizar se dan algunas recomendaciones que convendría tomar en cuenta para futuros estudios de la zona.

- Realizar trabajos de campo para verificar los resultados obtenidos en el presente estudio. Sería importante ver en el campo con más detalle las fallas presentes en el área, en especial la falla de desgarre con orientación E-O y las de tipo normal presentes principalmente en el área C.
- Es necesario un estudio de paleosismicidad y así poder hacer un mejor cálculo de *b-value* para la zona.

- Determinar de forma más precisa el régimen de esfuerzos en la zona. Para esto se necesita un estudio de geología estructural y así poder realizar análisis poblacional de fallas, contrastándolas con el de mecanismos focales. Además se debe aplicar otros métodos, aparte del de diedros rectos, donde se determine, de manera confiable, el factor de forma R .
- Investigar la relación entre el rango de profundidad de mayor frecuencia en eventos sísmicos de los enjambres con la cámara magmática del volcán de San Vicente.
- Para los terremotos de mayor magnitud, calcular el momento sísmico escalar (M_0) y a partir de él, la magnitud momento (M_w). Para lo cual es necesario un análisis espectral de los sismogramas. Con esto se puede determinar las dimensiones de ruptura en la zona para los diferentes enjambres.
- Continuar con el estudio de los enjambres sísmicos en todo El Salvador y así conocer el comportamiento de las fallas locales activas en todo el país.
- Mejorar la red de monitoreo sísmico de la zona de San Vicente. Para esto habría que estudiar con más detalle la red telemétrica, especialmente en la parte norte de esta región donde presenta un GAP importante.

Referencias y Bibliografía¹

- Álvarez, A.I., 1999. Intesidad macrosísmica. *Física de la Tierra*, (11), pp.237-52.
- Álvarez-Gómez, J.A., 2008. Constraints from finite element modeling on the active tectonics of northern Central America and Middle America Trench. *Tectonics*, 27, pp.100-20.
- Álvarez-Gómez, J., Insua, J. & Capote, R., 2006. Evidencias morfotectónicas de actividad reciente de la zona de falla de El Salvador en el segmento Ilopango-San Vicente. *Geogaceta*, 39, pp.63-66.
- Angelier, J., 2009. Seismotectonics in Northeast India: a stress analysis of focal mechanism solutions of earthquakes and its kinematic implications. *Geophysic Journal International*, (178), pp.303-27.
- Bailey, I.W., 2009. Patterns of co-seismic strain computed from southern California focal mechanisms. *Geophysic Journal International*, (177), pp.1015-36.
- Bendito, A., Rivero, P. & Lobo Quintero, W., 2002. Variación espacio temporal de los parámetros de recurrencia sísmica en el occidente de Venezuela. *IMME*, 40(1), pp.1-14.
- Benito, B., Cepeda, J. & Martinez Dias, J., 2004. Analysis of the spacial and temporal distribution of the 2001 earthquakes in El Salvador. *Geological Society of America*, (375), pp.339-56.
- Biswas, S. & Majundar, R.K., 1988. Seismicity, b-values and focal depth distributions of earthquakes in the Andaman-Nicobar Island region. *Geofizika*, 5, pp.107-19.

¹ Estilo de referencia autor-año de Harvard-Anglia.

- Bommer, J., 2007. *Sismología para ingenieros*. San Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
- Bufo, E., 1994. Métodos para la determinación del mecanismo focal de los terremotos. *Física de la Tierra*, (6), pp.113-39.
- Bufo, E., 2006. Mecanismo focal y sismotectónica: aportación de Agustín Udías. *Física de la Tierra*, (18), pp.11-23.
- Bufo, E. & Udías, A., 2007. Sismicidad y Mecanismo Focal de los Terremotos de la Región Cabo de San Vicente-Argelia. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 3-4(20), pp.301-10.
- Canora Catalán, C., 2010. *Análisis sismotectónico, neotectónico y paleosísmico de la zona de falla de El Salvador, Centro América*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Casas Sainz, A.M., Gil Peña, L. & Simón Gómez, J.L., 1990. Los métodos de análisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: sistemática y técnicas de aplicación. *Estudios Geológicos*, (46), pp.385-98.
- Cepeda, J., M.B., B. & A., B.E., 2004. Strong-motion characteristics of January and February 2001 earthquakes in El Salvador. *Geological Society of America*, (special paper 375), pp.405-21.
- Chen, C.-C., 2006. A correlation between the b-value and the fractal dimension from the aftershock sequence of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Geophysical Journal International*, (167), p.1215–1219.
- Climent, Á., Rojas, W., Alvarado, G. & Benito, B., 2008. *Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica*. Proyecto Resis II.
- COEN, 2003. *Plan de mitigación y uso de tierras en San Vicente*. San Vicente.

- Corti, G., Carminati, E., Mazzarini, F. & Garcia, M.O., 2005. Active strike-slip faulting in El Salvador, Central America. *Geological Society of America*, 33(12), pp.989-92.
- de Vicente, G., Muñoz, A. & Giner, J.L., 1992. El uso del método de los diedros rectos: implicaciones a partir del modelo de deslizamiento del análisis poblacional de fallas. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 5(3-4), pp.7-20.
- de Vicente, G. & Muñoz-Martín, A., 2010. Análisis de esfuerzos tectónicos. Fallas y sismos. *REDUCA(Geología)*, 2(6), pp.53-91.
- Frez, J. & Gámez, E., 2008. Aspectos de la sismotectónica de Nicaragua y su alrededor. *GEOS*, 28(3).
- García-Cano, L.C., 2004. *Muestreo de la Actividad Sísmica en el Sector Honda-Puli, Valle Medio del Magdalena, Colombia*. II Congreso Colombiano de Sismología. Armenia.
- González E., M., 2005. Reporte de un enjambre sísmico de febrero-abril de 2004, en la bahía de la Paz, Baja California sur, México. *Geos*, 24(3), pp.451-56.
- Havskov, J. & Ottemöller, L., 2003. *SEISAN*. [Online] Available at: <http://seis.geus.net/software/seisan/seisan.pdf> [Accessed 11 septiembre 2010].
- Havskov, J. & Ottemöller, L., 2010. *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. primera ed. Bergen: Noruega.
- Hicks, E.C., 2000. Stress inversion of earthquake focal mechanism solutions from onshore and offshore Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 80, p.235-250.
- Huezo, C.M., 2004. *Sismos en El Salvador 1900-2001*. San Salvador: SNET.
- Jerrowld, E.M., 1983. *Mathematical foundations of elasticity*. Prentice-Hall.

- Jiménez, D., 2005. *Caracterización de los enjambres sísmicos ocurridos en abril y mayo de 2005 en la zona occidental de El Salvador*. Tesis de grado. Universidad de El Salvador.
- Kahraman, S., 2008. The Effect of Regional Borders when Using the Gutenberg-Richter Model, Case Study: Western Anatolia. *Pure applied geophys*, (165), p.331–347.
- Koiter, W.T., 1973. *Wave Propagation in elastic solid*. North Holland Publishing.
- Kraft, T., 2006. High-precision relocation and focal mechanism of the 2002 rain-triggered earthquake swarms at Mt Hochstaufen, SE Germany. *Geophysic Journal International*, 167, p.1513–1528.
- Lee, W.H.K. & Stewart, S.W., 1981. *Principles and Applications of Microearthquakes Networks*. Primera ed. New York: Academic press.
- Leet, J., 1992. *Fundamentos de geología física*. Limusa.
- Leonard, G., 2002. GIS as a tool for seismological data processing. *Pure and applied geophysics*, (159), pp.945-67.
- Lermo-Samaniego, J., 2006. Análisis de la actividad sísmica en el Volcán Popocatepetl (México) durante el periodo 1994-1997. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVIII(2), pp.253-57.
- Longwell, F., 1963. *Introdution to physical geology*. primera ed. Nueva York: John Wiley and sons.
- López, D.L.d., 1977. *Seismicity and eartquake focal mechanics solutions of the El Salvador*. Tesis.
- López-Fernández, C., 2004. Actividad sísmica en el noroeste de la Península Ibérica observada por la red sísmica local del proyecto GASPI(1999-2002). *Trabajos de Geología*, (24), pp.91-105.

- Luque Vergara, N.A., 2011. *Revisión del catálogo sísmico centroamericano en la región del punto triple Cocos-Nazca-Caribe*. Tesis de maestría. México: Universidad Autónoma de México.
- Mandal, P., 2005. Self-organized Fractal Seismicity and b Value of Aftershocks of the 2001 Bhuj Earthquake in Kutch (India). *Pure applied geophys*, (162), p.53–72.
- Maradiaga, R., 1989. Propagación de las ondas sísmicas en el campo cercano. *Física de la Tierra*, (1), pp.51-83.
- Maradiaga, R., 1994. Dinámica de la fuente sísmica. *Física de la Tierra*, (6), pp.29-72.
- Marroquin Parada, M.G., 1994. *Escalas de magnitud sísmica (Md y Ml) para El Salvador*. Tesis de grado. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Martín Velázquez, S., De Vicente, G., M. Rodríguez Pascua, A. & Calvo, J., 1998. Análisis dinámico del sistema de desgarre NO-SE del Prebético de Albacete. *Rev. Soc. Geol. España*, 11(3-4), pp.369-82.
- Martínez-Díaz, J., Alvarez-Gómez, J., Belén, B. & Hernández, D., 2004. Triggerin of destructive earthquakes in El Salvador. *Geology*, 32(1), pp.65-68.
- Méndez, L.M. & Portillo, A.M., 2006. *Determinación de los mecanismos focales de los sismos ocurridos entre el volcán de San Salvador y la caldera del lago de Ilopango en el periodo de 1994 a marzo de 2005*. Tesis. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Mogi, K., 1963. some discussions on after shocksm, foreshocks and Earthquake swarms. *Bulletin of Earthquake Research institute*, 41, pp.615-58.
- Montero, W. & Barahona, M., 2005. Los sistemas de falla Agua Caliente y río Azul y relevos compresivos asociados, Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (33), pp.7-27.

- Morán, G.N., 1989. *Evaluación de la amenaza sísmica para el área geotérmica de Berlín, El Salvador, América Central*. Tesis. San José, Costa Rica: Universidad Centroamericana de Geología.
- Moreno, V.A.H., 2002. Determinación de mecanismos focales para temblores pequeños o moderados: región del Caribe nororiental. *Geofísica Colombiana*, (6), pp.40-42.
- Mulibo, G., 2009. The 1994-1995 Manyara and Kwantoro Earthquake swarms. *South African journal of geology*, 112, pp.387-404.
- OPS, 2002. Terremotos en El Salvador, 2001. *Crónicas de desastres*, p.224.
- Ozel, N., 2003. Focal Mechanisms of Intermediate-depth Earthquakes Beneath Southeastern Hokkaido, Japan Implications of the Double Seismic Zone. *Pure and Applied Geophysics*, (160), p.2279-2299.
- Park, J.-C., 2007. Focal mechanisms of recent earthquakes in the Southern Korean Peninsula. *Geophysic Journal International*, (169), p.1103-1114.
- Pujol, J., 2003. *Elastic Wave Propagation and Generation in Seismology*. New York: Cambridge University.
- Qin, C., 2005. Nonlinear Analysis of the Frequency-magnitude Relationship in the Western Circum-Pacific Region. *Pure & applied Geophysics*, (162), pp.91-107.
- Quintana, S.M. & Ortega Pérez, E., 2008. LibroSIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental. Madrid, España: Los autores.
- Rivas, J.A., 1994. *Localización y determinación del mecanismo focal compuesto del enjambre sísmico ocurrido del 1 al 15 de julio de 1992 en la zona occidental de El Salvador C.A.* Tesis. San Salvador: Universidad de El Salvador.

Rodriguez, M., 2009. A GPS and modelling study of deformation in northern Central America. *Geophys Journal International*, pp.1733-54.

Rodríguez-Portugal, C., 2004. *Sismotectónica de Regiones Activas: Terremotos de profundidad intermedia en el Sur de España*. Tesis. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Roland, E., 2009. Earthquake swarms on transform faults. *Geophys. J. Int.*, 178, pp.1677-90.

Rose, I.R., Bommer, J. & López, D., 2004. Natural Hazards in El Salvador: Especial Paper. *The Geological Society of America*, (monográfico).

Sampieri, R., 1997. *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.

Sarup, J., 2006. Study of tectonics in relation to the seismic activity of the Dalvat area, Nasik District, Maharashtra, India using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12-14), p.2371-2387.

Schmedes, J., 2005. Moment release in the Lower Rhine Embayment, Germany: seismological perspective of the deformation process. *Geophysc Journal International*, (160), pp.901-09.

Sebastian, H. & Tomas, F., 2003. Indications for a successively triggered rupture growth underlying the 2000 earthquake swars in Vogtlan/NW-Bohemia. *Journal of Geophysical Research*, (30), pp.200-16.

Shearer, P.M., 2009. *Introduction to seismology*. New York: Cambrige University.

SNET, 2006. *SNET*. [Online] Available at: <http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas/> [Accessed 4 julio 2010].

SNET, 2008. *SNET*. [Online] Available at: <http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/enjambres+sismicos/ano+2008/enjambre+si+smico+en+san+vicente/> [Accessed 4 julio 2010].

SNET, 2010. *Cronología de sismos destructivos en El Salvador*. [Online] Available at: <http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas/> [Accessed 5 septiembre 2010].

SNET, 2011. *Vigilancia Sísmica*. [Online] Available at: <http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/vigilancia/> [Accessed 5 January 2011].

Snoke, J.A. & Munsey, J.W., 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV -P amplitude ratio data. *Earthquake Notes*, 55(3).

Takuo, S. & Setsuro, N., 2002. Swarm-like seismic activity in 1989, 1990 and 1997 preceding the 2000 Western Tottori Earthquake. *Earth Planets Space*, (54), pp.831-45.

Tshabulanda, J.T., 2007. *Mecanismos de terremotos de las zonas de Rift este de África: Terremoto del 5 de diciembre de 2005*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Udías, A., 1989. Parámetros del foco de los terremotos. *Física de la Tierra*, (1), pp.87-104.

Udías, A., 1994. Mecanismos de los terremotos: modelos cinemáticos. *Física de la Tierra*, (6), pp.11-27.

Udías, A., 1994. Parámetros de los terremotos. *Física de la tierra*, (6), pp.87-103.

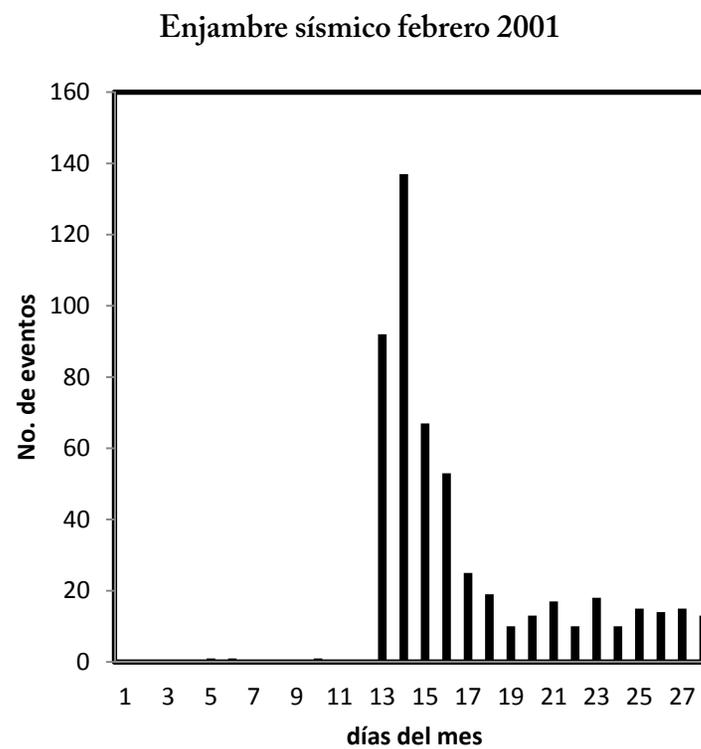
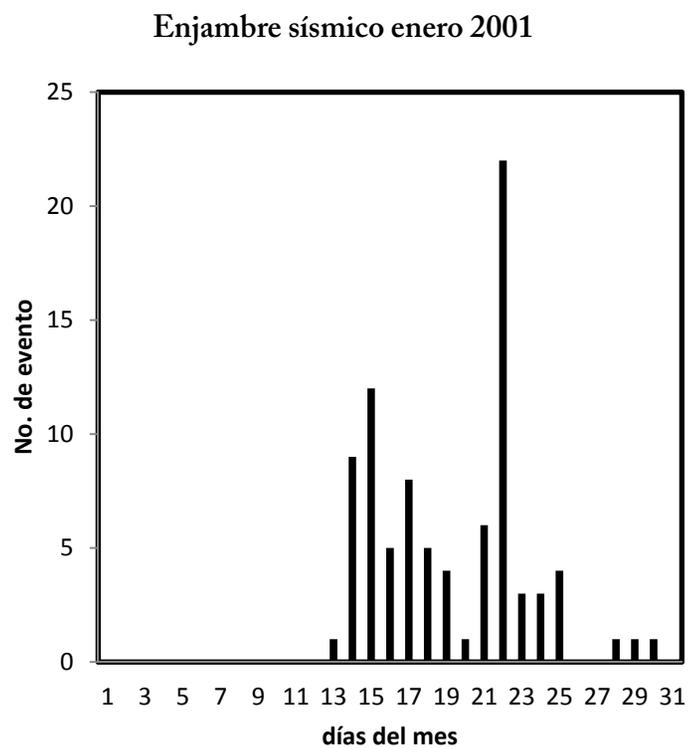
Udías, A., 1998. Introducción: sismicidad y sismotectónica de América Central y del Sur. *Física de la Tierra*, (8), pp.11-17.

Udías, A. & Mezcúa-Rodríguez, J., 1996. *Introducción a la sismología*. San Salvador: UCA editores.

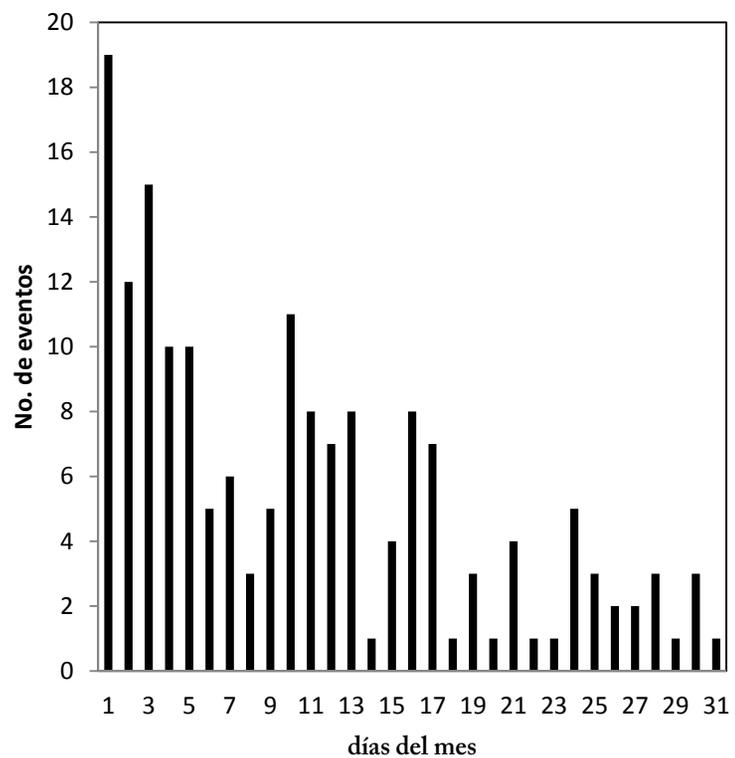
- Urtado, E.d.J.S., 2001. Implicaciones sismotectónicas de las soluciones del mecanismo focal en algunos terremotos de la región central de Colombia. *Geofísica Colombiana*, (5), pp.18-26.
- Vavrycuk, V., 2005. Focal mechanisms in anisotropic media. *Geophysic Journal International*, (161), pp.334-46.
- Waite, G.P., 2002. Seismic evidence for fluid migration accompanying subsidence of the Yellowstone caldera. *Journal of Geophysical Research*, 107(B9), pp.150-70.
- Walsh, D., 2009. A Bayesian approach to determining and parametrizing earthquake focal mechanisms. *Geophysic Journal International*, (176), p.235-255.
- Willian K. Mohanty, M.Y.W., 2008. First Order Seismic Microzonation of Haldia, Bengal Basin (India) Using a GIS Platform. *Pure and applied geophysic*, (165), pp.1325-50.
- Zamudio Díaz, Y.I., 2003. *Análisis de la sismicidad asociada al proceso de subducción en el Sur del Perú*. Tesis de grado. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Anexos

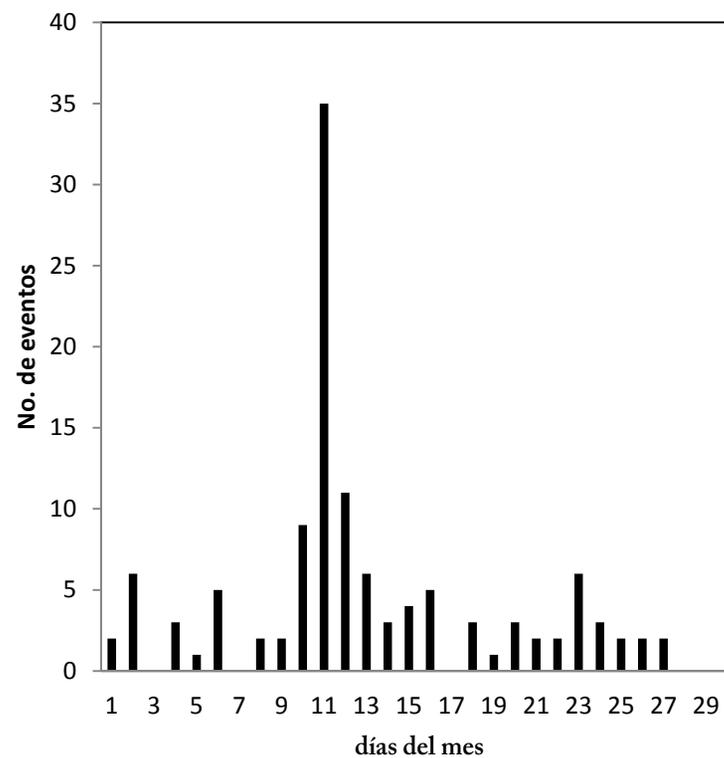
Anexo 1. Distribución temporal de la sismicidad del enjambre de 2001



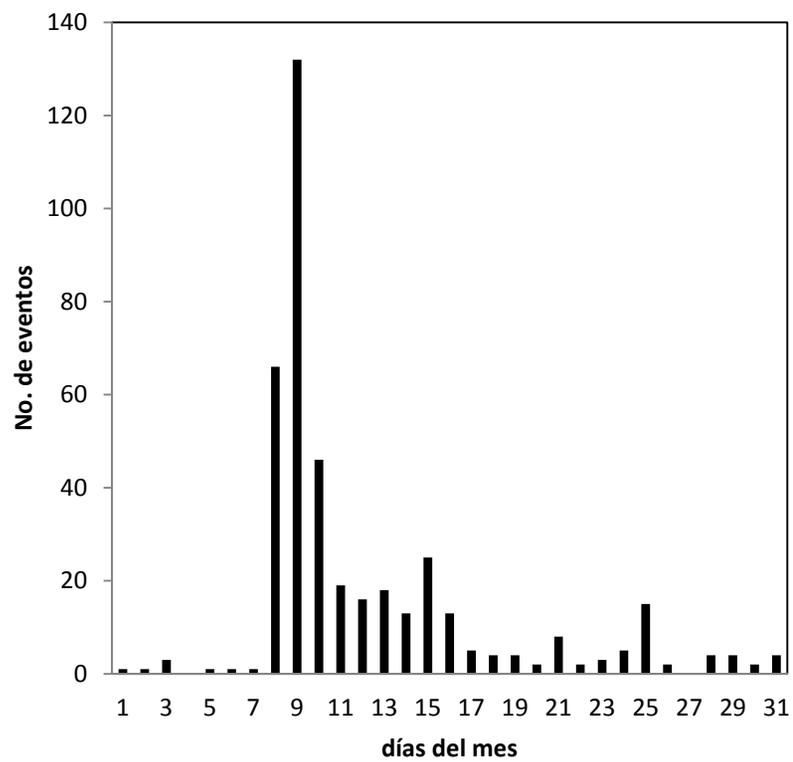
Enjambre sísmico marzo 2001



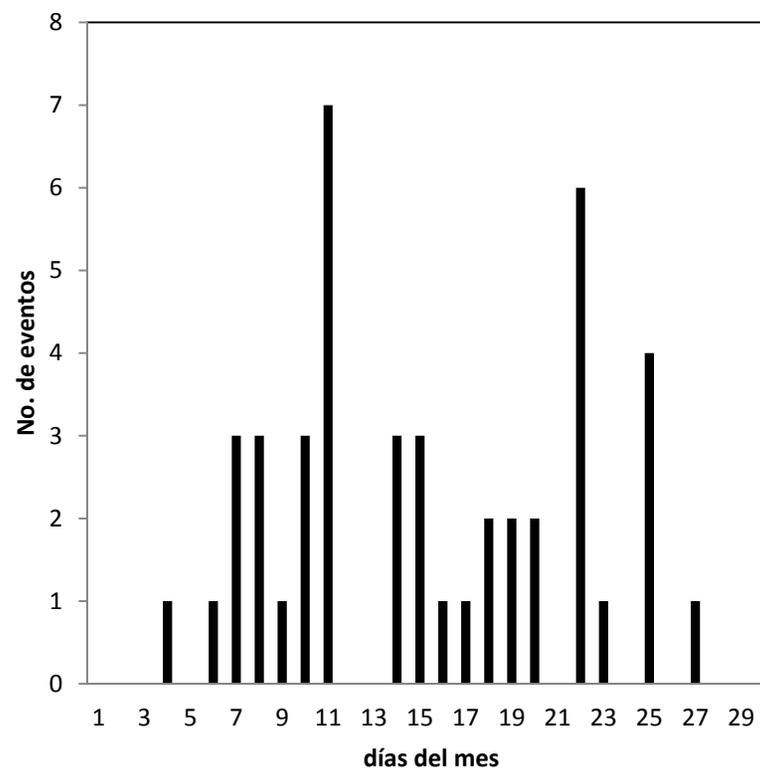
Enjambre sísmico abril 2001



Enjambre sísmico mayo 2001



Enjambre sísmico junio 2001



Anexo 2. Sismos relocalizados del enjambre sísmico ocurrido en marzo de 1997 y utilizados para el mecanismo focal compuesto.

No.	Año	Fecha	HRMM	Seg	Error	Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc
1	1997	318	1542	57.9	0.53	13.668	1.8	-88.971	6	8.7	2.3	0.2	235	1.5
2	1997	318	1546	17.8	0.37	13.667	1.5	-88.974	3.8	6.8	1.9	0.1	233	1.5
3	1997	318	1602	40.7	0.57	13.674	1.8	-88.956	3	9.7	2.9	0.2	248	1.8
4	1997	318	1717	47.7	0.34	13.654	1.8	-88.973	3.6	4.8	4.5	0	272	2.2
5	1997	318	1722	53.3	1.87	13.689	6.7	-89.002	10	2.5	10.8	0.7	193	1.8
6	1997	318	1817	19.3	0.45	13.668	1.2	-88.942	2.6	7.8	1.8	0.1	250	2.3
7	1997	318	1842	54.4	0.41	13.67	1.3	-88.943	2.5	7	4	0.1	255	0.9
8	1997	319	602	30.4	0.55	13.688	4.6	-88.926	10.6	11.1	4.5	0.2	269	1.1
9	1997	319	640	17.9	0.35	13.672	2.2	-88.96	4.7	7.1	1.7	0.1	244	0.8
10	1997	319	659	2.2	0.39	13.675	2.6	-88.954	5.7	8	2	0.1	249	1
11	1997	319	759	56.2	0.34	13.665	1.9	-88.971	3.3	5.4	1.1	0.1	234	1
12	1997	319	809	55.8	0.39	13.659	1.2	-88.973	1.6	5.7	0.8	0.1	231	1
13	1997	319	812	20.5	0.34	13.662	0.9	-88.977	1.6	6.8	1.5	0.1	228	0.9
14	1997	319	813	34.3	0.35	13.667	1.6	-88.977	1.8	7.2	1.7	0.1	228	0.9
15	1997	319	822	0.3	0.35	13.662	0.9	-88.977	1.7	6.8	1.6	0.1	228	1.1

No.	Año	Fecha	HRMM	Seg	Error	Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc
16	1997	319	826	55.9	0.42	13.675	1.3	-88.957	2.2	7.6	2	0.1	248	1.6
17	1997	319	849	52.4	0.35	13.661	0.9	-88.973	1.7	7.1	1.5	0.1	232	1.5
18	1997	319	858	52.9	0.32	13.666	1	-88.978	1.9	6	1.3	0.1	222	1.7
19	1997	319	859	47.5	0.38	13.669	1.6	-88.961	5.1	8.1	2	0.1	243	0.6
20	1997	319	941	4.5	0.31	13.661	0.8	-88.977	1.5	7.1	1.4	0.1	228	1.1
21	1997	319	950	25.1	0.32	13.687	1.4	-88.956	1.8	6.6	1.7	0.1	262	1.2
22	1997	319	1030	10.1	0.34	13.67	2	-88.969	3.9	7.3	1.8	0.1	238	1.4
23	1997	319	1030	10.2	0.59	13.671	1.4	-88.983	2.7	7	2.5	0.2	205	1.5
24	1997	319	1335	53.8	0.36	13.674	1.4	-88.947	2.2	6.3	1.7	0.1	264	1.2
25	1997	319	1336	51.4	0.32	13.671	1	-88.949	2	5.8	0.7	0.1	251	1.3
26	1997	320	2353	19.4	0.65	13.662	2.4	-88.889	3.6	8.4	3	0.2	269	2.1
27	1997	321	17	7.4	1.11	13.679	2.5	-88.988	4.7	6.1	4.4	0.4	201	2.3
28	1997	321	59	47.6	0.86	13.672	1.8	-88.991	3	6	1.5	0.3	183	1.7
29	1997	321	105	33.2	0.99	13.657	2.8	-88.986	4.6	8.3	3.3	0.4	151	1
30	1997	321	110	57.9	0.38	13.659	1.4	-88.989	1.7	6.1	1.8	0.1	166	0.1
31	1997	321	113	9.5	1.07	13.668	2.7	-88.981	4.2	9.5	2.7	0.4	209	1.6
32	1997	321	117	38.4	0.61	13.671	1.5	-88.98	2.9	7.3	2.7	0.2	215	1.2

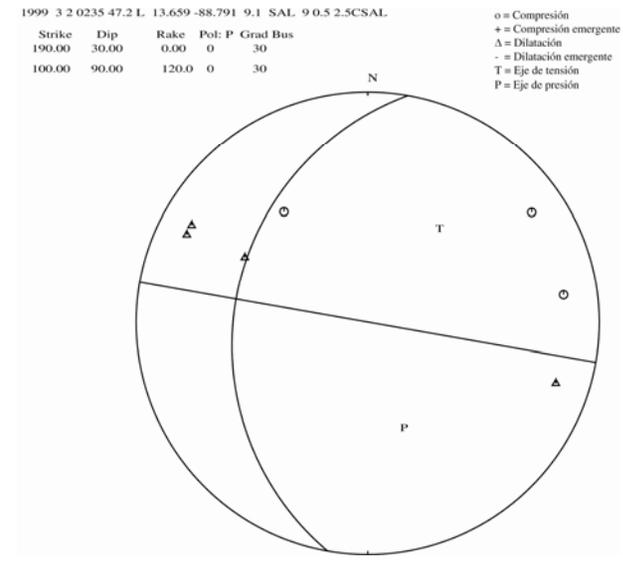
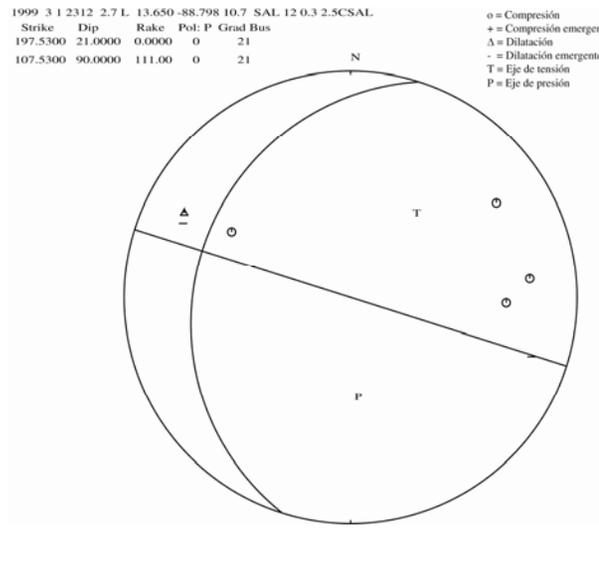
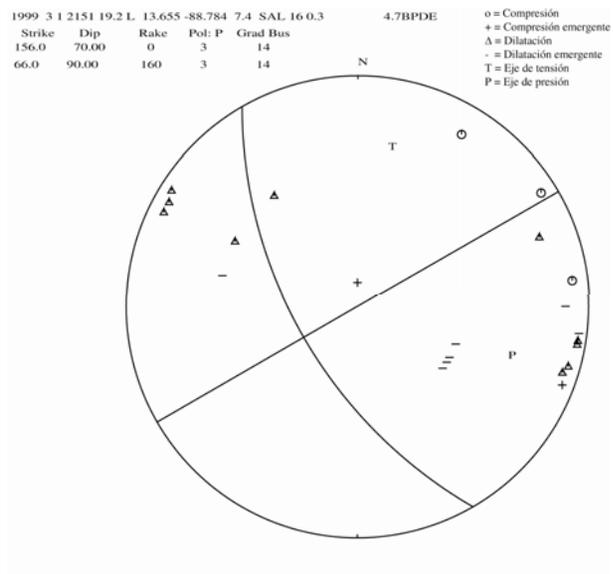
No.	Año	Fecha	HRMM	Seg	Error	Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc
33	1997	321	119	27.3	0.38	13.662	2	-88.898	2.6	9.5	2.7	0.1	266	1.4
34	1997	321	124	30.5	0.37	13.662	2.1	-88.895	2.9	9.2	3.9	0.1	311	1.5
35	1997	321	219	59.4	0.36	13.658	2	-88.923	2.8	11.3	2.8	0.1	302	1.2
36	1997	321	337	14.1	0.81	13.67	1.7	-88.998	2.5	7.7	2.5	0.3	162	2.6
37	1997	321	352	13.8	0.42	13.66	1	-88.984	1.6	4.4	1.7	0.1	170	0.8
38	1997	322	523	16.9	0.28	13.676	0.8	-88.953	1.6	6.5	1.2	0	245	1.7
39	1997	325	155	22.7	0.32	13.654	2.4	-88.886	6.2	13.8	4.5	0	309	0.7
40	1997	325	155	40.4	0.46	13.657	1.6	-88.92	3.2	11.3	1.2	0.2	259	2.8

Anexo 3 Sismos relocalizados del enjambre sísmico ocurrido en marzo de 1999 a los que se les calculó el mecanismo focal simple.

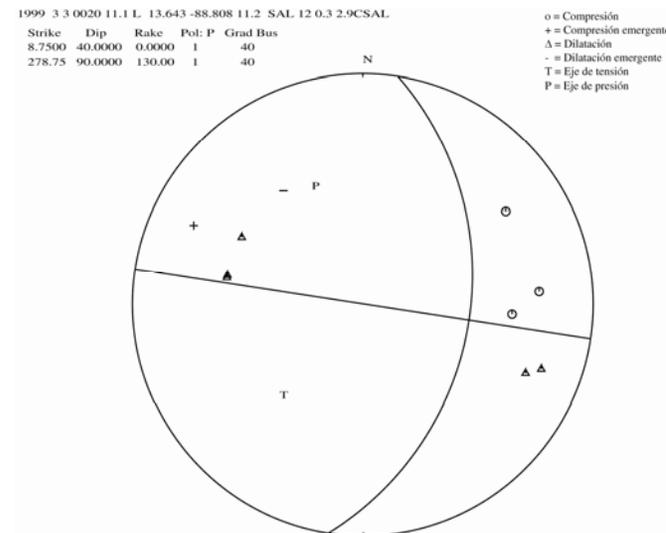
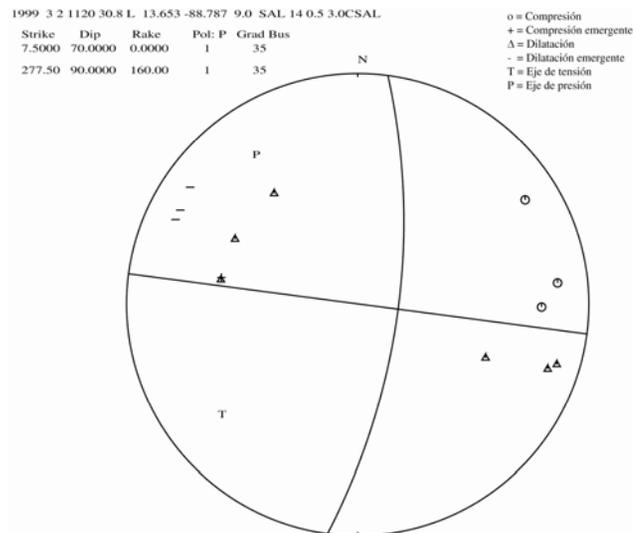
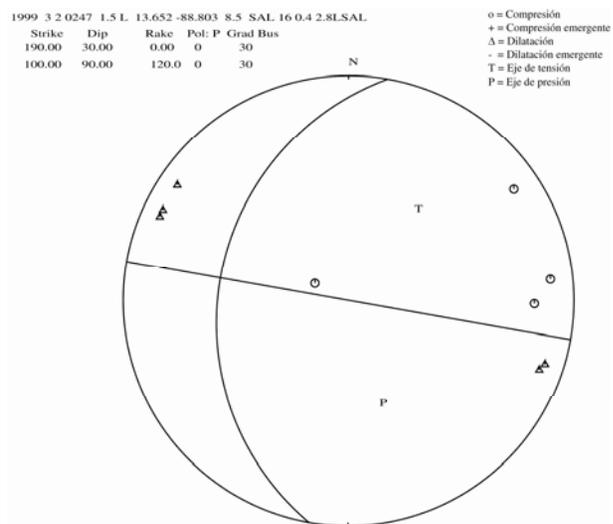
No.	Año	Fecha	HRMM	Seg	Error	Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc	MI	Mb
1	1999	3 1	2151	19.2	0.73	13.655	2.8	-88.784	2.2	7.4	4.5	0.3	150			4.7
2	1999	3 1	2208	20.7	1.04	13.624	3.9	-88.81	2	13	3.3	0.4	144	2.8	SAL	
3	1999	3 1	2222	36.3	0.98	13.698	5.8	-88.78	3.1	8.4	6.7	0.4	156			2.8
4	1999	3 1	2223	25.6	1.18	13.663	6.9	-88.785	3.8	5.1	8	0.4	151			3.2
5	1999	3 1	2312	2.7	0.87	13.65	3.4	-88.798	1.4	10.7	3	0.3	148	2.5	SAL	
6	1999	3 2	235	47.2	1.23	13.659	4.9	-88.791	2.1	9.1	6.5	0.5	153	2.5	SAL	
7	1999	3 2	247	1.5	1.11	13.652	4.3	-88.803	1.9	8.5	5.5	0.4	150			2.8
8	1999	3 2	341	37.3	0.83	13.627	3.3	-88.808	1.3	9.5	4	0.3	173	2.7	SAL	
9	1999	3 2	408	58.6	1.15	13.658	4.1	-88.797	1.8	8.2	5	0.4	149	2.9	SAL	
10	1999	3 2	713	3.1	0.86	13.669	2.4	-88.786	1.6	6.1	4.3	0.3	152	3.6	SAL	
11	1999	3 2	1120	30.8	1.26	13.653	5.1	-88.787	2.5	9	5.9	0.5	150	3	SAL	
12	1999	3 2	1659	22.8	0.95	13.633	3.9	-88.806	2	9.2	4.7	0.3	173	2.6	SAL	
13	1999	3 2	1956	16	0.71	13.627	2.5	-88.792	1.3	9.3	2.5	0.3	149	2.7	SAL	

No.	Año	Fecha	HRMM	Seg	Error	Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc	MI	Mb
14	1999	3 3	20	11.1	0.89	13.643	2.9	-88.808	1.5	11.2	2.5	0.3	146	2.9	SAL	
15	1999	3 3	2146	27.9	1.01	13.643	6.5	-88.783	2.9	15	7.3	0.4	149		4.1	
16	1999	3 5	2339	3.5	1.08	13.677	3.5	-88.8	1.9	11.3	3.3	0.4	152	2.6	SAL	
17	1999	3 6	743	57.6	1.59	13.663	5.4	-88.79	3.1	9.1	5.8	0.6	157	2.9	SAL	
18	1999	3 7	1216	51.9	0.9	13.651	4.6	-88.782	2.4	6.1	4.8	0.3	150	3	SAL	2.4
19	1999	3 11	1042	47.5	0.56	13.606	2.4	-88.805	1	10	2.8	0.2	163	2.9	SAL	
20	1999	3 12	359	25.3	1.14	13.643	6.8	-88.833	8.3	5.2	5.5	0.4	151	2.8	SAL	
21	1999	3 12	1744	11.6	0.45	13.618	1.8	-88.804	0.9	6	2.9	0.1	170	2.6	SAL	
22	1999	3 13	831	56.2	1.19	13.694	5.8	-88.8	5.1	5.3	4.4	0.4	202	2.9	SAL	2.3
23	1999	3 16	1346	24.9	1.19	13.663	7.2	-88.782	3.9	6.1	7.3	0.4	151			2.6
24	1999	3 16	1427	58.9	1.03	13.637	6.5	-88.798	4.1	5.7	5.5	0.4	131	2.7	SAL	
25	1999	3 17	2138	32.8	0.57	13.668	2.8	-88.802	1.5	8.8	3.2	0.2	150			4.5
26	1999	3 17	2156	34.1	0.95	13.684	6.2	-88.802	3	7.6	6.3	0.4	152	3.1	SAL	2.6
27	1999	3 19	2300	37.9	1.14	13.599	2.8	-88.847	1.8	6.7	3.6	0.4	139	2.7	SAL	
28	1999	3 23	750	1.2	0.73	13.662	4.3	-88.805	2	10.1	3	0.3	149	3.2	SAL	2.8

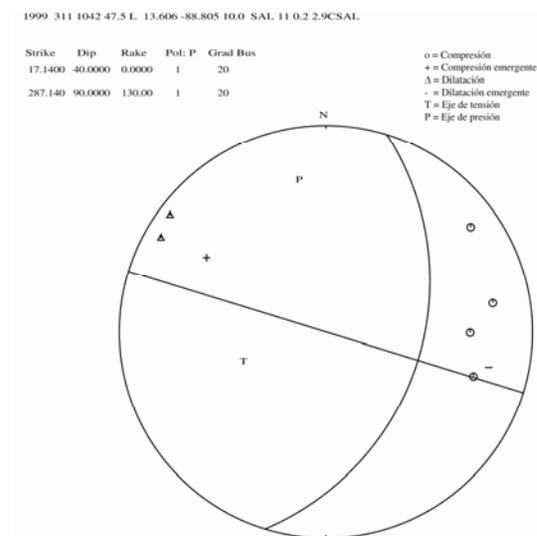
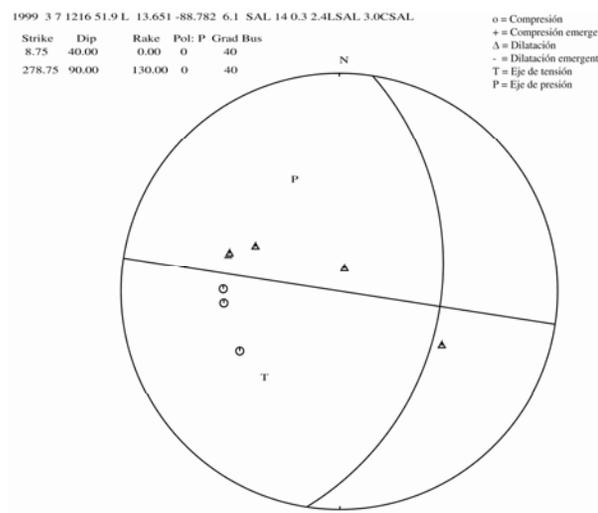
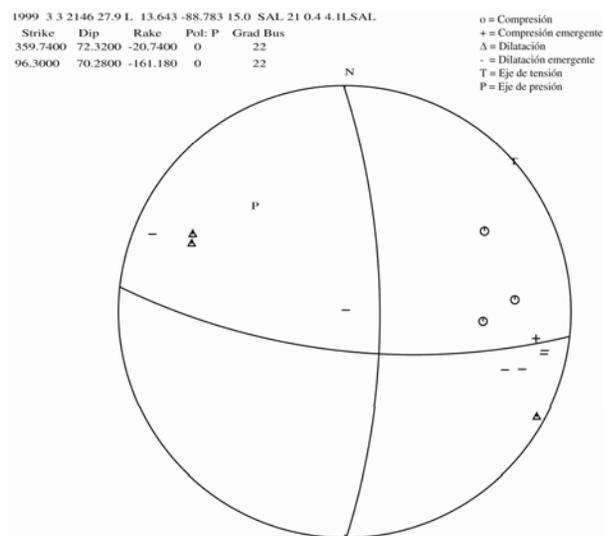
Anexo 4. Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 1999.



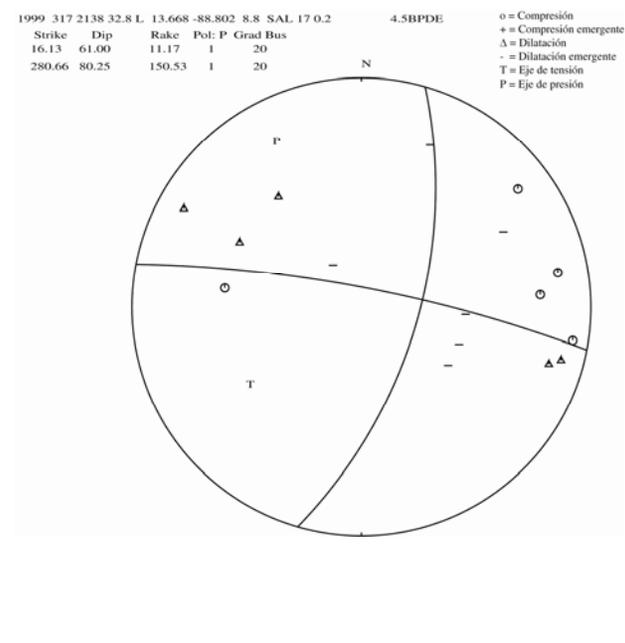
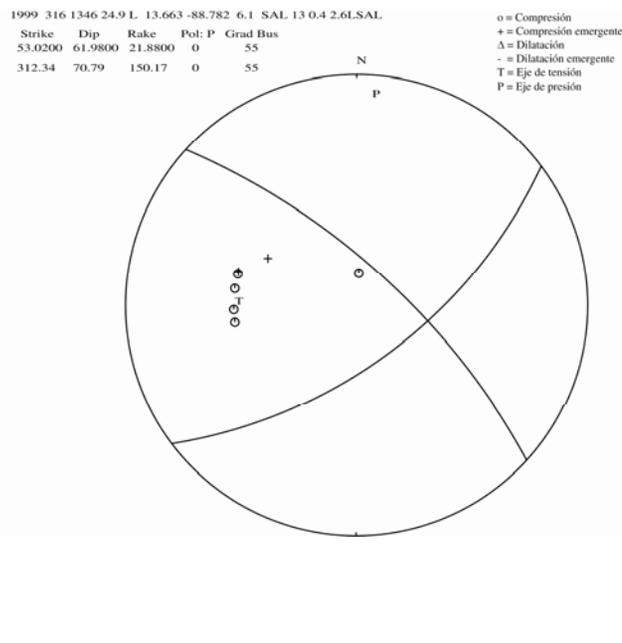
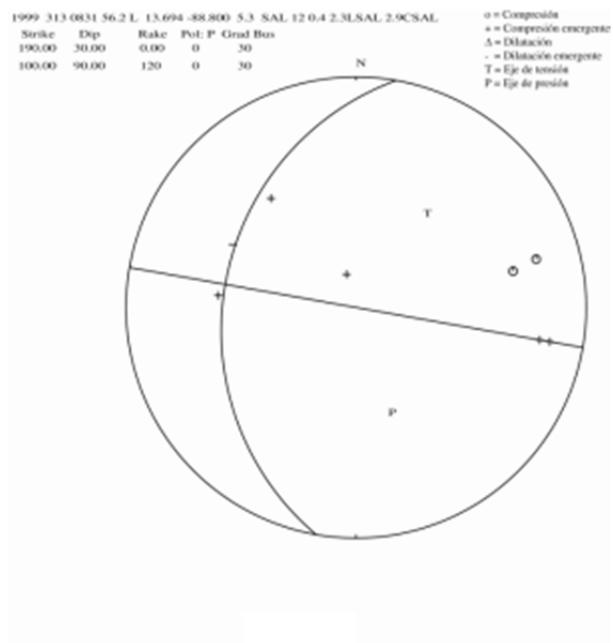
Mecanismos focales de desgarre del enjambre sísmico de 1999



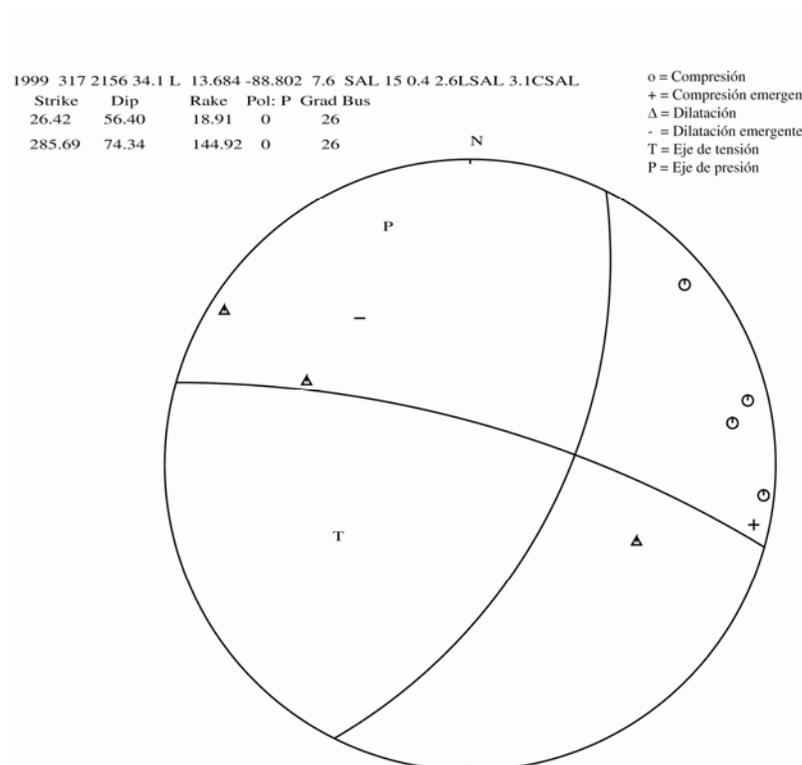
Mecanismos focales de desgarre del enjambre sísmico de 1999



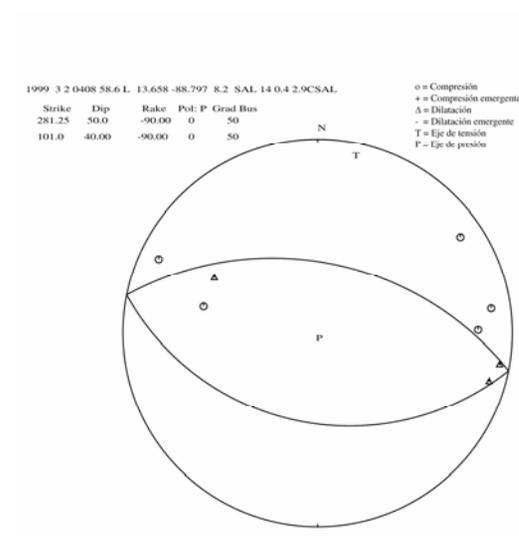
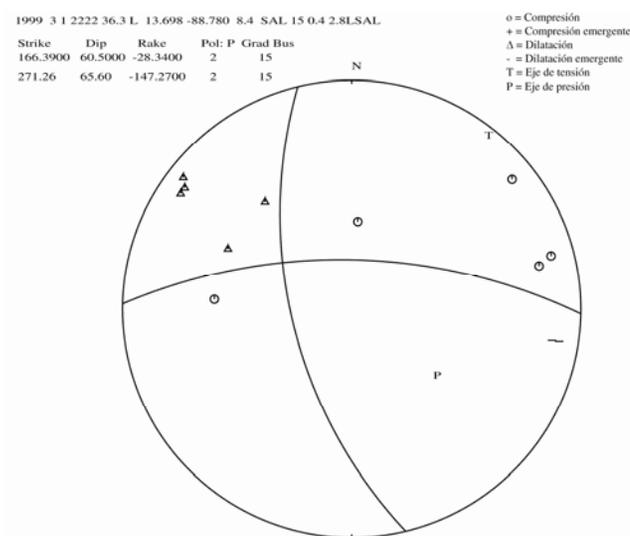
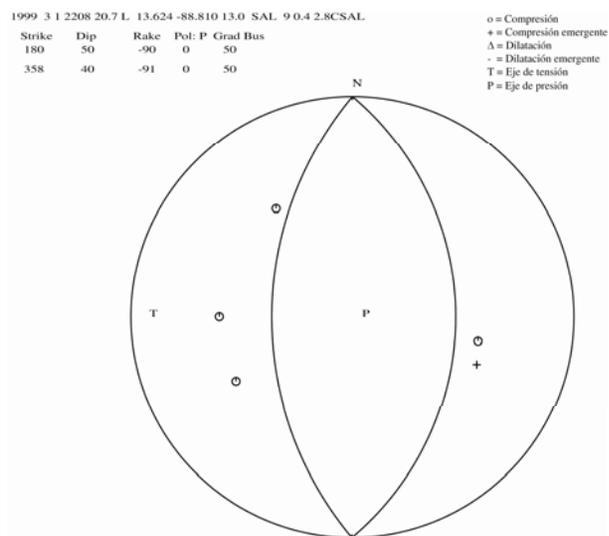
Mecanismos focales de desgarre del enjambre sísmico de 1999



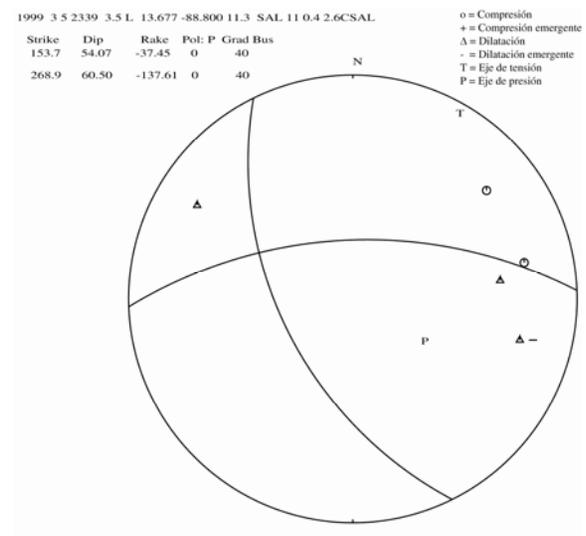
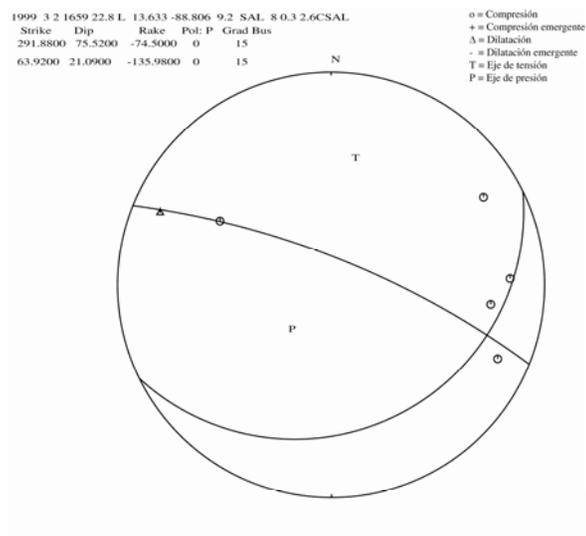
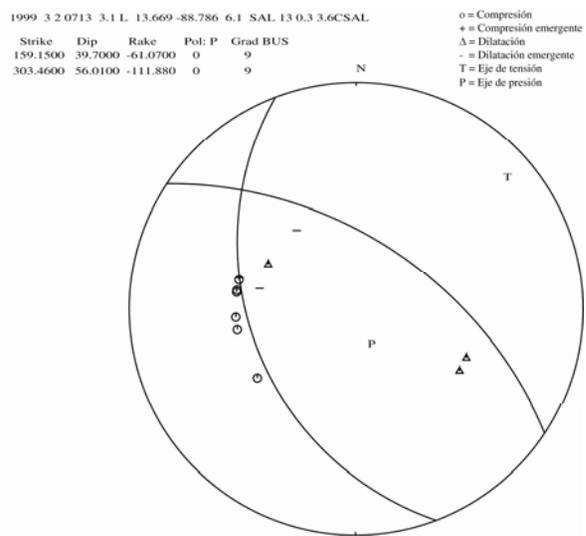
Mecanismos focales de desgarre del enjambre sísmico de 1999



Mecanismos focales de desgarre del enjambre sísmico de 1999



Mecanismos focales normales del enjambre sísmico de 1999

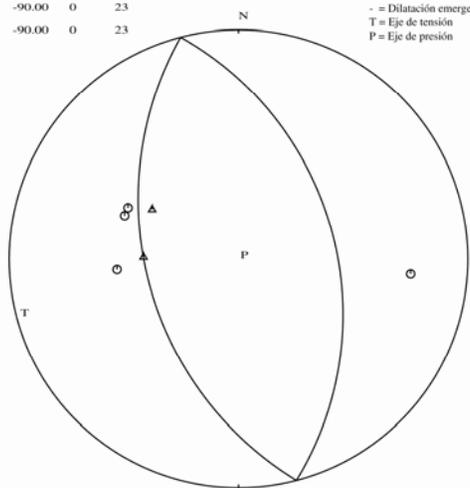


Mecanismos focales normales del enjambre sísmico de 1999

1999 312 0359 25.3 L 13.643 -88.833 5.2 SAL 10 0.4 2.8CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
345.38	44.00	-90.00	0	23
165.38	46.00	-90.00	0	23

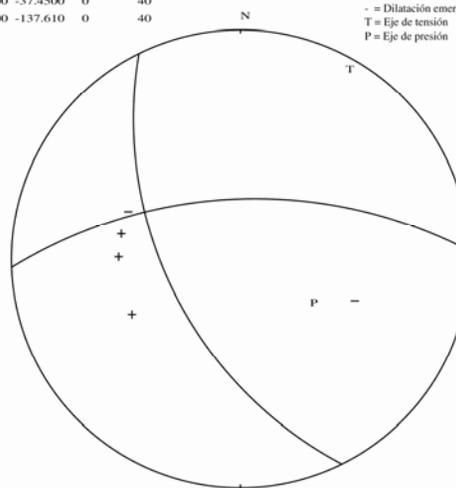
o = Compresión
 + = Compresión emergente
 Δ = Dilatación
 - = Dilatación emergente
 T = Eje de tensión
 P = Eje de presión



1999 312 1744 11.6 L 13.618 -88.804 6.0 SAL 6 0.1 2.6CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
153.7000	54.0700	-37.4500	0	40
267.9000	60.5000	-137.610	0	40

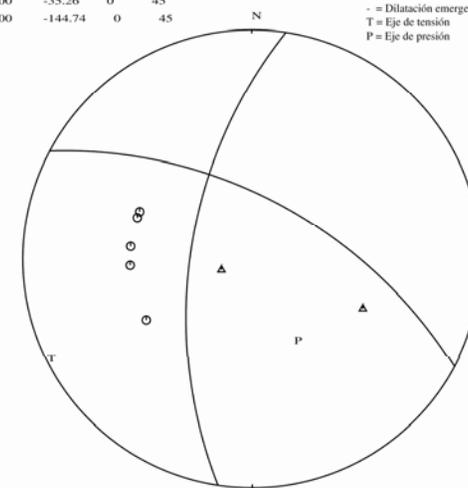
o = Compresión
 + = Compresión emergente
 Δ = Dilatación
 - = Dilatación emergente
 T = Eje de tensión
 P = Eje de presión



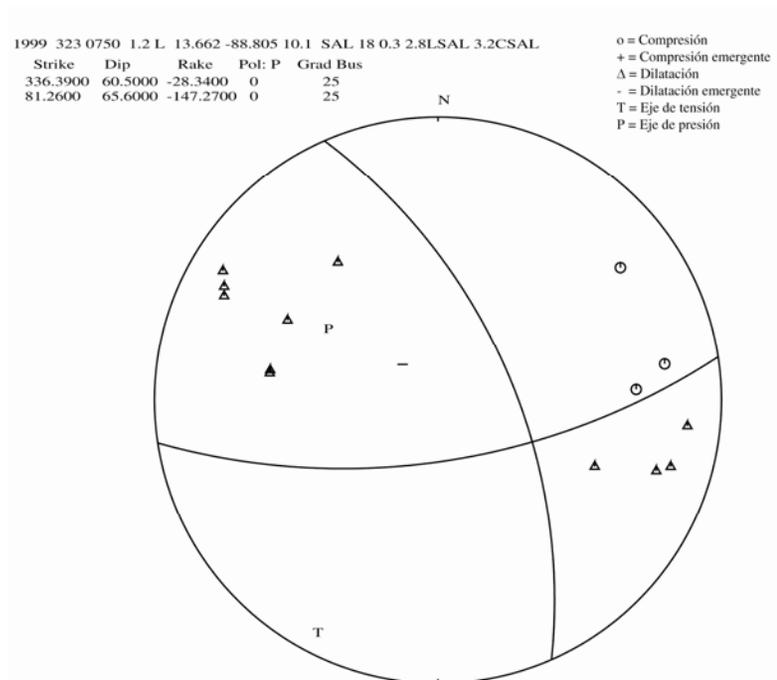
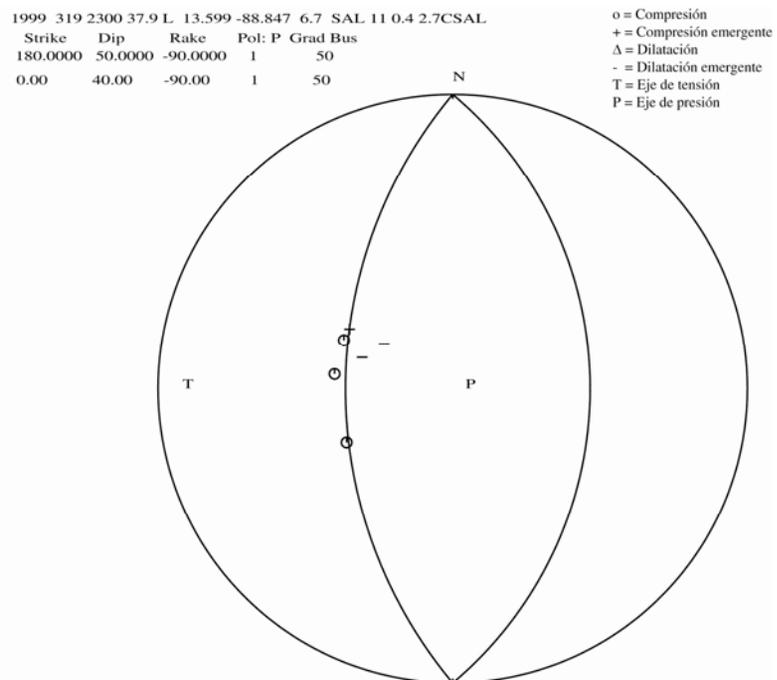
1999 316 1427 58.9 L 13.637 -88.798 5.7 SAL 11 0.4 2.7CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
188.60	60.00	-35.26	0	45
298.07	60.00	-144.74	0	45

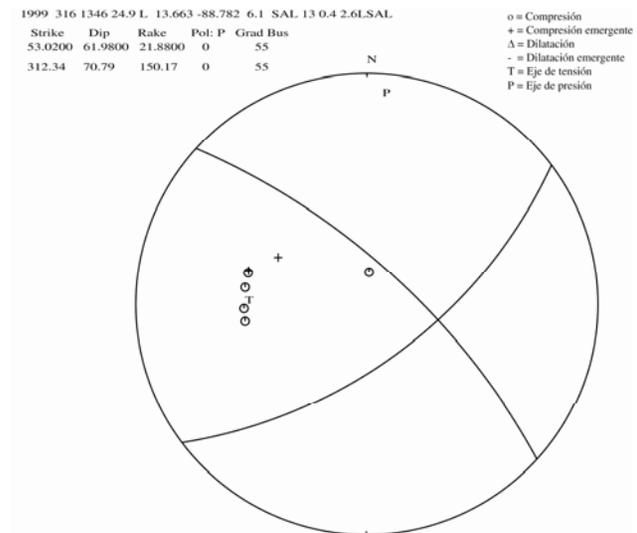
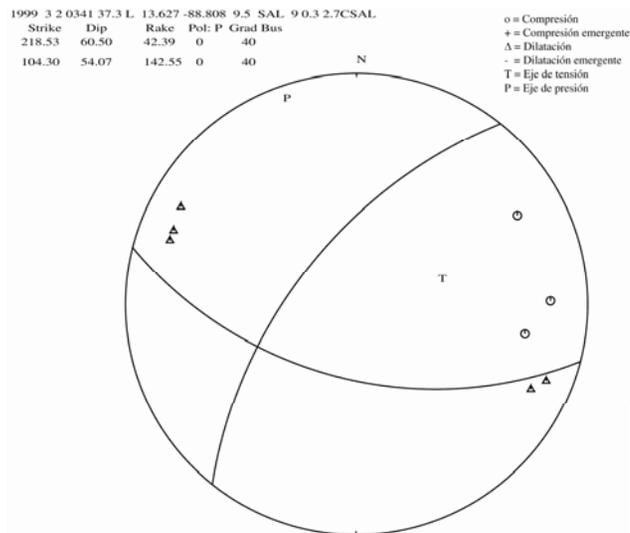
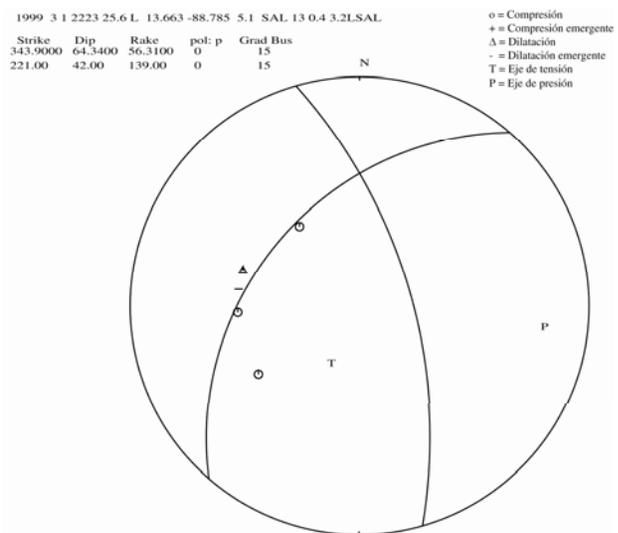
o = Compresión
 + = Compresión emergente
 Δ = Dilatación
 - = Dilatación emergente
 T = Eje de tensión
 P = Eje de presión



Mecanismos focales normales del enjambre sísmico de 1999

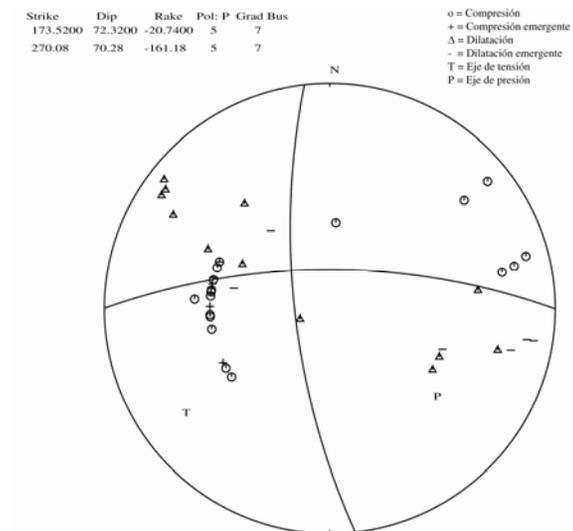
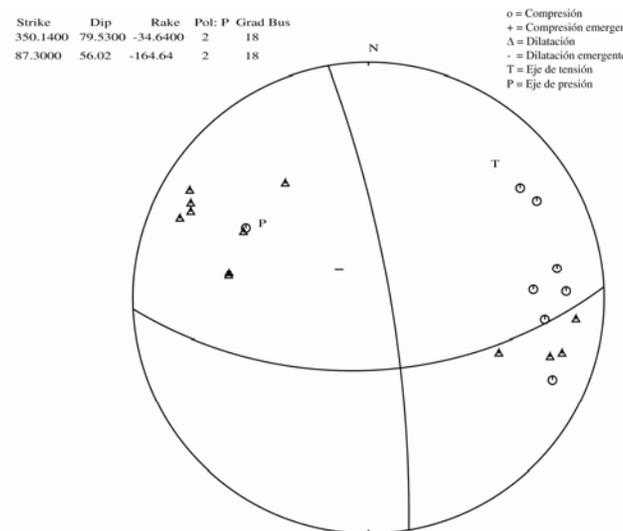
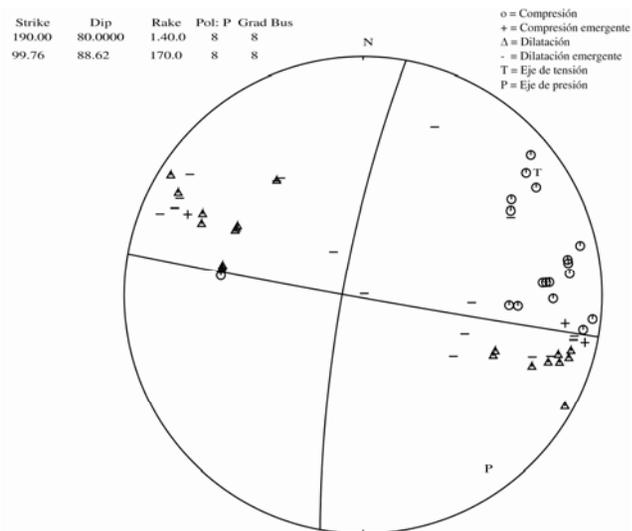


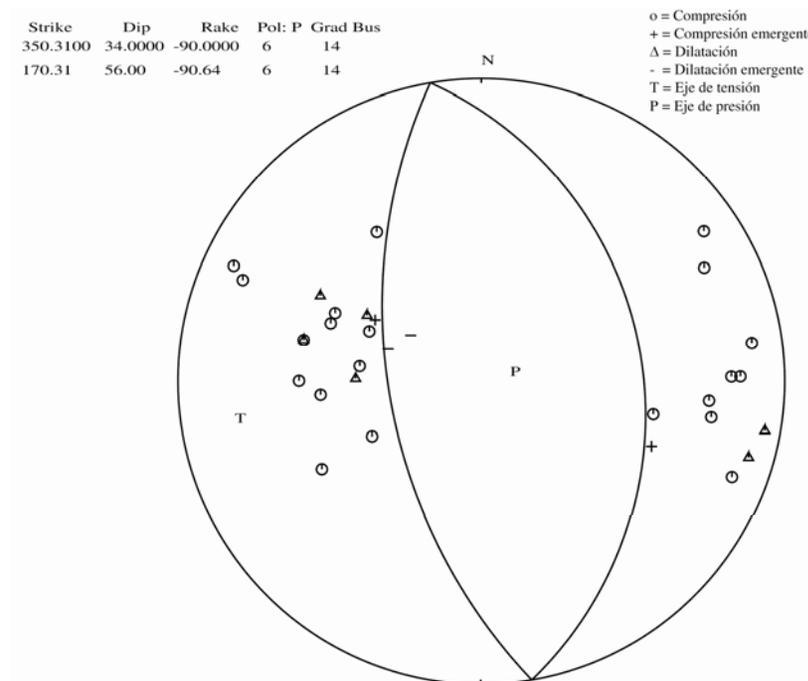
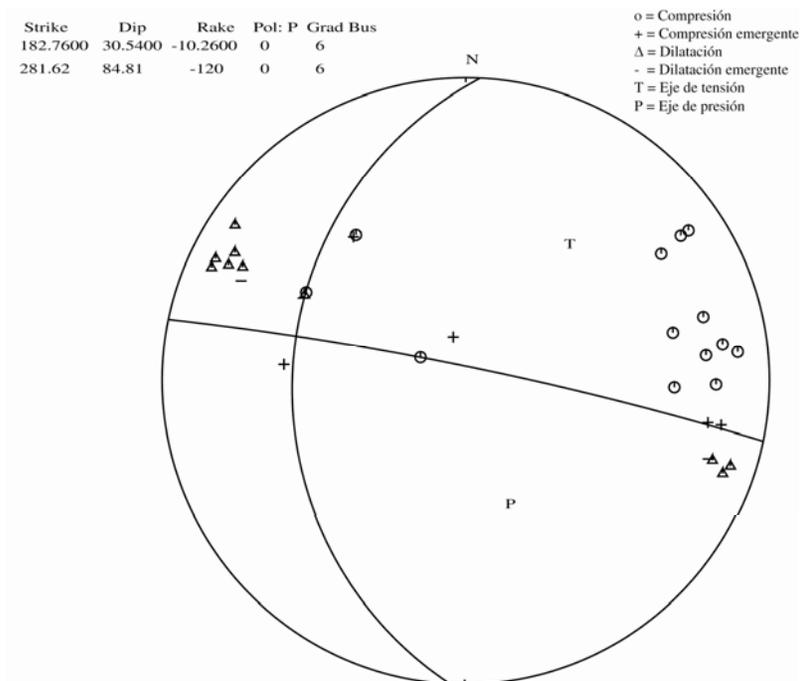
Mecanismos focales normales del enjambre sísmico de 1999



Mecanismos focales inversos del enjambre sísmico de 1999

Anexo 5. Mecanismo focal compuesto de desgarre 1999





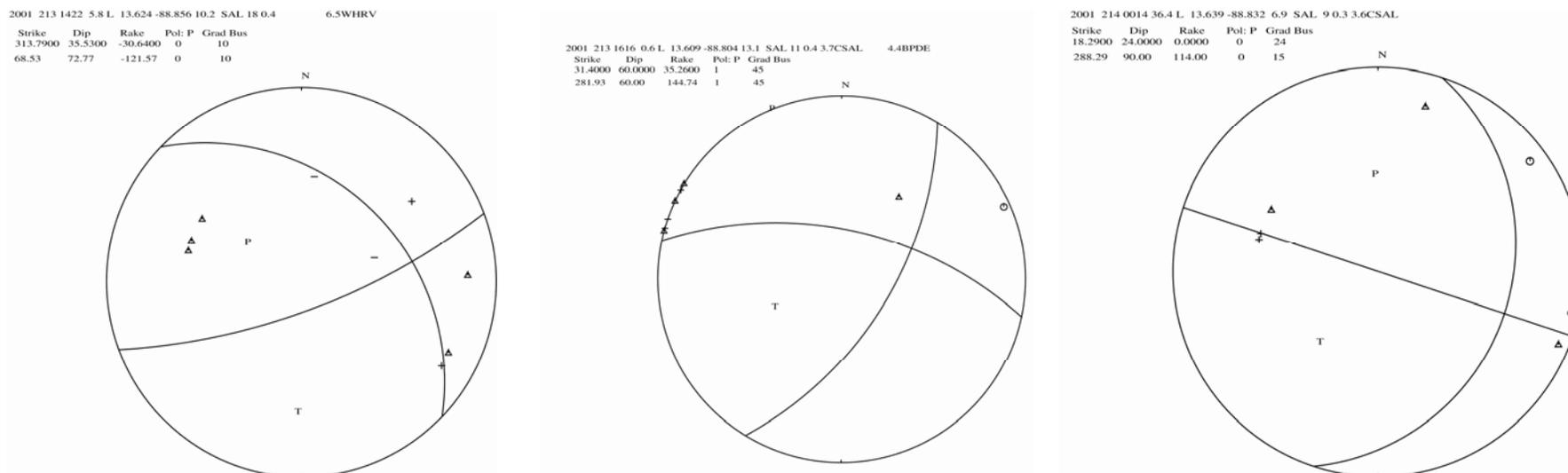
Anexo 6. Sismos seleccionados para el mecanismo focal del enjambre de 2001. Del 41 al 47 son del mecanismo focal compuesto y no simple.

No.	Año	Fecha	HRMM	Seg	Error		Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc		MI	Mb	Ms	Mw
1	2001	213	1422	5.8	1.2	L	13.624	4.6	-88.856	2.7	10.2	4.6	0.4	134						6.5 HRV
2	2001	213	1616	0.6	1.07	L	13.609	5	-88.804	2.5	13.1	19.5	0.4	167	3.7	SAL		4.4		
3	2001	214	14	36.4	0.94	L	13.639	3.5	-88.832	2.6	6.9	4.8	0.3	169	3.6	SAL				
4	2001	221	618	27.7	0.63	L	13.611	2.4	-88.884	3.6	7.7	3.6	0.2	288	3.2	SAL				
5	2001	31	302	52.3	0.57	L	13.627	2.2	-88.795	1.6	7.6	2	0.2	133	3.3	SAL				
6	2001	310	1343	14.6	0.85	L	13.613	4	-88.761	6.5	5.7	8	0.3	309	3	SAL				
7	2001	311	2334	25	0.8	L	13.638	2.9	-88.84	1.8	10.5	2.1	0.3	145	3.6	SAL				
8	2001	46	404	26.3	0.66	L	13.682	2.2	-88.944	2.7	10	2.4	0.2	257	3.6	SAL				
9	2001	411	1104	33.8	0.72	L	13.608	5.8	-88.757	2.6	9.8	3.2	0.2	147	3.8	SAL				
10	2001	52	1404	32.9	0.47	L	13.636	1.3	-88.909	2.1	9.4	1.3	0.2	269	3.3	SAL				
11	2001	58	1800	22	0.76	L	13.579	4.5	-88.776	2.9	8.6	4.9	0.3	131	3.1	SAL	3.4	SAL		
12	2001	58	1802	17.5	0.77	L	13.625	4.6	-88.71	2.3	9.2	3.7	0.3	153			5.5	SAL		5.7 HRV
13	2001	58	1809	13	0.59	L	13.661	3.4	-88.723	1.7	3.6	4.4	0.2	123			4.2	SAL	4.3	
14	2001	58	1815	47	0.59	L	13.636	2.9	-88.669	1.9	8	3.3	0.2	144			5.2	SAL	5	5.3 SAL
15	2001	58	1826	23.4	0.78	L	13.643	4.8	-88.719	3.7	7.9	6.8	0.2	133			4.0	SAL		
16	2001	58	1832	50.7	0.32	L	13.622	3.3	-88.721	1.4	7.3	3.2	0.1	174			3.5	SAL		
17	2001	58	1840	22	0.57	L	13.597	3.6	-88.693	1.6	9.6	2.4	0.2	131			4.5	SAL	4.4	
18	2001	58	1915	40.2	1.03	L	13.601	6.5	-88.696	5	7.1	7.4	0.4	317	2.9	SAL				

No.	Año	Fecha	HRMM	Seg	Error		Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc		MI	Mb	Ms	Mw
19	2001	5 8	1941	47	0.57	L	13.592	4.2	-88.719	1.8	9.5	2.7	0.2	139	3	SAL	3.2 SAL			
20	2001	5 8	1952	13.4	0.7	L	13.566	3.2	-88.782	3	9.3	3.6	0.2	136	3.8	SAL	4.1 SAL	4.2		
21	2001	5 8	2214	23.7	0.69	L	13.623	3.6	-88.733	2.3	12.3	4.4	0.2	173	3.3	SAL				
22	2001	5 9	319	45.1	0.42	L	13.637	2	-88.768	2.5	7.3	4.4	0.1	305	3	SAL				
23	2001	5 9	430	31.4	0.73	L	13.624	4.1	-88.722	2	8.3	4	0.3	174	3.1	SAL				
24	2001	5 9	643	26	0.52	L	13.606	2.8	-88.738	1.5	9.7	2.2	0.2	170	3.3	SAL				
25	2001	5 9	723	14.4	0.88	L	13.647	4.5	-88.696	2.4	9.1	4.7	0.3	134			4.6 SAL	4.5		
26	2001	5 9	854	50.5	0.55	L	13.587	3.9	-88.733	1.8	15.5	11.8	0.2	168	3.1	SAL				
27	2001	5 9	858	53.1	0.58	L	13.617	4.5	-88.748	2.4	10.5	2.4	0.2	165	3.2	SAL	3.4 SAL			
28	2001	5 9	1028	3.8	0.61	L	13.577	5.2	-88.621	1.8	8.1	3.7	0.2	174	3.4	SAL				
29	2001	5 9	1032	4.3	0.62	L	13.561	4.8	-88.723	2.1	10.4	3.4	0.2	164	3.7	SAL				
30	2001	5 14	1329	34.5	0.39	L	13.577	3	-88.724	1.4	2.9	5.4	0.2	152			3.8 SAL			
31	2001	5 14	1331	51	0.51	L	13.576	3.1	-88.731	1.8	5.9	7.5	0.2	152			3.4 SAL			
32	2001	5 15	1946	47.1	0.5	L	13.588	3.5	-88.721	1.7	8	3.3	0.2	148			4.5 SAL	4.4		
33	2001	5 15	2041	40.5	0.49	L	13.574	3	-88.716	1.7	6.9	3.5	0.2	153	3.8	SAL	4.1 SAL	4		
34	2001	5 18	337	31.9	0.51	L	13.544	2.8	-88.746	1.8	3	4.3	0.2	163	3.2	SAL	3.2 SAL			
35	2001	5 19	447	5.8	0.57	L	13.563	4.7	-88.719	2.4	7.2	3	0.2	156	3.2	SAL	3.4 SAL			
36	2001	5 25	216	4.6	0.55	L	13.629	3.8	-88.736	1.6	7.5	2.9	0.2	151	4	SAL	4.4 SAL	4		
37	2001	5 25	244	22.8	0.58	L	13.618	2.5	-88.76	1.5	6	2.5	0.2	130	2.5	SAL				
38	2001	6 11	2016	48.2	0.67	L	13.672	1.8	-88.951	2.9	7.5	2.2	0.2	251	2.6	SAL				
39	2001	6 11	2019	32.4	0.55	L	13.662	1.4	-88.964	2.3	8.5	1.6	0.2	238	2.6	SAL				

No.	Año	Fecha	HRMM	Seg	Error		Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc	MI	Mb	Ms	Mw
40	2001	622	1953	55.1	0.44	R	13.597	2.3	-88.732	1.3	6.9	3.6	0.2	158		3.7			SAL
41	2001	115	1943	17.6	0.63	L	13.654	2.8	-88.985	2.6	10.9	4.3	0.2	139	3.3				SAL
42	2001	214	35	44.4	0.79	L	13.68	4.1	-88.977	4.8	11.6	3.4	0.3	201	3.8				SAL
43	2001	219	1752	53.5	0.55	L	13.683	1.6	-88.924	1.2	5.9	2.7	0.2	170	3.8				SAL
44	2001	225	1759	34	0.86	L	13.655	3.3	-88.972	6.5	10.5	3.4	0.3	246	2.9				SAL
45	2001	34	1351	21.5	0.63	L	13.662	2	-88.993	2.9	9.5	2.2	0.2	148	2.9				SAL
46	2001	331	603	28.1	0.65	L	13.666	1.9	-88.979	2.5	8	2	0.2	231	2.6				SAL
47	2001	611	2017	24.4	0.69	L	13.672	1.8	-88.959	3.3	6.8	2.2	0.2	246	2.5				SAL

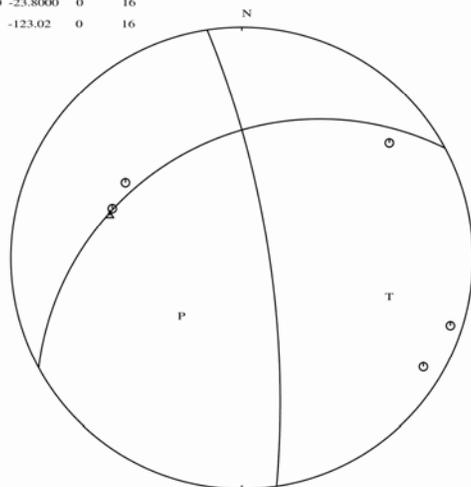
Anexo 7. Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001. El orden de aparición es de acuerdo a la fecha en que ocurrió.



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

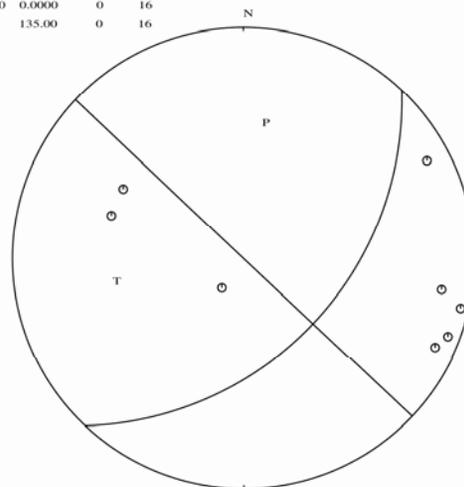
2001 221 0618 27.7 L 13.611 -88.884 7.7 SAL 6 0.2 3.2CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
241.5800	35.3900	-23.8000	0	16
351.36	76.48	-123.02	0	16



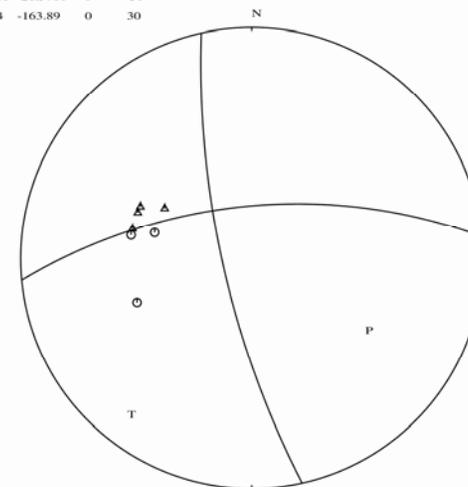
2001 3 1 0302 52.3 L 13.627 -88.795 7.6 SAL 11 0.2 3.3CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
43.3300	45.0000	0.0000	0	16
313.33	90.00	135.00	0	16



2001 310 1343 14.6 L 13.613 -88.761 5.7 SAL 8 0.3 3.0CSAL

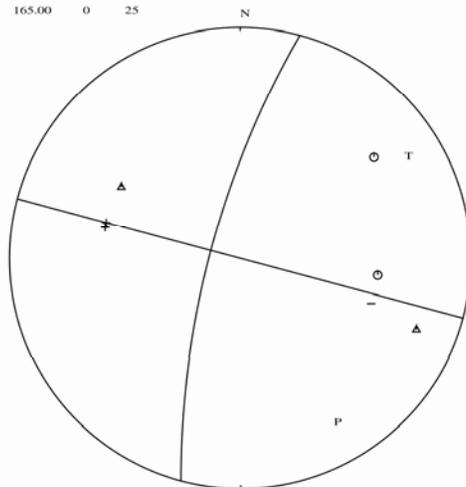
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
167.4000	75.5200	-26.5700	0	30
264.53	64.34	-163.89	0	30



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

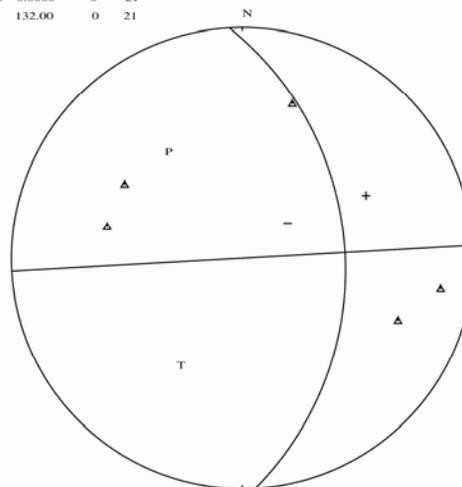
2001 311 2334 25.0 L 13.638 -88.840 10.5 SAL 11 0.3 3.6CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
195.0000	75.0000	0.0000	0	25
105.00	90.00	165.00	0	25



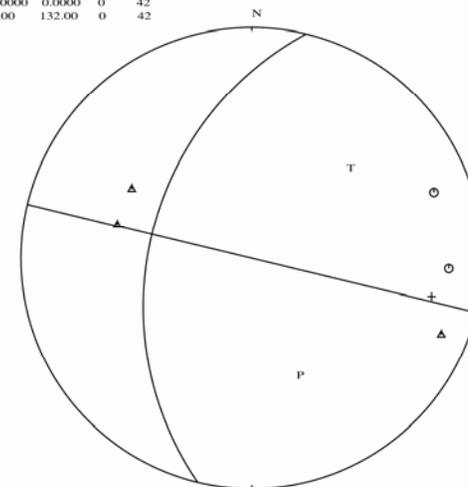
2001 4 6 0404 26.3 L 13.682 -88.944 10.0 SAL 9 0.2 3.6CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
356.7700	42.0000	0.0000	0	21
266.77	90.00	132.00	0	21



2001 411 1104 33.8 L 13.608 -88.757 9.8 SAL 12 0.2 3.8CSAL

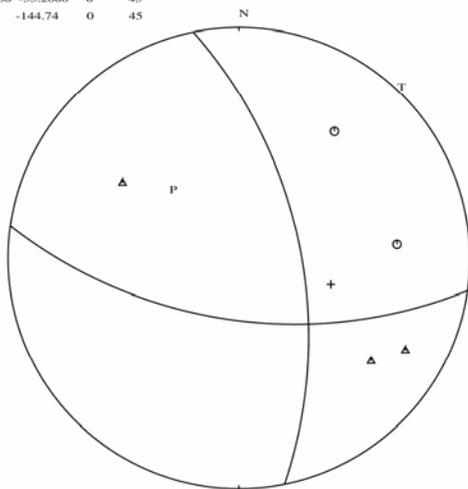
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
193.5700	42.0000	0.0000	0	42
103.57	90.00	132.00	0	42



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

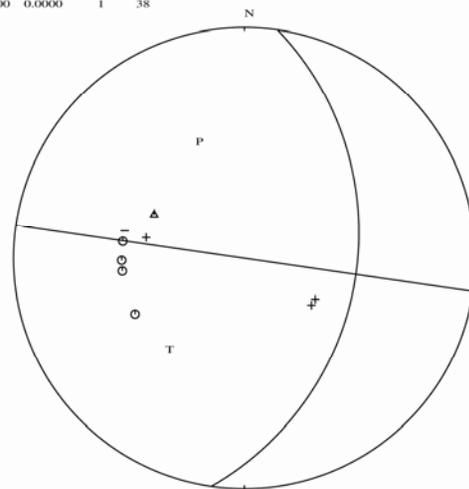
2001 5 2 1404 32.9 L 13.636 -88.909 9.4 SAL 8 0.2 3.3CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
348.6000	60.0000	-35.2600	0	45
98.07	60.00	-144.74	0	45



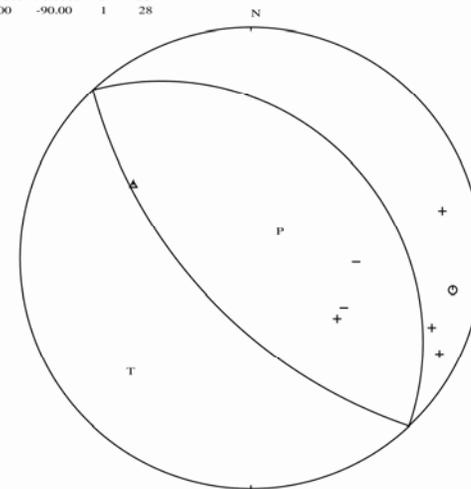
2001 5 8 1809 13.0 L 13.661 -88.723 3.6 SAL 14 0.2 4.2LSAL 4.3BPDE

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
8.2500	38.0000	0.0000	1	38



2001 5 8 1800 22.0 L 13.580 -88.776 8.6 SAL 14 0.3 3.4LSAL 3.1CSAL

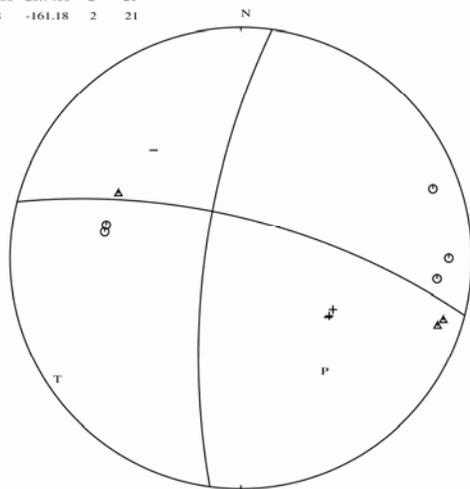
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
316.7900	28.9000	-90.0000	1	28
136.79	62.00	-90.00	1	28



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

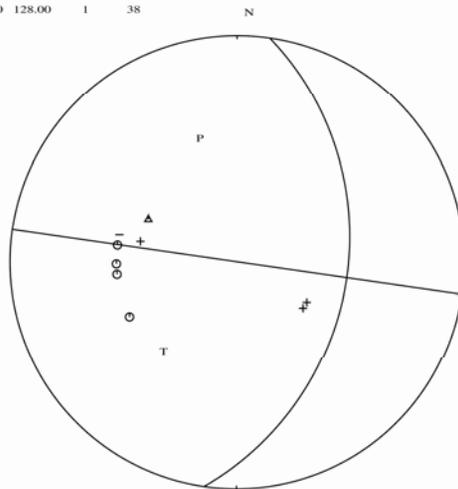
2001 5 8 1802 17.5 L 13.626 -88.710 9.2 SAL 29 0.3 5.5LSAL 5.7WHRV

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
187.7400	72.3200	-20.7400	2	21
284.30	70.28	-161.18	2	21



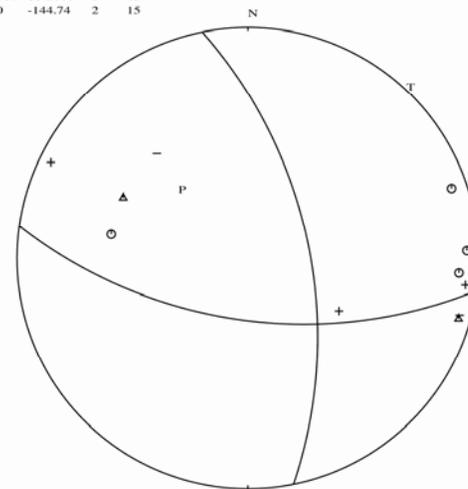
2001 5 8 1809 13.0 L 13.661 -88.723 3.6 SAL 14 0.2 4.2LSAL 4.3BPDE

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
8.2500	38.0000	0.0000	1	38
278.25	90.0000	128.00	1	38



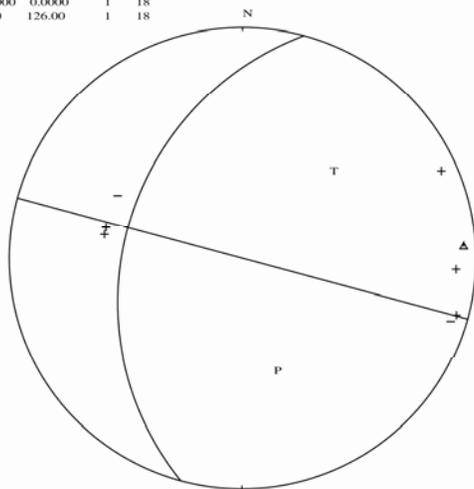
2001 5 8 1815 47.0 L 13.635 -88.669 8.0 SAL 27 0.2 5.2LSAL 5.3WSAL 5.0BPDE

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
348.6000	60.0000	-35.2600	2	15
98.07	60.00	-144.74	2	15



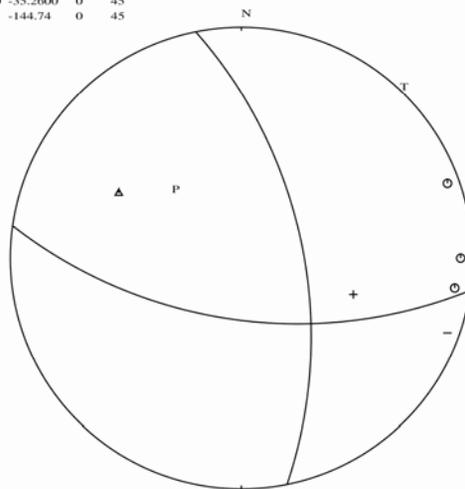
2001 5 8 1826 23.4 L 13.643 -88.719 7.8 SAL 19 0.3 4.0LSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
195.2400	36.0000	0.0000	1	18
105.24	90.00	126.00	1	18



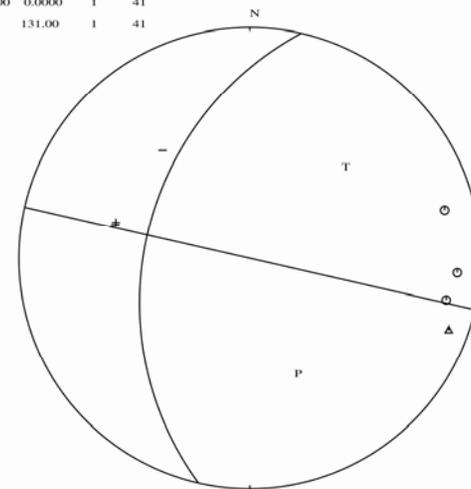
2001 5 8 1832 50.7 L 13.622 -88.721 7.3 SAL 8 0.1 3.5LSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
348.6000	60.0000	-35.2600	0	45
98.07	60.00	-144.74	0	45



2001 5 8 1840 22.0 L 13.597 -88.693 9.6 SAL 25 0.2 4.5LSAL 4.4BPDE

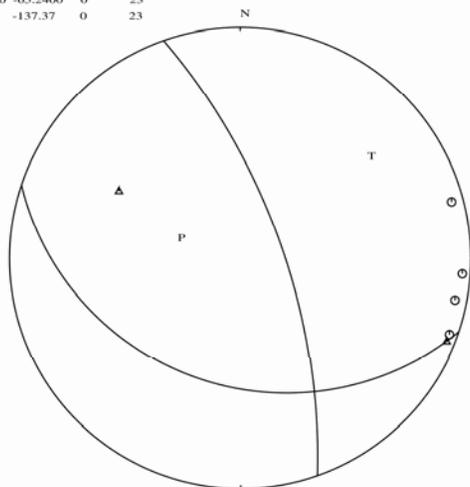
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
192.8600	41.0000	0.0000	1	41
102.86	90.00	131.00	1	41



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

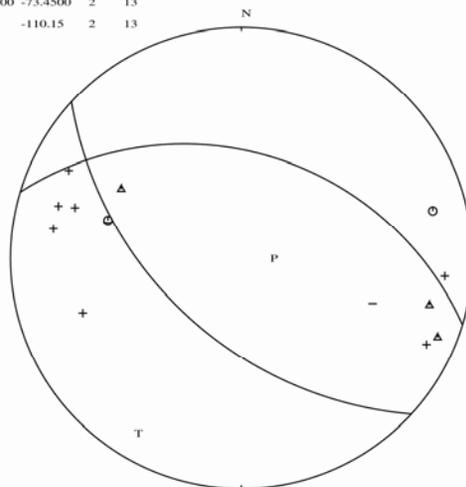
2001 5 8 1915 40.2 L 13.601 -88.696 7.1 SAL 7 0.4 2.9CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
340.6200	68.9200	-65.2400	0	23
108.57	32.08	-137.37	0	23



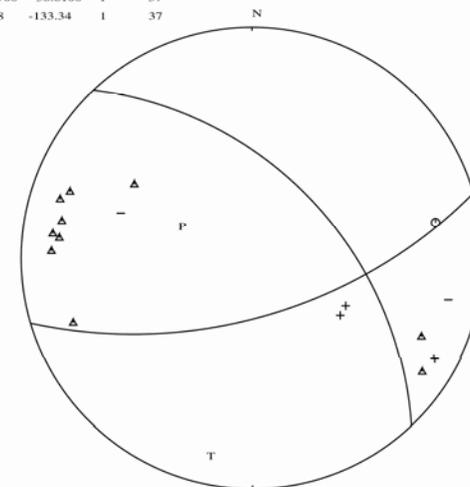
2001 5 8 1941 47.0 L 13.592 -88.719 9.5 SAL 16 0.2 3.2LSAL 3.0CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
132.6100	52.1800	-73.4500	2	13
286.75	40.78	-110.15	2	13



2001 5 8 1952 13.4 L 13.566 -88.782 9.3 SAL 16 0.2 4.1LSAL 3.8CSAL 4.2BPDE

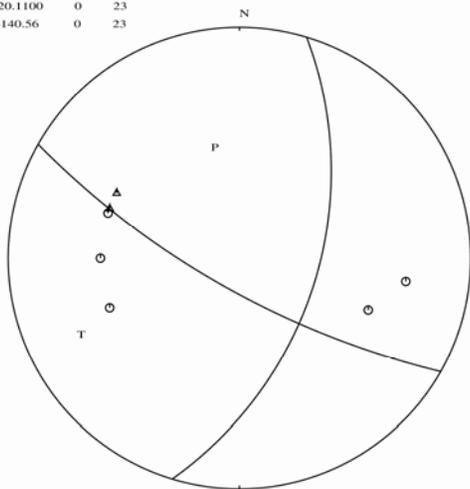
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
316.6100	50.3700	-38.6100	1	37
73.60	61.28	-133.34	1	37



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

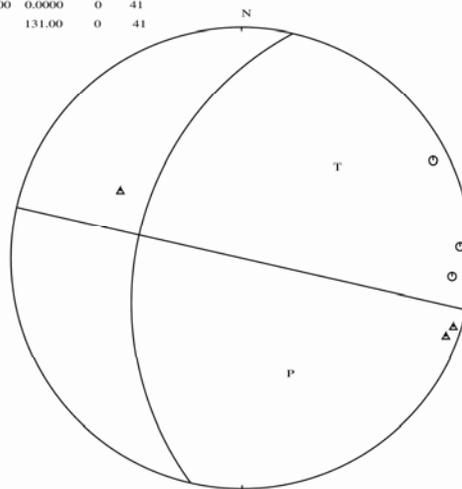
2001 5 8 2214 23.7 L 13.623 -88.733 12.3 SAL 8 0.2 3.3CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
16.8900	52.3200	-20.1100	0	23
119.51	74.21	-140.56	0	23



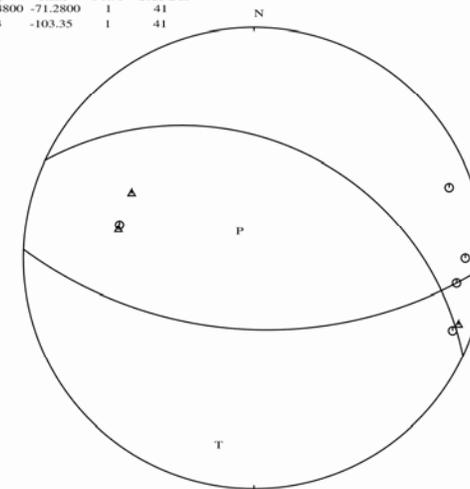
2001 5 9 0319 45.1 L 13.637 -88.768 7.3 SAL 8 0.1 3.0CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
192.8600	41.0000	0.0000	0	41
102.86	90.00	131.00	0	41



2001 5 9 0430 31.4 L 13.624 -88.722 8.3 SAL 9 0.3 3.1CSAL

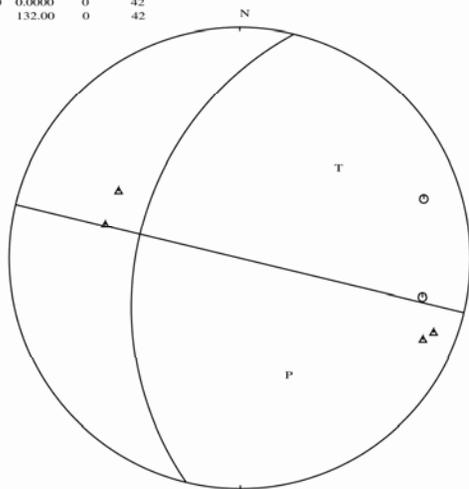
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
295.0600	36.4800	-71.2800	1	41
92.21	55.73	-103.35	1	41



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

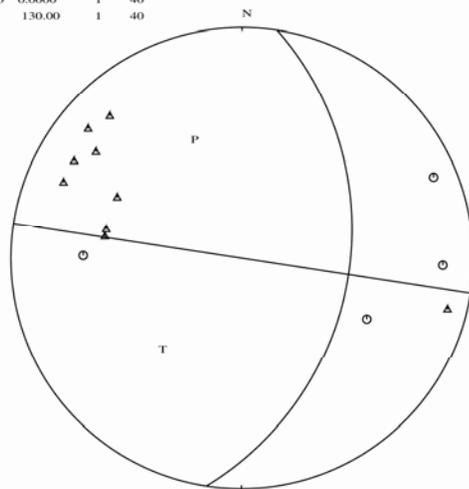
2001 5 9 0643 26.0 L 13.606 -88.738 9.7 SAL 9 0.2 3.3CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
193.5700	42.0000	0.0000	0	42
103.57	90.00	132.00	0	42



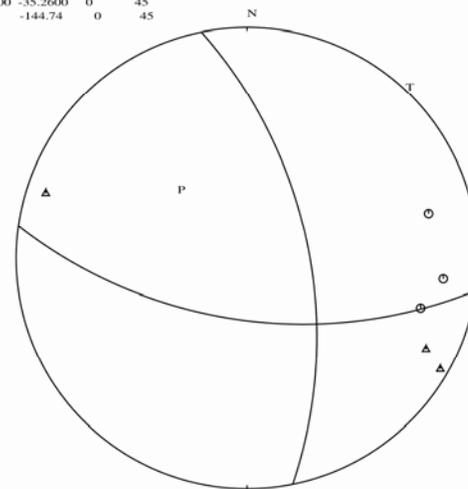
2001 5 9 0723 14.4 L 13.647 -88.697 9.1 SAL 15 0.3 4.6LSAL 4.5BPDE

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
8.7500	40.0000	0.0000	1	40
278.75	90.00	130.00	1	40



2001 5 9 0854 50.5 L 13.587 -88.733 15.5 SAL 8 0.2 3.1CSAL

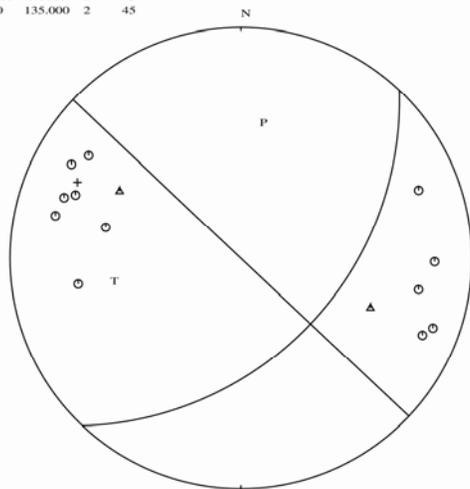
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
348.6000	60.0000	-35.2600	0	45
98.07	60.00	-144.74	0	45



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

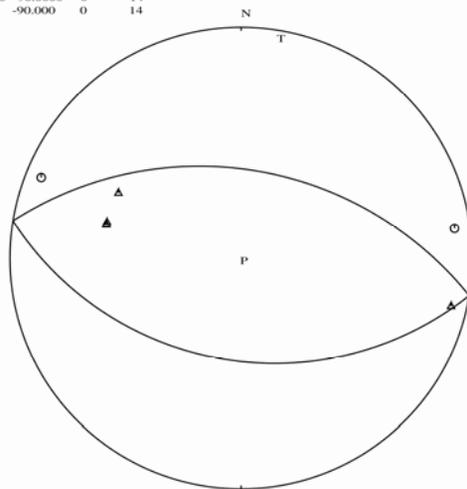
2001 5 9 0858 53.1 L 13.617 -88.748 10.5 SAL 11 0.2 3.4LSAL 3.2CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
43.3300	45.0000	0.0000	2	45
313.33	90.00	135.000	2	45



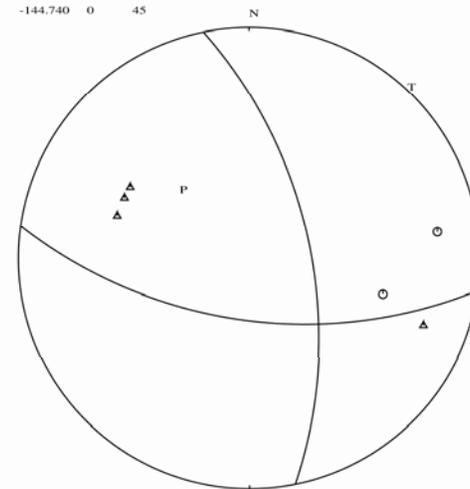
2001 5 9 1028 3.8 L 13.577 -88.621 8.1 SAL 8 0.2 3.4CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
279.3500	48.0000	-90.0000	0	14
99.35	42.00	-90.000	0	14



2001 5 9 1032 4.3 L 13.561 -88.723 10.4 SAL 9 0.2 3.7CSAL

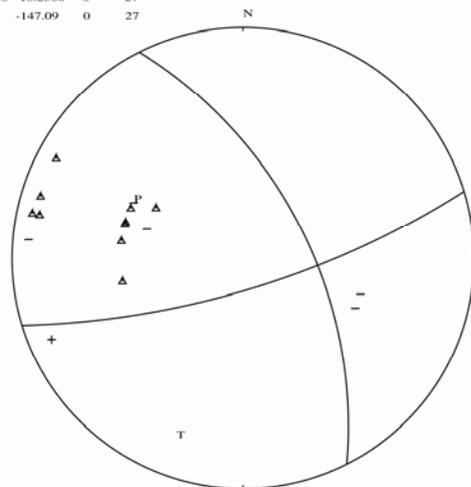
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
348.6000	60.0000	-35.2600	0	45
98.07	60.00	-144.740	0	45



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

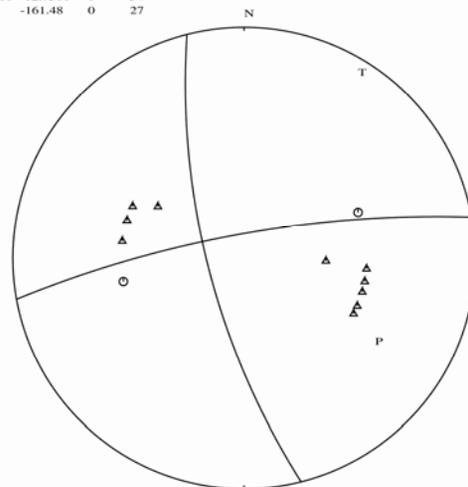
2001 514 1329 34.5 L 13.577 -88.724 2.9 SAL 12 0.2 3.8LSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
333.3000	58.4200	-18.2500	0	27
73.10	74.53	-147.09	0	27



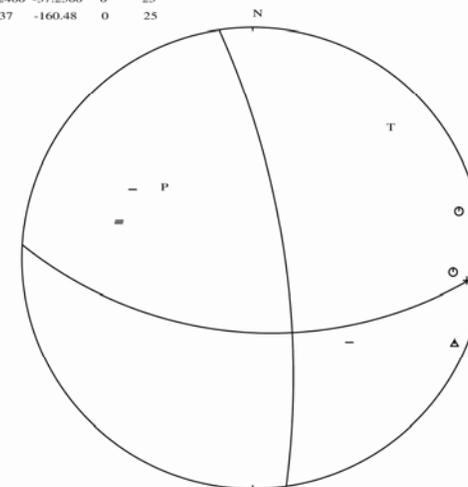
2001 514 1331 51.0 L 13.576 -88.731 5.9 SAL 11 0.2 3.4LSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
165.7100	71.9100	-12.7300	0	34
259.72	77.91	-161.48	0	27



2001 515 1946 47.1 L 13.588 -88.721 8.0 SAL 18 0.2 4.5LSAL 4.4BPDE

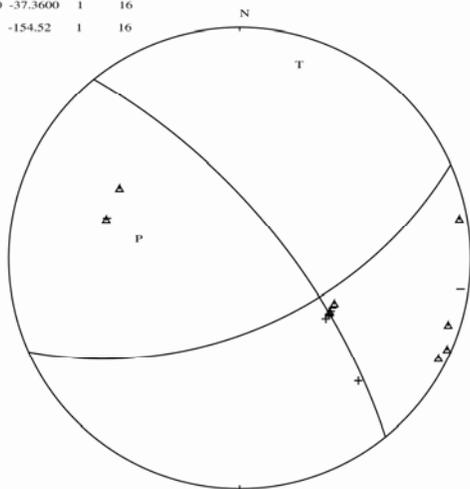
Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
351.6600	74.2400	-37.2500	0	25
93.33	54.37	-160.48	0	25



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

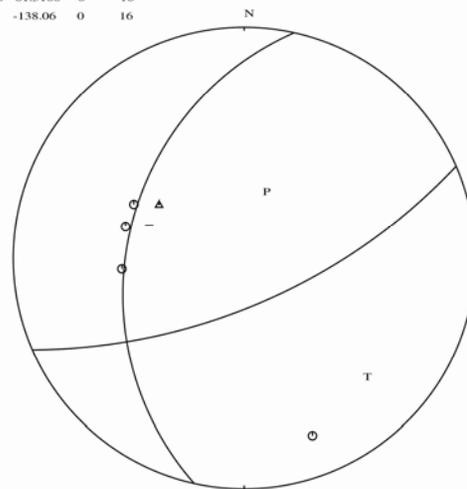
2001 515 2041 40.5 L 13.574 -88.716 6.9 SAL 14 0.2 4.1LSAL 3.8CSAL 4.0BPDE

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
320.8500	69.2300	-37.3600	1	16
65.95	55.52	-154.52	1	16



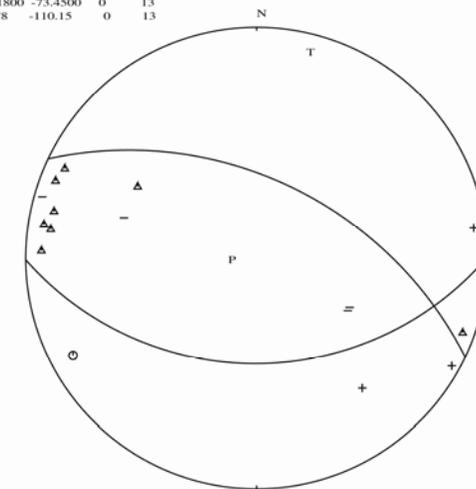
2001 518 0337 31.9 L 13.544 -88.746 3.0 SAL 11 0.2 3.2LSAL 3.2CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
66.5300	66.8000	-61.5100	0	16
192.5	36.12	-138.06	0	16



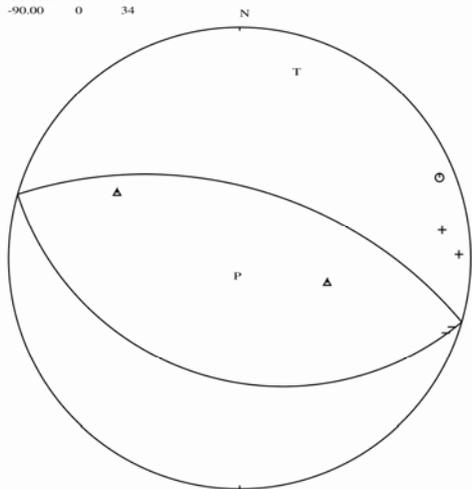
2001 519 0447 5.8 L 13.563 -88.719 7.2 SAL 13 0.2 3.4LSAL 3.2CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
295.4700	52.1800	-73.4500	0	13
89.61	40.78	-110.15	0	13

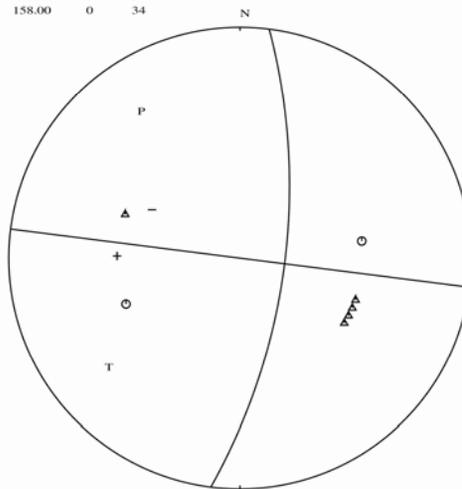


Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

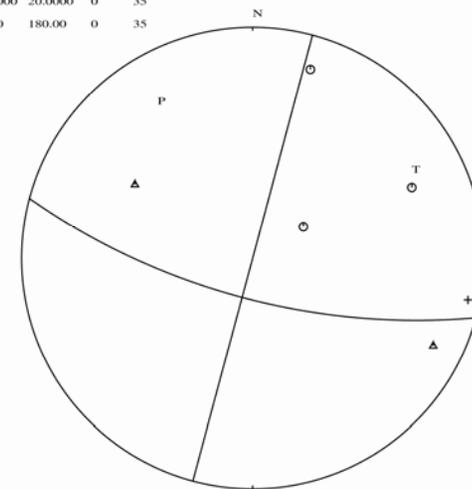
2001 525 0216 4.6 L 13.629 -88.736 7.5 SAL 14 0.2 4.4LSAL 4.0CSAL 4.0BPDE
 Strike Dip Rake Pol: P Grad Bus
 286.0900 56.0000 -90.0000 0 34
 106.09 34.00 -90.00 0 34



2001 525 0244 22.8 L 13.618 -88.760 6.0 SAL 13 0.2 2.5CSAL
 Strike Dip Rake Pol: P Grad Bus
 7.2500 68.0000 0.0000 0 34
 277.25 90.00 158.00 0 34



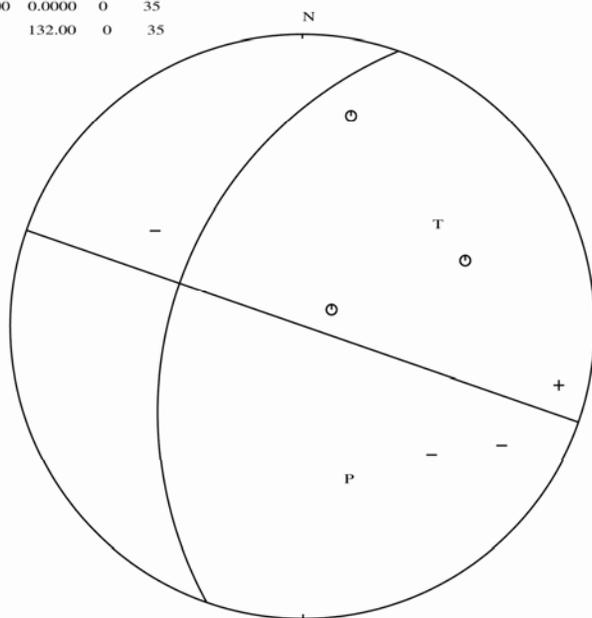
2001 611 2016 48.2 L 13.672 -88.951 7.5 SAL 7 0.2 2.6CSAL
 Strike Dip Rake Pol: P Grad Bus
 195.0000 90.0000 20.0000 0 35
 105.00 70.00 180.00 0 35



Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

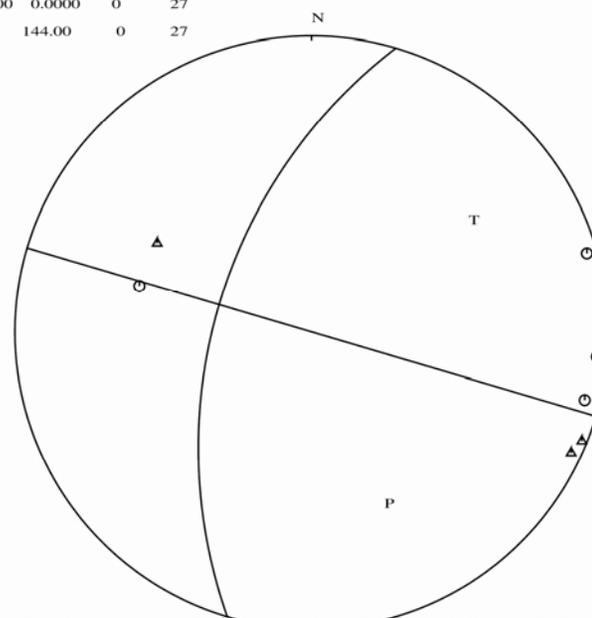
2001 611 2019 32.4 L 13.662 -88.964 8.5 SAL 7 0.2 2.6CSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
199.2300	42.0000	0.0000	0	35
109.23	90.00	132.00	0	35



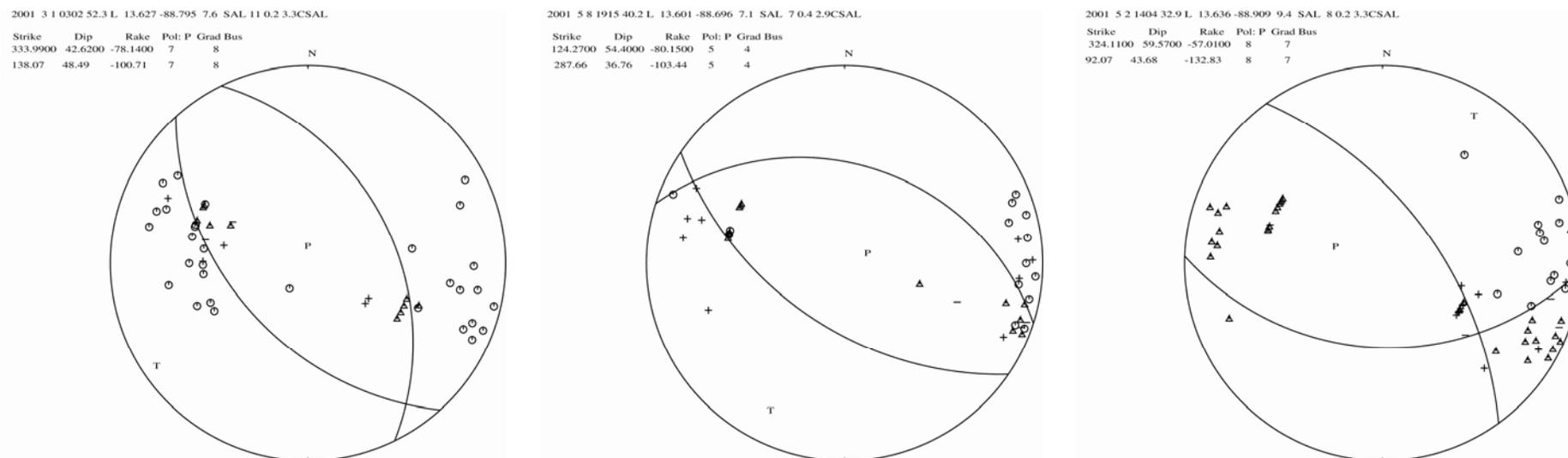
2001 622 1953 55.1 R 13.597 -88.732 6.9 SAL 10 0.2 3.7LSAL

Strike	Dip	Rake	Pol: P	Grad Bus
196.5000	54.0000	0.0000	0	27
105.5	90.00	144.00	0	27

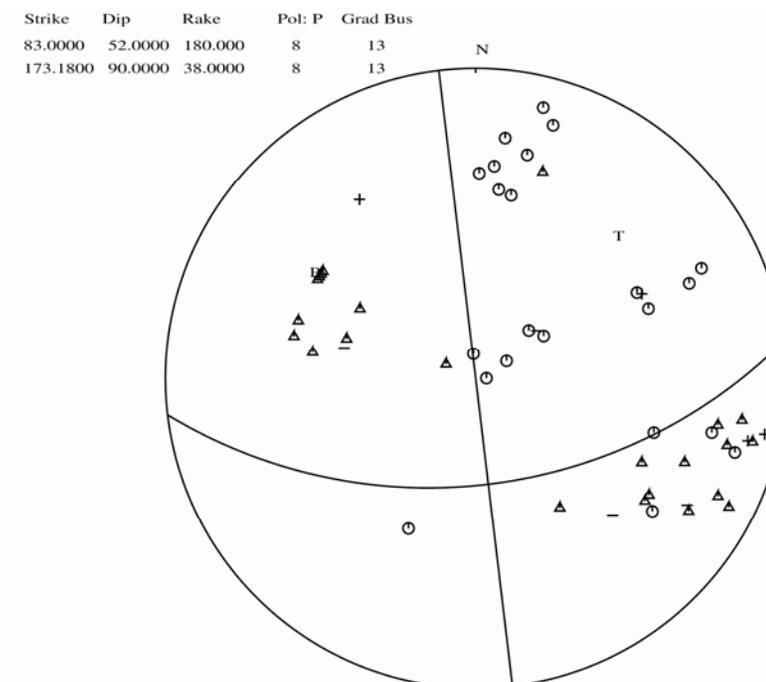
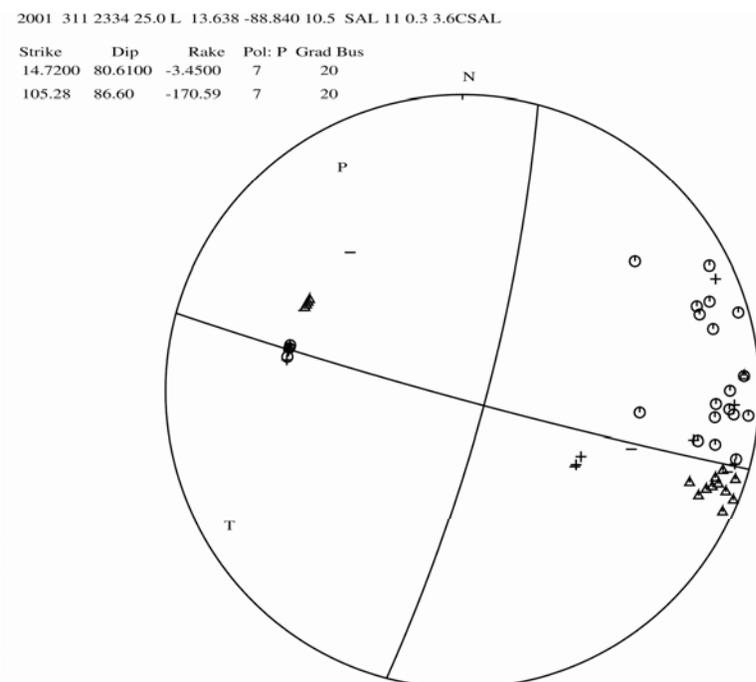


Mecanismo focal simple calculado para el enjambre de 2001

Anexo 8. Mecanismo focal compuesto calculado para el enjambre de 2001



Mecanismo focal compuesto normal calculado para el enjambre de 2001



Mecanismo focal compuesto de desgarre calculado para el enjambre de 2001

Anexo 9. Sismos seleccionados para el mecanismo focal compuesto de 2007-2008

No.	Año	Fecha	HRMM	Sec	Error	Tipo	Latitud	Error	Longitud	Error	Depth	Error	RMS	GAP	Mc	
1	2008	19	457	49.7	0.98	L	13.651	5.9	-88.773	2.8	15	5.9	0.4	152	2.3	SAL
2	2008	19	545	37.3	0.98	L	13.639	4.7	-88.775	1.7	13	258.5	0.4	152	3.1	SAL
3	2008	110	838	18	0.94	L	13.627	4	-88.78	1.6	11.1	3.2	0.3	156	2.8	SAL
4	2008	111	424	40.4	0.9	L	13.618	4.6	-88.779	1.8	7.8	4.8	0.3	159	3	SAL
5	2008	113	334	21.3	1	L	13.663	4.7	-88.779	1.9	13.2	242.9	0.4	145	2.6	SAL
6	2008	114	728	32	0.7	L	13.64	5.1	-88.766	1.6	6.1	4.6	0.3	152	2.6	SAL