



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN TORNO
AL POBLADO DE SANTA GERTRUDIS,
CHIHUAHUA, 2013”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA GEOFÍSICA

P R E S E N T A :

LUZ AURORA SANTIAGO MOCTEZUMA



JURADO EXAMINADOR:

DR. JORGE AGUIRRE GONZÁLEZ (PRESIDENTE)
DR. ANTONIO URIBE CARVAJAL (AVAL, VOCAL)
DR. MIGUEL RODRÍGUEZ GONZÁLEZ (SECRETARIO)
DR. VLADIMIR KOSTOGLODOV (1ER. SUPLENTE)
M. C. DAVID ESCOBEDO ZENIL (2DO. SUPLENTE)

CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F., MAYO 2014

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado para mi familia.

Madre, por tu esfuerzo, por tus desvelos, por tu cariño, apoyo que me has brindado durante toda mi vida.

Hermano, Israel, has sido la inspiración de mis metas y el motor de mis logros, tu apoyo incondicional me ha hecho enfrentar la vida como es. Agradezco a Dios por contar con todo tu apoyo en mi vida.

Mi hermana, Emilia, este trabajo ha salido por el apoyo que me has brindado durante esta etapa final.

A mi padre, Bulmaro. Por guiarme y darme todos los consejos que me han servido de guía.

A mis abuelitos, Q.E.P.D, que por todos sus logros en la vida de ellos, generaron una estabilidad que me transmitieron en cada momento de mi vida escolar, por ustedes, he logrado cumplir esta meta.

Con todo cariño y agradecimiento, para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Jorge por estar conmigo en todo momento, por su cariño, su apoyo, sus palabras, la persona más importante en mi formación profesional.

Un agradecimiento muy especial al Ing. Gustavo Arvizu Lara por parte de Comisión Federal de Electricidad por apoyar a la autorización del uso de la información referida al monitoreo sismológico realizado en Chihuahua. A la empresa, CFE, que me ha servido de escuela pues tan noblemente me permite aprender día a día, la necesidad de dejar lo mejor de mí.

A las personas que revisaron con paciencia este trabajo, Dr. Jorge, Dr. Miguel, Dr. Vladimir, Dr. Antonio, por los comentarios que me sirvieron para mejorar y enriquecer este trabajo.

A todos mis amigos de los que siempre he recibido el apoyo y ánimos para continuar y culminar mis metas, gracias Diana, Gabriela, M. Arturo, Alberto e I. Arturo.

Un agradecimiento especial para el Ing., Sixto, que siempre tuvo confianza y fe en que iba a lograrlo. Q.E.P.D.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde lo más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

San Charbel, se ha cumplido la meta, gracias.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. OBJETIVO Y ALCANCES	3
2. INTRODUCCIÓN.....	3
3. ANTECEDENTES	4
3.1 Área de Estudio y Localización	5
4. GEOLOGÍA Y TECTÓNICA.....	6
4.1 Geología.....	6
4.2 Tectónica.....	7
4.2.1 FALLAS REGIONALES	8
4.2.2 FALLAS LOCALES	10
5. SISMICIDAD HISTÓRICA.....	12
5.1 Bavispe, Sonora (1887)	12
5.2 Parral, Chihuahua (1928)	12
5.3 Valentine, Texas (1931).....	13
6. RED SISMOLÓGICA.....	15
6.1 Instrumentación: Red Densa Temporal (RDT)	16
7. METODOLOGÍA	17
7.1 Modelo de Velocidades y Relación V_p/V_s	19
8. ANÁLISIS SISMOLÓGICO	20
8.1 Actividad Sísmica	20
8.2 Selección de Mejores Epicentros.....	23
8.3 Distribución De Epicentros	25
8.4 Análisis del Campo Magnético Total	28
8.5 Aceleración máxima teórica respecto a M_s	31

8.6	Relación Gutenberg-Richter	31
8.7	Eficiencia de la Red Densa Temporal (RDT)	34
9.	MECANISMOS FOCALES.....	35
10.	PERFILES SÍSMICOS.....	38
	Perfil A-A'	38
	Perfil B-B'	41
	Perfil C-C'	43
11.	CONCLUSIONES	46
APÉNDICE I	51	
	CATÁLOGO SISMOLÓGICO.....	51
APÉNDICE II	57	
	FOTOGRAFICO	57
APÉNDICE III	60	
	MECANISMOS FOCALES	60

RESUMEN

En este trabajo, se presenta un estudio sismológico donde, en función de la sismicidad registrada por el SSN y otras instituciones, se diseñó una red sismológica compuesta por 12 sensores modelo Lennartz LxD con periodo de 5 segundos (frecuencia en respuesta desde los 0.2Hz) que grabaron durante 12 días continuos durante el mes de noviembre.

Del estudio sismológico, se obtuvo un catálogo compuesto de 209 sismos con magnitudes estimadas entre los 0.1 a 3.5, sus profundidades van de los 0.0 a 25.7 km, el valor del RMS va de 0.01 a 2.42 segundos, así como los valores del GAP van de 73 a 349 grados. Debido a que los rangos que resultaron son muy amplios, se realizó una selección de los sismos con un valor de RMS menor o igual a 0.4 segundos, con valor del GAP inferior a 180° y número de fases mayor a 8, el resultado fue de 109 sismos con magnitudes que van de 1.2 a 3.2, y el valor de las profundidades se clasificó en tres secciones: sismicidad somera, entre los 0.3 a 7 km; la sismicidad intermedia, entre 7 a 15 km de profundidad y la sismicidad profunda, entre 16 a 25.6 km de profundidad, estas localizaciones fueron obtenidas usando el software Seisan 10.0.0 y obteniendo valores de magnitudes coda. Además, se realizó un análisis de la confiabilidad de la información donde el error promedio en la Longitud es de 3.8km, en la componente Latitud es de 3.93, y el promedio de error en la componente vertical es de 9.7, y como el valor del RMS es menor a 0.4, se determinó que los datos son confiables. De los sismos seleccionados se buscó una relación con el campo magnético total para asociar el campo magnético de la región con la fuente sismogénica que generó la sismicidad. Se encontró una relación del Dipolo B (nombrado de esta manera en el trabajo) con la sismicidad, sin embargo, se considera sólo una estimación pues este análisis requiere la reducción al polo del campo magnético para definir con una buena precisión esta fuente sismogénica.

De la selección del catálogo, se realizó tres perfiles sísmicos apoyados con la obtención de mecanismos focales para asociar la sismicidad generada, al deslizamiento de una falla nombrada Vallecillo (FV) que en conjunto, forma un graben con la Cuenca El Caballo y del otro extremo, la Falla Peñasco, que en planta, se aprecian dos segmentos, nombrados para este trabajo como FPS1 y FPS2. Este graben, junto con la geología obtenida de diversas fuentes, se encontró que está limitada al norte por el lineamiento Alamos y al sur por la sierra Santa Gertrudis. Esta última falla, en perfiles, aparenta que están unidas. Los esfuerzos obtenidos con los mecanismos focales, indican que son esfuerzos normales donde su echado va aumentando conforme se acerca al sur con la sierra Santa Gertrudis, es decir, la FV tiende a ser vertical. De los 12 días de estudio sismológico, se determinó el valor de b , el cual es 1.7, indicando que la ocurrencia de sismos de magnitud pequeña es mayor que, la ocurrencia de un sismo de una magnitud considerada. Es decir, debido a que la zona se encuentra en un sistema de esfuerzos relajados, donde el material está fracturado, los esfuerzos son menores y esto genera que un sismo de gran magnitud ocurra, además de que la energía se libera por medio de la cantidad de sismos de magnitud pequeña, que se registraron durante este estudio.

ABSTRACT

In this work, a seismic survey where, depending on the seismicity recorded by the SSN and other institutions, a seismological network of 12 sensors Lennartz LxD model with 5 second period (frequency response from 0.2Hz) are designed appears that recorded for 12 consecutive days during the month of November.

Seismological study, a composite catalog of 209 earthquakes with magnitudes estimated between 0.1 to 3.5, its depth range from 0.0 to 25.7 km, the RMS value goes from 0.01 to 2.42 seconds, and the range of values was obtained GAP 73-349 degrees. Because the ranges that they were very large, a selection of earthquakes was performed with an RMS value less than or equal to 0.4 seconds, with a value of less than GAP at 180 ° and greater number of phases to 8, the resulting was 109 earthquakes with magnitudes ranging from 1.2 to 3.2, and the value of the deep was classified into three sections: shallow seismicity between 0.3 to 7 km; intermediate seismicity, between 7-15 km depth and deep seismicity between 16 to 25.6 km depth, these locations were obtained using the software 10.0.0 Seisan and obtaining values of coda magnitudes. In addition, an analysis of the reliability of the information where the average error in length is 3.8km, the Latitude component is 3.93, and the average error in the vertical component is 9.7 was performed, and the value of RMS is less than 0.4, it was determined that the data are reliable. Selected earthquakes a relationship with the total magnetic field was sought to associate the magnetic field in the region with the seismogenic source that generated the seismicity. A ratio of dipole B (named this way at work) with seismicity was found, however, considered only an estimate because this analysis requires the reduction to the pole of the magnetic field to define with good accuracy the seismogenic source

Catalogue selection three seismic profiles supported by obtaining focal mechanisms to associate the seismicity generated, slip of a named Vallecillo (FV) fails which together form a graben basin with Horse and the other end was performed the Peñasco Falla, who plan two segments named for this job as FPS2 FPS1 and appreciated. This graben, with geology obtained from various sources, we found that is bounded on the north by the guideline Alamitos and south by the Sierra Santa Gertrudis. The latter fails, profiles, seems to go together. Efforts obtained focal mechanisms indicate that normal stresses are where your cast is increasing as it approaches the south by the Sierra Santa Gertrudis, the FV tends to be vertical. Within 12 days of seismic survey, the value of b, which is 1.7, indicating that the occurrence of earthquakes of small magnitude is greater than the occurrence of an earthquake of a magnitude considered was determined. That is, because the area is in a system relaxed efforts, where the material is fractured, the stresses are less and this leads to a major earthquake occurs, in addition to the energy released by the amount of small magnitude earthquakes that were recorded during this study.

1.OBJETIVO Y ALCANCES

El objetivo del presente trabajo, es realizar un estudio sismológico en el área que comprende desde Delicias hasta la ciudad de Parral, Chihuahua, con lo cual se desea identificar la distribución epicentral de la sismicidad local de la región. Esta área fue elegida debido a la sismicidad inusual y constante que se origina en esta región asísmica desde finales del mes de agosto del 2013. Por tal motivo, Comisión Federal de Electricidad, CFE, se dio a la tarea de planear una campaña de monitoreo sismológico, para cumplir con tal objetivo, se instaló una red sismológica temporal, la cual consistió en doce estaciones sismológicas portátiles conectados con sensores de periodo corto de componente vertical. Dicha red se mantuvo registrando de forma continua durante el periodo que abarcó del 18 al 29 de noviembre del 2013.

El alcance principal del presente estudio sismológico realizado por Comisión Federal de Electricidad (CFE), es determinar qué genera la sismicidad de la región, si la causa son las fallas regionales. Así como relacionar la sismicidad con alguna fuente sismogeneradora y obtener una descripción detallada de lo que genera la sismicidad. Lo anterior se pretende reforzar con el análisis de los esfuerzos que generan la sismicidad en la zona.

Resultado del estudio sismológico, se generó un catálogo sísmico con los parámetros de localizaciones epicentrales (longitud, latitud, profundidad y magnitud) acontecidos en la región de interés. Además, se pretende conocer el estado de esfuerzos al que se encuentra sometida la zona de estudio con lo cual, se estimaron mecanismos focales con base en la polaridad de los arribos de la onda P en las diferentes estaciones registradas por la red.

Por otro lado, se generaron secciones sísmicas asociándolas a las estructuras geológicas mapeadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), es decir, se identificaron posibles zonas sismogénicas y asociándolas con las estructuras geológicas, las cuales pueden ser las generadoras de la sismicidad en la región.

2.INTRODUCCIÓN

La república mexicana está dividida sísmicamente en cuatro regiones, las cuales se definen de las zonas con mayor actividad sísmica hasta zonas consideradas sin reporte de actividad sísmica relevante. En nuestro caso, el estado de Chihuahua se clasifica en dos zonas, la asísmica y la intermedia, de las cuales, particularizando el área de estudio, el poblado Santa Gertrudis, se localiza en la zona asísmica, lo cual, para la actividad que se presentó durante el 2013, es considerada inusual y, más por el ocurrencia de un sismo de gran relevancia con magnitud de 5.4. Por tal motivo, se concentró el estudio sismológico al norte del poblado Santa Gertrudis con la intención de determinar una posible causa de la actividad sísmica reciente de la zona.

La clasificación anterior se basa principalmente en la sismicidad histórica, la cual, en el presente trabajo se explican los sismos de Bavispe, Son., el sismo de Parral, Chih., y el sismo de Valentine, Tex., los cuales, en su momento, han tenido su aportación a la zona de estudio.

En la actualidad, la repentina aparición de la actividad sísmica en el estado de Chihuahua, ha causado alerta particularmente por los habitantes de la región entre los poblados de Delicias y

Cd. Parral. Esta sismicidad fue registrada y reportada por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y otras instituciones de monitoreo a nivel mundial, tales como el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y el Incorporated Research Institutions of Seismology (IRIS), que han consignado una sismicidad inusual.

Esta actividad sísmica registrada desde finales del mes de agosto hasta la terminación del estudio sismológico, han reportado un número de sismos aproximadamente mayor a 151, en un lapso de tiempo menor a tres meses, concentrándose alrededor del poblado Santa Gertrudis, Chihuahua.

Esta actividad sísmica fue analizada previamente antes de construir la configuración de la Red Densa Temporal (RDT) permitiendo definir un área de estudio inicial donde se busca que su distribución encierre a la zona sismogénica. La red se evaluó conforme fueron obteniendo los primeros registros sísmicos, de tal forma que fue adecuándose a la zona donde se observó la actividad sísmica, así se muestran en los resultados y en el catálogo de epicentros final mostrado en el Apéndice I.

La información obtenida de registros sísmicos fue un resultado de 209 en un periodo de monitoreo de 12 días, ésta acusa la concentración de actividad sísmica en torno al poblado de Santa Gertrudis. Estas localizaciones fueron obtenidas con el programa Seisan, así como los mecanismos focales que se muestran en el presente trabajo. Con dicha información, se realizaron perfiles sísmicos con la finalidad de realizar un análisis a profundidad y poder generar una interpretación que también esta soportada por los mecanismos focales.

3. ANTECEDENTES

El estado de Chihuahua se divide en dos regiones: la zona asísmica (lado Este del estado) y la zona sísmica intermedia (lado Oeste del estado). La zona intermedia es considerada de esta manera cuando no ocurren frecuentemente temblores de magnitudes considerables, por ejemplo, se tiene el conocimiento y registros históricos de la ocurrencia de dos grandes terremotos ocurridos dentro del país, el temblor localizado cerca del poblado de Bavispe, Sonora (1887) con magnitud de 7.4 y el temblor de Parral, Chihuahua (1928) con magnitud de 6.4. Y un tercer e importante temblor para la zona, ocurrido en los E.E.U.U., en la población de Valentine, Texas (1931) con magnitud de 6.3. Estos sismos, en su momento, dejaron evidencia en los testimonios de personas y en daños estructurales que sirvieron como evidencia para algunos autores en la generación de mapas de isointensidades para estos sismos. En el sismo de Parral se registraron intensidades máximas de VII, en escala de Mercali modificada dentro del área de estudio (Doser y Rodríguez, 1993). En el sismo de Bavispe (Sbar y DuBois, 1984), se registran intensidades de V a VI, en escala de Mercali modificada. En el caso del sismo de Valentine, se estimaron intensidades de II a IV para el área de estudio. Estos sismos se describirán más adelante pues sus magnitudes fueron relevantes para el Estado de Chihuahua.

La zona asísmica, es considerada de este manera debido a que no existen registros históricos ni instrumentales de un sismo de magnitud considerable ocurrido en esa región, en la actualidad, diversas instituciones como lo son SSN, USGS e IRIS han reportado escasa actividad sísmica en la región Este de Chihuahua desde el año 1975 hasta el 2012 donde dicha actividad se concentra hacia la porción norte del Estado muy cercana al sismo de Valentine, Tex. Así también, muy escasamente hacia la sierra Madre Occidental límite oriental del Estado. Sin embargo, en el mes de agosto del 2013, se ha presentado una actividad sísmica inusual debido

a que desde finales del mes de agosto hasta el 21 de septiembre, el SSN reportó 55 sismos con magnitudes que van desde 3.2 hasta 4.8. Posteriormente, se presentó el sismo de mayor magnitud para esta zona que se fue delimitando conforme ocurría la actividad sísmica, este sismo ocurrió el 21 de septiembre a las 7:16 hora centro con una magnitud de 5.4, localizado a 5.5 kilómetros al NW del poblado de Santa Gertrudis, en la cuesta de la Sierra El Vallecillo, y su réplica fue de magnitud 4.9 a las 7:42 hora del centro a una profundidad de 2 km, localizado a 53 km al suroeste de Delicias, Chih. Finalmente, desde que comenzó la actividad sísmica hasta la edición del presente trabajo, el SSN tiene reportado al menos 151 sismos con magnitudes de 3 hasta 4.9 (sin tomar en cuenta el sismo de $M=5.4$ para visualizar las magnitudes registradas), (<http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/catalogo1.jsp>).

Se considera que generalmente la sismicidad regional es causada por el movimiento de las placas tectónicas y ésta ocurre en los límites de las mismas. Sin embargo, existen otras fuentes generadoras de temblores, entre ellas se estima los movimientos de fallas geológicas locales y quizá sea el motivo y principal influencia para nuestro análisis sísmico. Las principales estructuras son la Falla La Babia (Charleston, 1981), que atraviesa el Norte de Coahuila, La Falla San Marcos ubicada en el centro de Coahuila y la Megacizalla Mojave-Sonora que se considera desde Tamaulipas hasta parte de Chihuahua (Anderson y Schmidt, 1983; McKee et al., 1984, 1990). Sin dejar a un lado que las fallas locales, no han presentado alguna actividad relevante.

Por lo que el presente estudio sísmico se realiza con la finalidad de conocer la actividad que está en torno al poblado de Santa Gertrudis con el antecedente de sismo de gran importancia de $M=5.4$ y con la actividad sísmica que fue definiendo el área de estudio utilizada en este trabajo.

3.1 ÁREA DE ESTUDIO Y LOCALIZACIÓN

El poblado de Santa Gertrudis se localiza en la parte noroeste de la República Mexicana, en el estado de Chihuahua, aproximadamente a 50 km al sur de la ciudad de Delicias, sobre la provincia fisiográfica de Sierras y Valles de Chihuahua. Esta área colinda al oeste con la Sierra Madre Occidental, al norte con la ciudad de Chihuahua, al sur con el estado de Durango y por último aproximadamente a 65 km al este, colinda con el estado de Coahuila, ver figura 3.1.

La vía de acceso principal al área de estudio en su parte sur es por la carretera Federal No. 49 que comunica a Torreón, Coahuila con el poblado de Ciudad Jiménez, Chihuahua. El recorrido para la instalación y mantenimiento de los equipos se realizó, en su flanco este, por la carretera federal número 45 que lleva a Santa Rosalía, Chihuahua. En su flanco sur, por la carretera federal número 45 que lleva a Hidalgo de Parral, Chihuahua. Para cubrir el flanco oeste del área de estudio, se tomó la carretera federal número 24 que lleva a Valle de Zaragoza Chihuahua. Por último, para cubrir el flanco norte, se tomó la carretera número 22. En la figura 3.1 se muestra la ubicación del área de estudio, la cual fue determinada con los antecedentes de sismicidad de las instituciones previamente mencionadas. En esta figura se aprecia en un recuadro rojo, el área donde se encierra los sismos en la región.

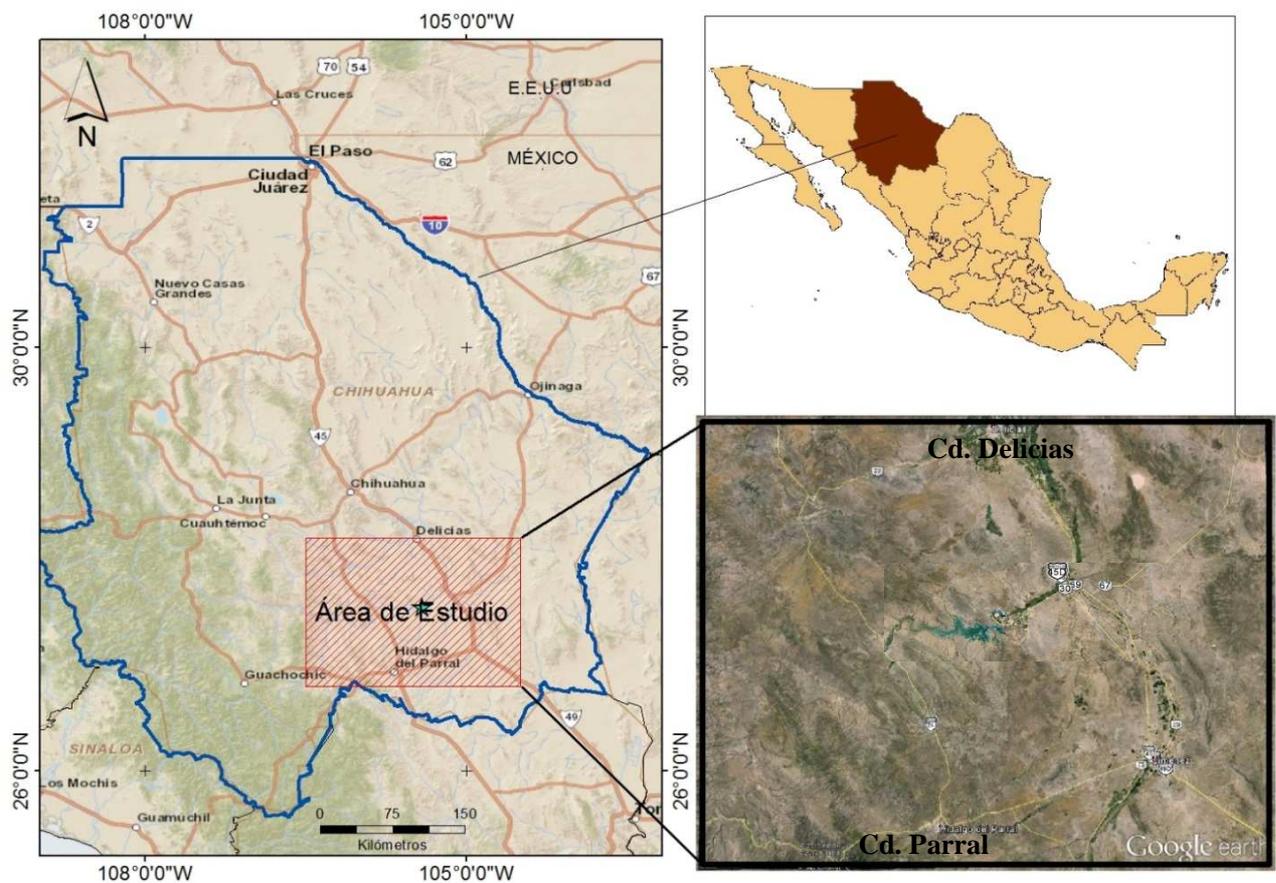


Figura 3.1. Ubicación del área de estudio. A la izquierda se muestra la localización del área de estudio que encierra la sismicidad publicada por el SSN (polígono rojo); en la derecha parte inferior, se aprecia a detalle, el área de estudio.

4.GEOLOGÍA Y TECTÓNICA

4.1 GEOLOGÍA

El área correspondiente al estado de Chihuahua se caracteriza por la presencia de montañas, resultado del plegamiento de la corteza y formadas por las secuencias marinas mesozoicas. Estas montañas constituyen prominencias topográficas que se encuentran separadas por grandes llanuras que surgieron al rellenarse fosas tectónicas con sedimentos continentales y algunos derrames de lava, dando origen a cuencas endorreicas. La mayor parte de las rocas sedimentarias plegadas que afloran en el área evolucionaron sobre un basamento paleozoico y precámbrico que aflora en algunas localidades.

Las rocas paleozoicas que afloran ampliamente en territorio de Texas, tienen en México muy pocos afloramientos, por lo que resulta difícil reconstruir los elementos paleogeográficos.

González (1976) considera que los afloramientos de calizas y dolomías del paleozoico inferior en Chihuahua reflejan un ambiente de plataforma similar a las facies desarrolladas sobre el cratón de Norteamérica, por lo cual considera lógica la continuación de este elemento hacia México.

Se tomó la información de las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM) de escala 1: 250 000 que se encuentran disponibles en su página de internet. Así se utilizaron las cartas de Chihuahua H13-10, Ciudad Delicias H13-11, San Juanito G13-1 y Ciudad Camargo G13-2, ver figura 4.1.

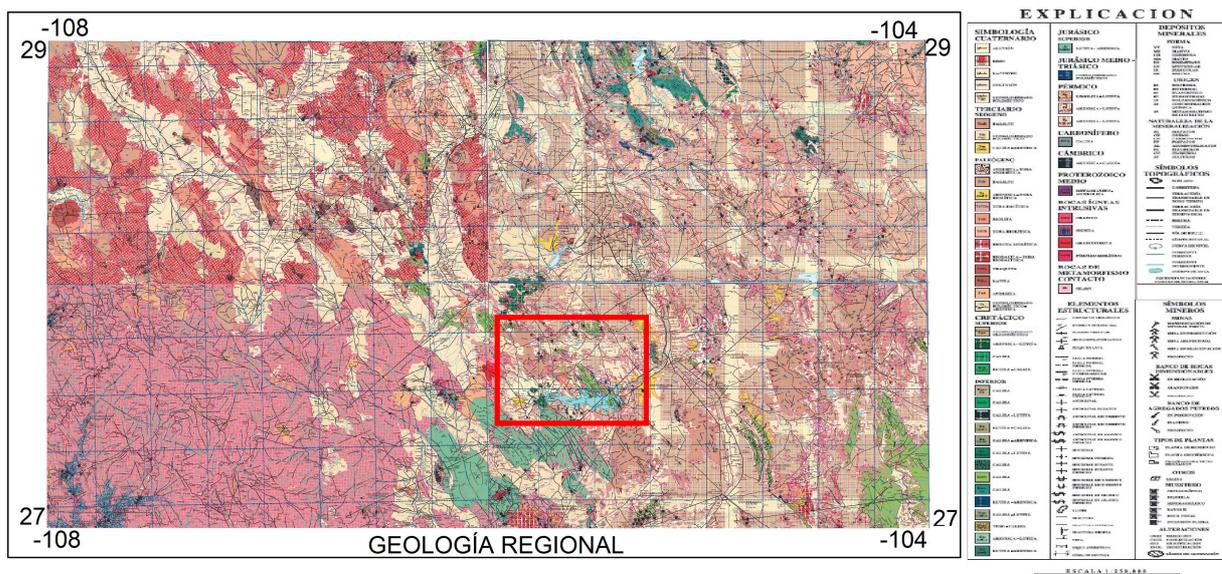


Figura 4.1. Muestra un panorama general de la geología regional para Chihuahua. El recuadro color rojo indica el área de estudio inicial.

4.2 TECTÓNICA

El área de estudio se encuentra en la provincia tectónica conocida como Cuencas y Sierras (Basin and Range), esta provincia se extiende desde Canadá, pasando por todo lo largo de la margen occidental de América del Norte y llegando hasta la parte central del norte de México. Algunos autores (Henry y Aranda-Gómez, 1992; Stewart, 1998) proponen que esta provincia pudo haberse extendido hacia el sur de México antes de la formación del Cinturón Volcánico Trans-mexicano.

La extensión de terreno que comprende la provincia de Sierras y Cuencas es de 500 a 800 km de ancho, con elevaciones promedio de 1,500 m.s.n.m., aunque existen elevaciones muy locales que sobrepasan los 3,600 m.s.n.m.

La región que ha sido afectada por la actividad de la provincia ha experimentado extensión de aproximadamente 10 a 35%, aunque hay algunos lugares donde se ha registrado hasta el 100% de extensión (Stewart, 1998); siendo el 100% de extensión, cuando cae completamente el bloque y se forma la cuenca. A partir de este dato Stewart hace una escala para los demás porcentajes. Esta extensión se reflejó en movimientos casi verticales a través de fallas normales (comúnmente lítricas; Stewart, 1998) que bascularon a los bloques y formaron altos y bajos

estructurales (horsts y grabens) que corresponden con las sierras y valles típicos de esta provincia. Según varios autores (McKee, 1971; Christiansen y Lipman, 1972; Noble, 1972), esta extensión empezó en el oriente de EUA durante el Cenozoico temprano y posiblemente reactivó las estructuras pre-existentes mesozoicas y terciarias.

De acuerdo al trabajo de Stewart (1978), el origen de esta provincia aún se encuentra en discusión y se han propuesto varias teorías, de las cuales cuatro son las más sobresalientes:

- La primera teoría relaciona la extensión a una fragmentación tensional oblicua dentro de un cinturón amplio de movimiento lateral derecho, distribuyéndose así a lo largo del lado occidental de Norteamérica. Se supone que este movimiento es producto de la actividad del sistema de falla de San Andrés, que provocó la fragmentación cortical por tensión y extensión, dando lugar a estructuras tipo cuencas y sierras (Carey; 1958; Wise, 1963; Shawe, 1965; Hamilton y Myers, 1966; Sales, 1966 y Slemmons, 1967).
- La segunda teoría es más simple, ya que solamente relaciona la extensión con la actividad extensional en la región tras-arco volcánico para la margen de subducción activa (Karig, 1971, 1974; Mastuda y Uyeda, 1971).
- La tercera teoría está relacionada con la separación lateral de los flancos de la dorsal del Pacífico oriental, el cual, se extiende bajo el borde occidental de Norteamérica (Menard, 1960; Cook, 1969; McKee, 1971; Gough, 1974); sin embargo, estudios recientes descartan ésta posibilidad. Además, la dorsal del Pacífico oriental es considerada como un participante pasivo de la separación de las placas y no un mecanismo que impulsa a este proceso (Atwater, 1970).
- La cuarta teoría asume que la extensión se debe a la convección del manto en un sistema de plumas.

Independiente a la hipótesis que se acepte como cierta, lo que es seguro es la acción de los esfuerzos en extensión que afecta tanto a la cubierta sedimentaria como al basamento.

4.2.1 FALLAS REGIONALES

Existen tres fallas regionales que han sido identificadas: Falla La Babia (Charleston, 1981), que atraviesa el Norte de Coahuila, La Falla San Marcos, localizada en el centro de Coahuila y la Megacizalla Mojave-Sonora (Anderson y Schmidt, 1983; McKee et al., 1984, 1990), como se muestran en la figura 4.2.

Falla La Babia

La Falla La Babia, propuesta inicialmente por Charleston (1974, 1981), tiene una orientación NW-SE y es el límite norte de la Cuenca de Sabinas (Figura 3.2). La Falla La Babia es una falla de basamento que durante el Mesozoico controló el paleorelive y la distribución de litofacies en la cuenca de Sabinas (Padilla y Sánchez, 1982, 1986; Salvador, 1987, 1991a, 1991b, 1991c, Goldhammer et al., 1991; Wilson y Ward, 1993 y Goldhammer, 1999). La Falla La Babia sigue hasta la cuenca de Chihuahua y atraviesa el lineamiento de Alamitos (Haenggi, 2001). La falla La Babia separa a zonas con estilos de deformación muy marcados y contrastantes: al norte el cratón de Coahuila-Texas y al sur el Cinturón Plegado de Coahuila (Padilla y Sánchez, 1982).

Falla San Marcos

La Falla San Marcos (FSM) es una estructura de basamento regional con un rumbo WNW que buza hacia el NNE (Chávez-Cabello et al., 2005). Padilla y Sánchez (1982) se refiere a ésta misma estructura como el Lineamiento Sierra Mojada-China, Nuevo León, e infieren un movimiento lateral-izquierdo asociado a ella. La traza de la falla se puede seguir en la superficie a lo largo de 300 km en el centro de Coahuila en donde afecta a rocas sedimentarias marinas del Mesozoico. Se ha propuesto que la FSM se formó antes del Tithoniano y que ha tenido cuatro reactivaciones importantes hasta la fecha (Chávez-Cabello et al., 2005 y Aranda-Gómez et al., 2005), ver figura 4.2.

La primera reactivación de la FSM sucedió durante el Cretácico temprano. Esta reactivación fue documentada en un principio por McKee et al. (1990) quienes reportaron el depósito de la Formación San Marcos, con un depósito que se identificó a lo largo de toda la traza de la FSM y que sugiere un movimiento normal principalmente. Posteriormente, Chávez-Cabello y colaboradores (2005), también documentaron ésta reactivación por medio de análisis estructural en fallas encontradas en la Formación San Marcos. Además, encontraron que estas fallas no cortan el contacto superior de la Formación San Marcos, lo cual restringe su reactivación al Neocomiano y apoya la hipótesis de un evento de extensión importante durante el Cretácico temprano y el crecimiento de la cuenca de Sabinas en ese lapso.

La segunda reactivación sucedió durante la orogenia Laramide, donde la FSM invirtió su sentido de movimiento a una falla de componente inversa. Varias fallas secundarias de la FSM, también muestran este comportamiento estructural. La reactivación ocurrió en el Paleógeno y se evidencia porque la cuenca de Sabinas se invirtió para formar el Cinturón Plegado de Coahuila (Chávez-Cabello et al., 2005).

Las siguientes reactivaciones de la FSM posteriores a la orogenia Laramide, no son del todo claras. Sin embargo, de acuerdo con Aranda-Gómez y colaboradores (2005) en la región del campo volcánico de Camargo, existen evidencias de al menos dos eventos que confirman la reactivación de la FSM durante el Cenozoico tardío. Cabe señalar que Aranda-Gómez y colaboradores (2005) también propusieron que la traza de la falla puede extenderse otros 300 km hacia el NW hasta el pueblo de Villa Aldama, Veracruz. Sin embargo, el segmento ubicado entre Sierra Mojada, Coahuila y Villa Aldama, Veracruz, yace debajo de una cubierta gruesa de rocas volcánicas del Terciario medio, asociadas a la Sierra Madre Occidental que en ésta región es anómalamente ancha, en comparación con las zonas adyacentes (Aranda-Gómez et al., 2003).

Márquez-Azuá y DeMets (2003) a partir de mediciones continuas de GPS en las estaciones situadas en las ciudades de Chihuahua, Tampico y Monterrey observaron variaciones en los desplazamientos residuales entre 1.4 y 3.0 mm/año con dirección hacia el SE, siguiendo el patrón actual de extensión de la provincia de Cuencas y Sierras.

Megacizalla Mojave-Sonora

En un principio la megacizalla Mojave-Sonora fue propuesta por Silver y Anderson (1974) como una falla con orientación NW-SE que acomodó 700 a 800 kilómetros de corrimiento lateral izquierda y que estuvo activa durante el Jurásico medio a tardío. La estructura se extiende desde el desierto de Mojave, en California, EUA y cruza el norte de México hasta unirse con la dorsal del Golfo de México (Anderson y Schmidt, 1983), pero fue hasta más tarde cuando

Anderson y Silver (1977a; 1977b; 1978 y 1981) documentaron evidencias de que los bloques que separan esta falla (al norte y sur), tienen diferentes edades e historias geológicas, ver figura 4.2.

Lineamiento Alamitos

Se considera como un lineamiento a un rasgo topográfico de extensión regional que puede reflejar la estructura de la corteza. Haenggi (2001), designa esta estructura desde el estado de Texas y hasta lo largo del arroyo "Alamitos Creek", estructura que bautizó como "Lineamiento Alamitos". Este lineamiento es definido por imágenes satelitales que muestran una clara diferencia en coloración, además de mapas con configuraciones de anomalías gravimétricas de aire libre, así como las diferencias magnetométricas de campo total del Estado de Chihuahua y cambios abruptos de geología que son evidencias mostradas por Franco-Rubio (2002) de cambio de coloración que acusa una dirección N65°E en función al cambio de color de las litologías dominantes (volcánica al sur y calcárea marina al norte).

4.2.2 FALLAS LOCALES

Las fallas locales obtenidas de la carta geológica Ciudad Camargo (G13-2) del Servicio Geológico Mexicano (SGM) muestran, para el área de estudio, una falla principal alienada a la Sierra El Vallecillo con orientación NW y con un buzamiento hacia la cuenca El Caballo, a esta falla se le ha nombrado para el análisis del presente trabajo, como Falla Vallecillo (FV Otra falla que se observa alineada con la Sierra El Peñasco es la nombrada Falla Peñasco (FP) que se presenta en dos segmentos (1 y 2) y con fines descriptivos se llamaron como Falla Peñasco segmento 1 (FPS1) y Falla Peñasco segmento 2 (FPS2), las cuales presentan una orientación aproximada de N68°W con buzamiento hacia la cuenca El Caballo, ver figura 4.2. Los echados que presentan estas fallas (FV y FP) acusan la presencia de un graben estructural en la zona.

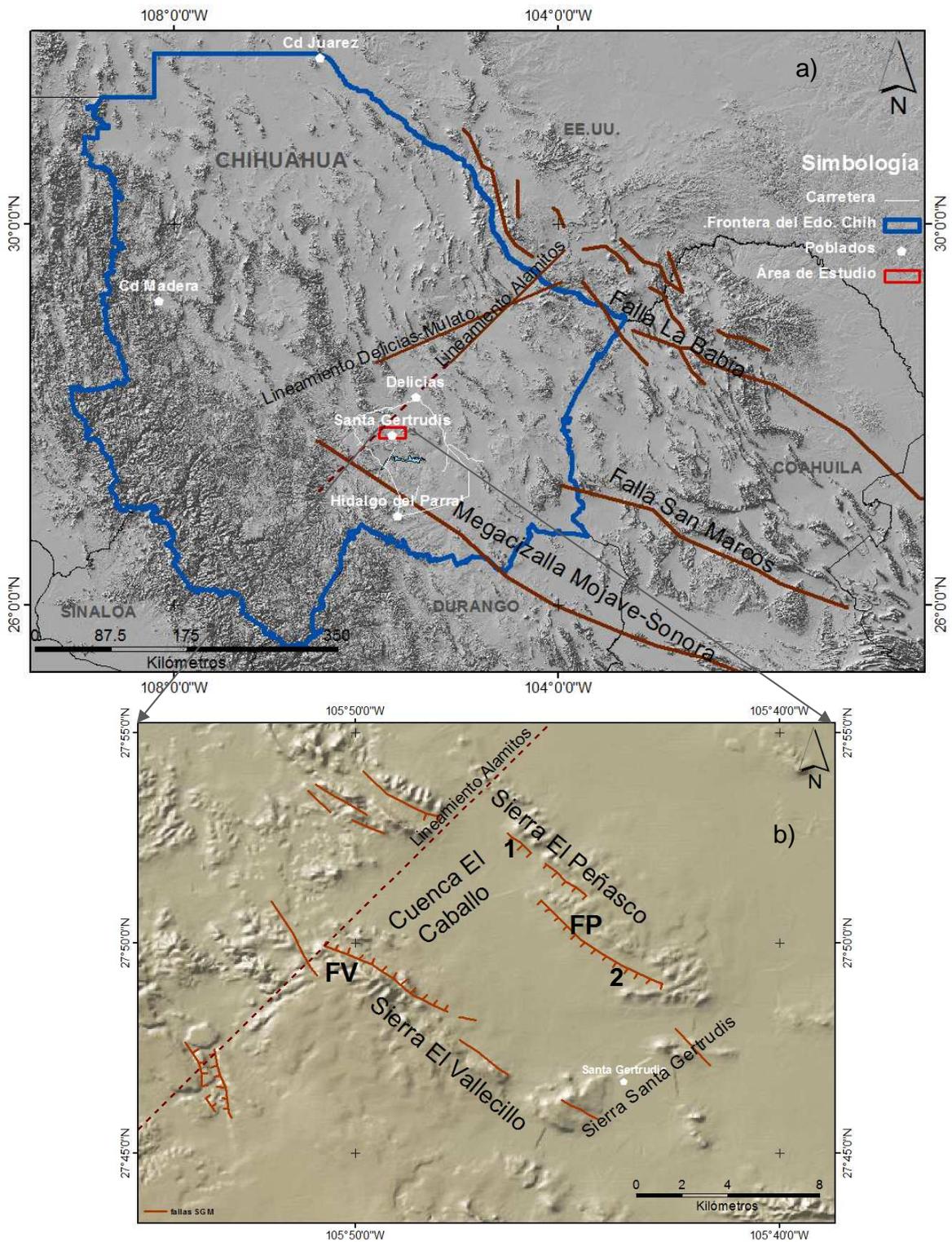


Figura 4.2. a) Fallas regionales que se presentan en el estado de Chihuahua (Galván-Ramírez y Montalvo-Arrieta, 2008) y lineamiento Alamitos. b) Fallas locales nombradas para el presente trabajo como: FV, Falla Vallecillo; FP, Falla Peñasco, con segmentos 1 y 2. Línea punteada, Lineamiento Alamitos, Franco-Rubio (2002).

5. SISMICIDAD HISTÓRICA

En el análisis sismológico realizado en el presente informe, es necesario tener en cuenta que la sismicidad histórica de la región, ayuda en el entendimiento sismotectónico de la zona. Como se ha comentado la región presenta una sismicidad moderada a escasa, no obstante, en los alrededores de la región se tiene el conocimiento que han ocurrido tres sismos con magnitudes mayores a 6. El sismo más antiguo fue el que ocurrió en 1887 y el epicentro fue ubicado cerca del pueblo de Bavispe, Sonora, la magnitud del evento se consignó en los 7.4 (Natali y Sbar, 1982). El segundo sismo ocurrió en el año de 1928 cerca del pueblo de Parral, Chihuahua, cuya magnitud alcanzó los 6.3 (Doser y Rodríguez, 1993). El tercer sismo ocurrió en el año de 1931 próximo al pueblo de Valentine, Texas cuya magnitud se calculó en 6.4 (Doser, 1987). En la sismicidad ocurrida en el estado, el SSN cuenta con registros instrumentales desde 1975 al 2013, donde hasta el 2012 se registraron 44 sismos, mientras que en el 2013, se registró tan solo 160 sismos que se concentran en lo que CFE definió como un área de estudio sismológico. De esta sismicidad, el sismo de mayor relevancia, fue el ocurrido el 21 de septiembre del 2013 con magnitud de 5.4 a pocos días después que comenzara a registrarse la sismicidad inusual del estado. A continuación se muestra la localización de éstos sismos históricos, ver figura 5.1.

5.1 BAVISPE, SONORA (1887)

El sismo ocurrió el 3 de mayo de 1887 y es considerado el temblor intraplaca más grande que se haya registrado en Norteamérica. La longitud de ruptura fue de 80 km en superficie, 16 km a profundidad y un promedio de 3 m de desplazamiento. Para este sismo se calculó el momento sísmico (1.27×10^{27} dinas*cm) correspondiente a $M_s=7.4$. Natali y Sbar (1982) registraron microsismicidad en el Valle de San Bernardino durante el periodo de 1978 y 1979 reportando un fallamiento normal con rumbo N25°E y buzamiento entre los 70° y 80° al NW, la mecánica de esta ruptura coincide con el fallamiento normal Pitaycachi, caracterizado con microsismicidad cuyas magnitudes no sobrepasaron los 2 y profundidades menores de 30 km.

De las curvas de igual intensidad (Sbar y Dubois, 1984) para el sismo de Bavispe, se muestra que las intensidades de V, VI y VII son largadas y muestran una alineación NW-SE con la Sierra Madre Occidental, para el área de estudio se estimaron intensidades de III y IV, ver figura 5.1 que de acuerdo con la relación entre intensidades y aceleración correspondería al intervalo de 3 a 7 cm/s^2 valores que se consideran en el límite perceptible de las personas.

5.2 PARRAL, CHIHUAHUA (1928)

Este sismo es uno de los más grandes (magnitud=6.3) que se ha reportado para esta zona. El epicentro se asoció con un sistema de fallas normales de orientación noroeste-sureste, localizada en el borde de la Sierra Madre Occidental (SMO), ver figura 5.1.

El evento fue registrado en estaciones de Asia y Sudamérica y con estos registros se modeló la inversión de las ondas P y S obteniendo como resultado una falla con azimut de $135 \pm 248^\circ$, buzamiento de $48 \pm 14^\circ$, ángulo de deslizamiento de $-50 \pm 18^\circ$, profundidad de 10 ± 3 km y un momento sísmico de $3.2 \pm 1.0 \times 10^{25}$ [dinas*cm]. Este sismo tuvo un área de ruptura aproximada de 9 ± 2 km, el promedio de deslizamiento en profundidad es de 80 cm y el deslizamiento vertical menor a 40 cm. Es difícil estimar el área total que el sismo de Parral afectó por la escasa

información al sur del epicentro. Se estimó de 360 000 km², comparado con una estimación de 450 000 km² para el sismo de Valentine, Doser and Rodriguez (1993).

La solución al mecanismo focal consistió de la combinación entre la falla de tipo normal y de rumbo; se sugiere la orientación de extensión hacia el este-oeste, sin embargo, también fue posible asignar una orientación hacia el noreste-suroeste; aunque las direcciones mostraron gran incertidumbre por el escaso control. Esta orientación no es similar en los límites al norte entre México y Estados Unidos, pero es similar a una tercera parte de las medidas realizadas en Coahuila. El plano nodal de rumbo noroeste-sureste es el más consistente con los lineamientos locales de fallas normales y con la dirección de la SMO, mientras que el plano con orientación este-oeste no ha podido ser relacionado a la tectónica local (Ibídem, 1993).

Las distribución de las curvas de igual intensidad mostrado por Doser (1993) para el sismo de Parral, mostraron que las intensidades registradas para el área de estudio fueron de VI y VII, las cuales son significativas considerando el sismo de magnitud de 6.3, ver figura 5.1. Las aceleraciones consignadas de acuerdo con las intensidades, se dieron en el intervalo de 31 a 68 cm/s² las cuales pueden causar daños a construcciones.

5.3 VALENTINE, TEXAS (1931)

El epicentro del sismo (magnitud de 6.4) de Valentine, Tex. Este sismo no presentó evidencia superficial. Se tiene evidencia de sismicidad en Texas donde se han documentado fallas de origen cuaternarias (Doser et al., 1987). Por lo que, este sismo fue asociado a la Falla Mayfield, la cual, por sus características es capaz de producir sismos en un rango de magnitud sísmica de 6.4 a 7.5. Sus isosistas fueron estimadas de II o III en la escala de intensidad Mercalli modificada para el área de estudio.

En comparación de los sismos de Parral y Valentine, en este último fueron precedidos por evidentes precursores que sucedieron en un lapso menor de 2 a 3 horas del evento principal. Se observó un incremento significativo del flujo de agua subterránea después del evento de Parral.

En la figura 5.1, se presenta la sismicidad del periodo de 1975 al 2013 y se puede apreciar en círculos en color morados la sismicidad instrumental de ese periodo. La mayoría ocurrieron al norte del país, posiblemente relacionada al sistema de fallas que ocasionó el sismo de Valentine, Texas; otros sismos que caen en los límites de la Sierra Madre occidental y otros que caen dentro del sistema de Cuencas y Sierras del estado de Chihuahua. Este panorama general histórico de la sismicidad instrumental tiene relevancia para mostrar que la actividad sísmica ocurrida en el Estado, no es muy recurrente, pues hasta el 2012 la sismicidad se concentraba en el norte, en términos generales y recientemente, se ha acumulado al sur del mismo estado. Precisamente los epicentros hacia el sur de Chihuahua marcaron la distribución de estaciones sismológicas alrededor tratando de cubrir la zona, ver figura 5.1, definiendo así la red temporal.

De la figura 5.1, las líneas de isointensidades del sismo de Bavispe, Son., se desplazan con mayor facilidad sobre la zona de cuencas y sierras que por la Sierra Madre Occidental. Así como las líneas de isointensidades del sismo de Valentine, Tex., tienden a detenerse hasta encontrarse con la SMO, mientras que, cuando se encuentra en la zona de Cuencas y sierras del estado, se expanden las intensidades. En general, estas las curvas de isointensidades, presentan el mismo lineamiento que tiene la Sierra Madre occidental como la zona de Cuencas y Sierras, la cual es noroeste. Las curvas de isointensidades del sismo de Parral, tienden a expandirse en la zona de Cuencas y Sierras antes que expandirse sobre la SMO.

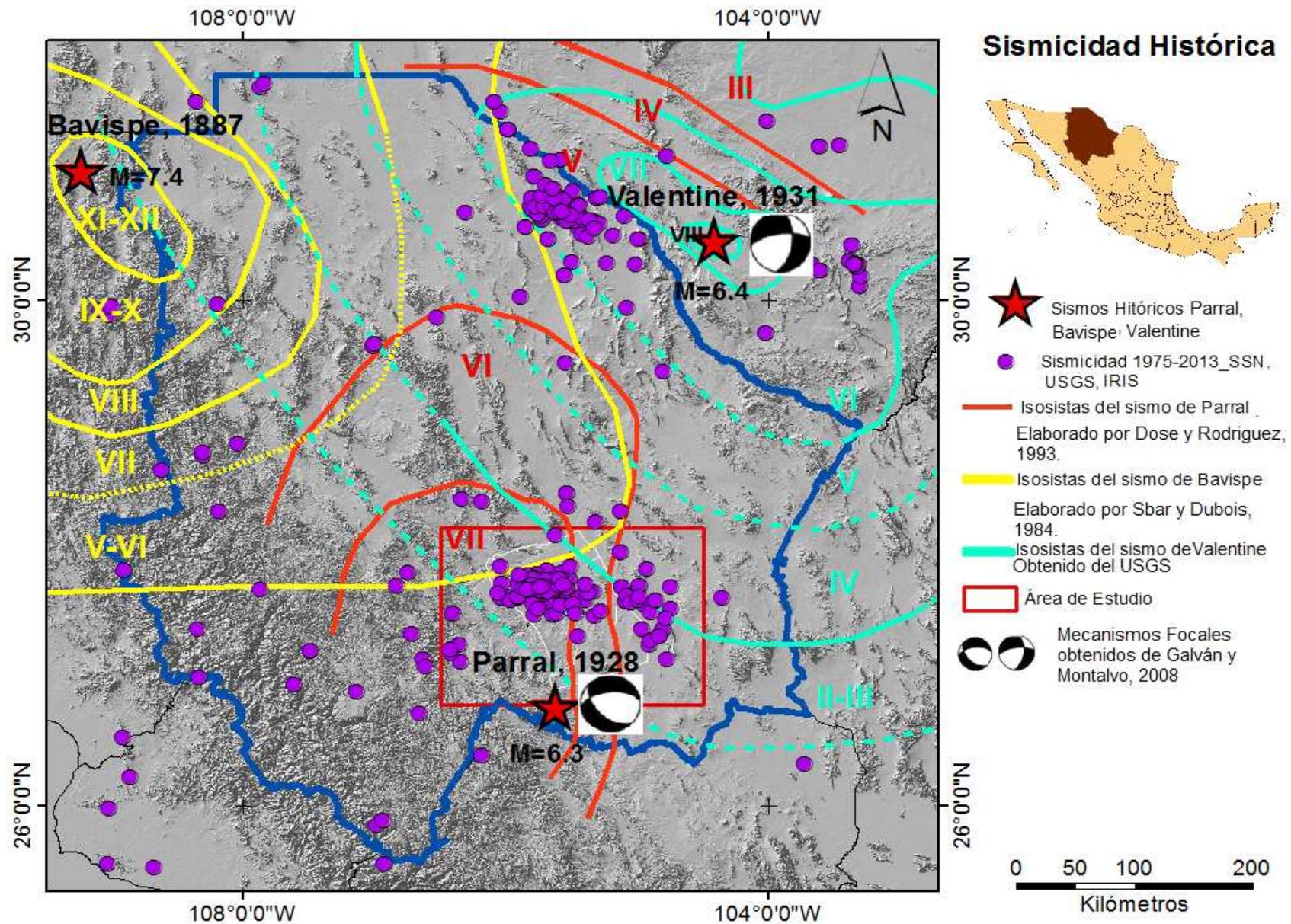


Figura 5.1. Las estrellas rojas indican la sismicidad histórica con magnitud mayor a 6.3. Los puntos morados indican la sismicidad instrumental durante el periodo de 1975 a 2013 registrada por diversas instituciones para el estado de Chihuahua. La isosista de intensidad VII punteada del sismo de Bavispe fue modificada de Sbar, (1984), (Doser y Rodríguez, 1993 y del USGS, reporte 2013).

6. RED SISMOLÓGICA

El trabajo en campo consistió en instalar 12 equipos sismológicos digitales enterrados a una profundidad de 30 cm aproximadamente, los cuales, operaron durante un periodo de trece días en diferentes sitios dentro del área de estudios definida previamente. La distribución de las estaciones de manera inicial se basó en cubrir el área de la sismicidad localizada por Apéndice II de la instalación de las 12 estaciones, ver fotografías 1 a la 4.

El modo de operación de las estaciones fue de manera autónoma, registrando en tiempo continuo. Una vez instaladas las estaciones, se visitaron cada tercer día para efectuar la medición del voltaje y evaluación de la batería; si ésta presentaba niveles bajos de carga se reemplazaban. En la misma visita, se inspeccionaba el registrador, realizando la descarga de los 24 archivos por día que cada archivo implica una hora de grabación datos sísmicos para los 12 equipos de medición, los cuales fueron almacenados en un disco duro.

Durante el periodo de observación sísmica se tuvo la necesidad de reconfigurar la distribución de tres estaciones, para lograr una mejor cobertura de la zona donde se comenzó a localizar actividad. En la tabla 1, se muestra la posición de las estaciones sismológicas, así como la reubicación (en color anaranjado) de las tres estaciones reubicadas. En la figura 6.1, se muestra la posición de las estaciones y en color la reubicación que se realizaron.

Tabla 1. Estaciones sismológicas, así como en color anaranjado, la reubicación de tres de ellas.

Estación / Digitalizador	Sensor	Latitud	Longitud	Altura (m)
4177	A-014	27.50389	-104.77735	1435
4177	A-014	27.57962	-105.44498	1435
4178	A-015	27.80472	-105.16190	1202
4179	A-016	28.16440	-105.44661	1157
4179	A-016	27.92562	-105.38055	1157
4180	A-017	27.14115	-104.91055	1354
4180	A-017	27.83017	-105.48426	1354
4182	A-018	26.92062	-105.68736	1732
4183	A-019	27.43894	-105.80691	1342
4184	A-020	27.66379	-105.69210	1463
4185	A-021	28.04426	-105.77190	1250
4186	A-022	27.92873	-106.03110	1341
4187	A-023	27.66386	-106.09526	1537
4188	A-024	27.29591	-105.48706	1457
4189	A-025	27.41530	-105.19204	1349

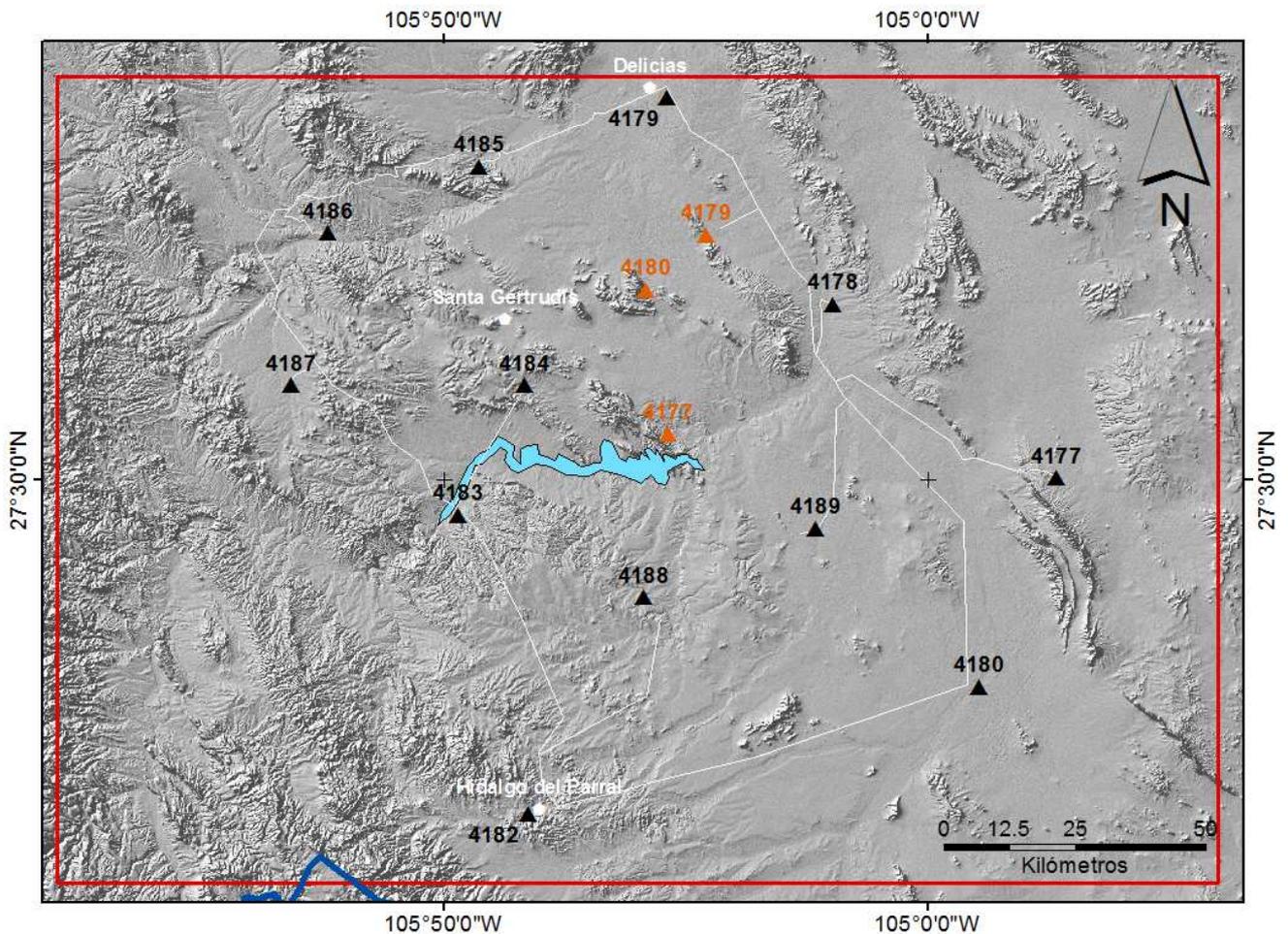


Figura 6.1. Muestra ubicación de red sismológica temporal instalada por el Departamento de Sismotectónica y Exploración Geofísica, CFE. La ubicación inicial de las estaciones (triángulos negros) y las estaciones reubicadas (triángulos anaranjados).

6.1 INSTRUMENTACIÓN: RED DENSA TEMPORAL (RDT)

Por cada sitio seleccionado, se instaló un sensor de velocidad con componente vertical, modelo Lennartz LxD para periodos de 5 segundos, es decir, su frecuencia en respuesta va desde los 0.2Hz hasta los 50Hz, un digitalizador de marca Reftek 125A, ver figura 6.2 y una batería de 12V. La tasa de muestreo fue a 100 muestras por segundo, en la figura 6.3 se observa el esquema de conexión de una estación sismológica ya instalada en campo.



Figura 6.2.- Sensor de velocidad de 5 segundos modelo Lennartz LxD-5 con respuesta de los 0.2Hz en adelante. Digitalizador Reftek modelo 125A.

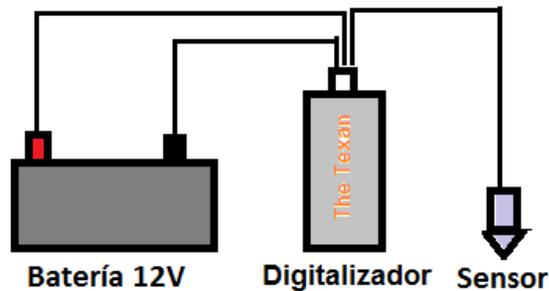


Figura 6.3.- Esquema de instalación de estaciones temporales.

7.METODOLOGÍA

Para procesar los registros sísmicos fue utilizado el programa de computadora SEISAN 10.0.0, el cual está configurado para leer arribos de ondas P, S y coda, ver figura 7.1. El programa de computadora arroja como resultado la localización del sismo y describe los parámetros epicentrales como son: coordenadas geográficas, magnitud coda (M_c), valores de RMS y profundidad entre otra información. Debido a que el Seisan utiliza la sub rutina de Hypocenter (Lienert y Havskov, 1995) que localiza con el procedimiento estadístico de regresión tales como centrado y escalamiento para mejorar la matriz de amortiguamiento de condición, la cual relaciona los cambios en los tiempos de arribo a variaciones en la localización hipocentral (Lienert et al., 1986), es necesario indicar si la onda P es impulsiva (IP) o emergente (EP); así como la onda S (IS o ES) e indicar el término de la señal con la indicación de "Coda". Cabe recordar que los valores de magnitud calculados en este trabajo fueron en función de la longitud de la duración de coda de los eventos sísmicos (magnitud de coda, M_c), ver figura 7.1, pues es el valor convencional que arroja el software.

Dentro de la información leída en el sismograma, se utilizó la clasificación de arribos impulsivos, movimiento grande y súbito, lo cual permite distinguir su tiempo de llegada. Generalmente estos arribos impulsivos son característicos de eventos sísmicos cercanos a la estación que lo registró y que en el presente estudio la mayoría de epicentros estuvieron localizados cerca de la red. Así mismo, fueron capturadas las polaridades del primer arribo de la onda P para cada evento, definiendo si eran de origen compresivo o distensivo para usarlos en la construcción de los mecanismos focales.

Finalmente, en la metodología para el procesado de los mecanismos focales, se utilizó el mismo software de Seisan, utilizando la sub rutina llamada FOCMEC. Este programa trabaja usando dos métodos: Lecturas de las Polaridades o Lectura de las Amplitudes de la señal. En este trabajo, se eligió el cálculo de las polaridades, las cuales el software las marcaba, si el primero arribo de la onda P sube, se indica con la letra C (up o “+”), si la onda de la señal baja, se indica con la letra D (down, “-”). Ottemöller, Vossver et Havskov (2012), ver figura 7.2. Este programa utiliza proporciona los datos de Rumbo, Echado y Rake los cuales nos indican la orientación de la falla, y la inclinación que tiene respecto a un eje vertical imaginario primordialmente.

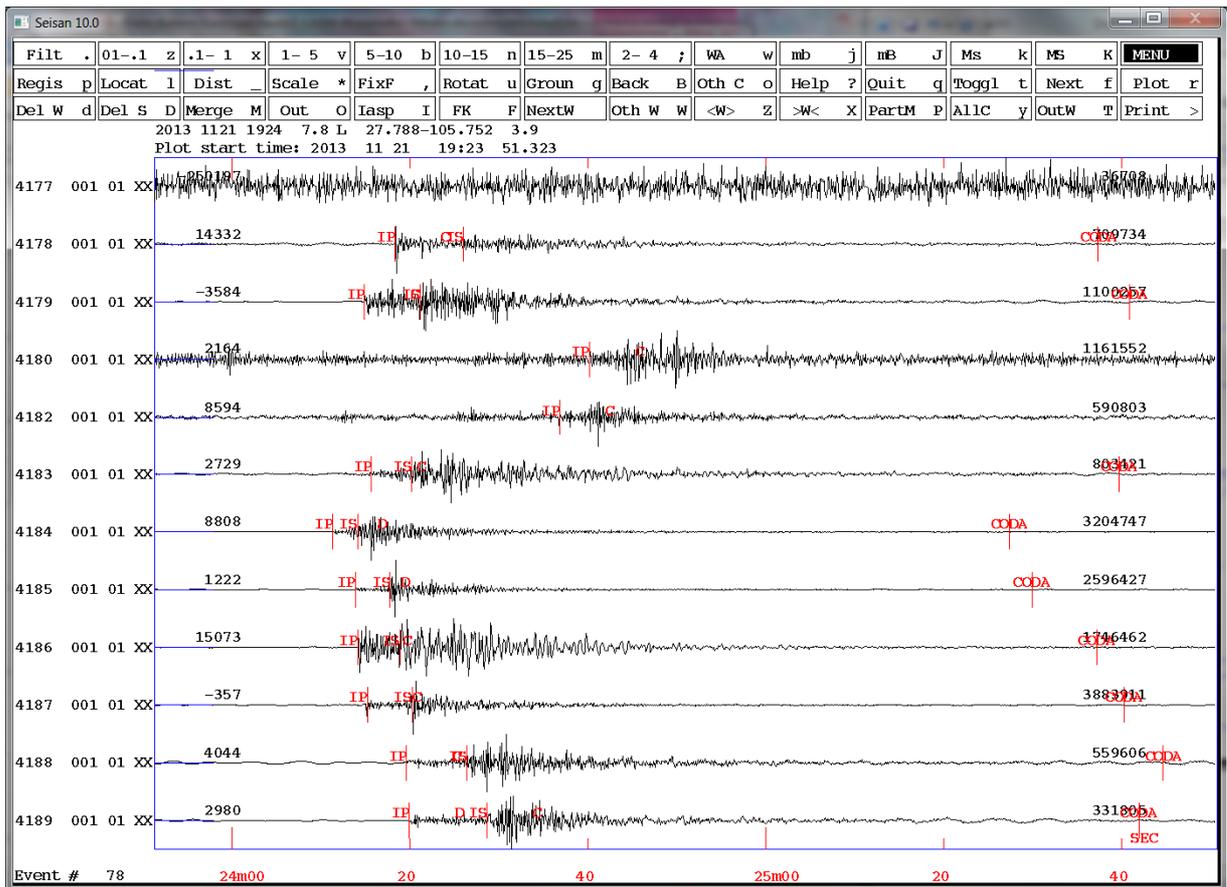


Figura 7.1. Ventana del programa de SEISAN, con el sismo registrado el 21 de noviembre del 2013 a las 19:24 h GMT (13:24 hora centro). Líneas rojas indican donde se marcó el arribo de la onda P, S y coda, y la polaridad señalada con C o D.

En la figura 7.2, se aprecia el resultado de indicar la polaridad de los arribos en la señal de las diferentes estaciones, donde la polaridad “C y D” se convierte en esfuerzos descritos con la simbología de letras “P” y “T” que implica una interpretación de P= Presión y T= Tensión. Estos conceptos serán explicados más adelante. Este software nos permite ubicar la polaridad que se leyó en cada estación. La esfera que obtiene el software muestra en círculos azules, las estaciones en que se leyó una polaridad “C” y en triángulo rojos, las estaciones en que se leyeron polaridades “D”.

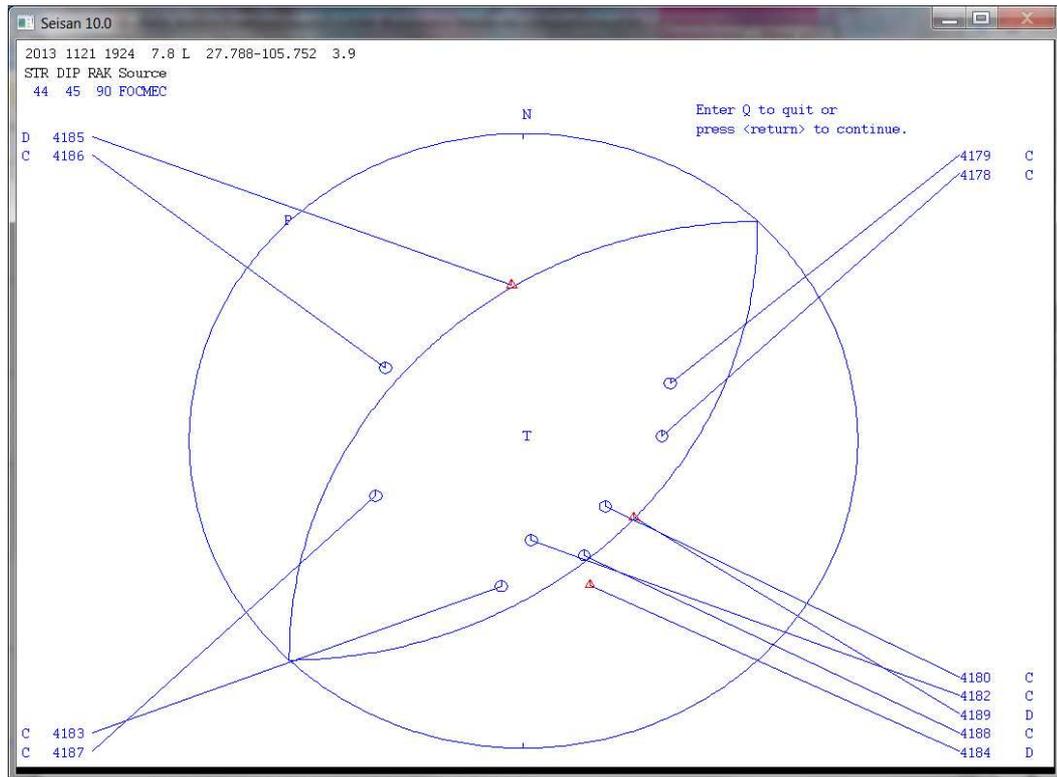


Figura 7.2. Ventana del programa de SEISAN, con el sismo registrado el 21 de noviembre a las 19:24 h GMT (13:24 hora centro). Se observa el mecanismo focal para ese sismo. Además se aprecia la polaridad que se leyó para cada estación indicándose con “P” o “T”

7.1 MODELO DE VELOCIDADES Y RELACIÓN V_p/V_s

En el procesado de los eventos sísmicos se utilizó el modelo de velocidades el cual consta de nueve capas desde la superficie, es decir, a los 0 km y hasta los 30 km de profundidad. Este modelo fue obtenido estimando profundidades de las capas del catálogo sismológico obtenido por el SSN. Así como una relación de velocidades V_p/V_s de 1.72 que fue obtenido por la relación Wadati que también se encuentra incluida en el paquete de programas de SEISAN, ver tabla 2.

Tabla 2. Muestra el modelo de velocidades utilizado en las localizaciones, así como la relación de V_p/V_s .

Modelo de Velocidad	
Velocidad km/s	Espesor
3.58	0
4.12	1.5
4.73	3
5.82	4
6.12	6
6.678	10
7.128	15
7.978	20
8.51	30
$V_p/V_s = 1.72$	

8. ANÁLISIS SISMOLÓGICO

8.1 ACTIVIDAD SÍSMICA

La actividad sísmica generada cerca del poblado de Santa Gertrudis, Chihuahua consistió de un total de 209 sismos durante un periodo de registro de 12 días continuos, del 18 al 29 de noviembre del 2013, ver figura 8.1, también se aprecia el sismo de $M=5.4$ ocurrido antes de estudio sismológico realizado por CFE. De los 209 temblores se determinó que los hipocentros fueron ubicados entre los 0.0 a 25.7 kilómetros de profundidad con magnitudes estimadas entre los 0.1 a 3.5; así también, para conocer la manera de evaluar si un epicentro está bien calculado, se tomó en consideración el valor del RMS (error cuadrático medio) mostrado en el Apéndice I, catálogo sismológico, se observa que va de 0.01 a 2.42 segundos, así como los valores del GAP (máxima separación azimutal entre estaciones) van de 73 a 349 grados. Cabe mencionar que durante este tiempo de medición sismológica, la microsismicidad de la zona generó más de los que se lograron localizar, de los que no se pudieron obtener información fue debido a diversos factores como son el grado de magnitud, la distancia entre los epicentros y las estaciones, la sensibilidad de los sismómetros entre otros.

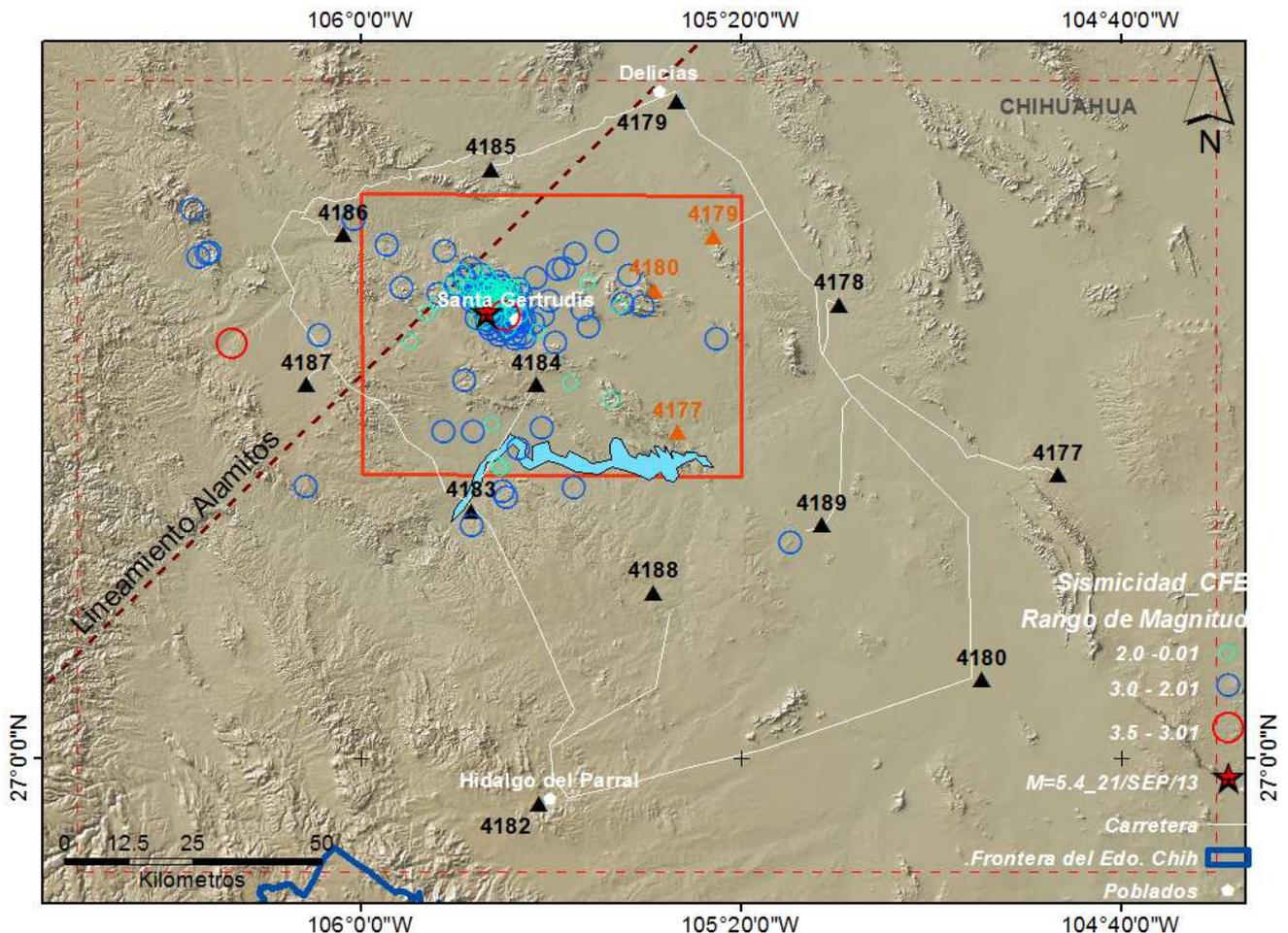


Figura 8.1. Distribución de los 209 epicentros localizados con RDT en torno al poblado Santa Gertrudis. El recuadro rojo punteado describe el área tomado inicialmente. El recuadro rojo con línea continua, implica el zoom que se tomará en el siguiente análisis. Línea blanca, es la carretera principal que rodea el área de estudio. Triángulos negros, equipos instalados, triángulos anaranjados, equipos reubicados. Círculos abiertos de color verde, azul y rojo, indican el rango de las magnitudes, de 0.01 a 2.0, de 2.01 a 3.0 y de 3.01 a 3.5. Estrella en color rojo, sismo $M=5.4$ ocurrido el 21 de septiembre.

Los sismos que presentaron mayor magnitud, ocurrieron el 21 y el 25 de noviembre a las 13:24 h y 05:21 h del centro. Estos sismos tuvieron magnitudes del orden del 3.2 y 3.5, con profundidades de 1.4 y 10 km, ubicándose a 2 km y a 50 km del poblado Santa Gertrudis respectivamente. Estos sismos se muestran en círculos de color rojo, ver figura 8.1. Uno de ellos cae dentro del cumulo de sismicidad y el otro se localizó a la izquierda de la estación 4187. Estos eventos se aprecian en el Apéndice I, referido en el catálogo con los números 67 y 152.

En la figura 8.2 se muestra el número de sismos con respecto a la magnitud. De la figura, se observa que la sismicidad se centró en la magnitud de 2.2, acumulando 31 sismos, los cuales forman el 14.83% de la actividad total, esto muestra tanto el nivel de energía disipado como la sensibilidad de la red, con una distribución normal, con lo anterior, se observa que el catalogo esta completo hasta $M > 2.2$, lo cual quiere decir que el nivel mínimo de detección de la red fue de 2.2 pues la red no logró registrar todos los eventos con $M < 2.2$ aun cuando la RDT registrara regularmente sismos con magnitudes menores, éstos se localizan en regiones donde la densidad de la red permite localizar este tipo de microsismos, Pacheco, et al. (2004).

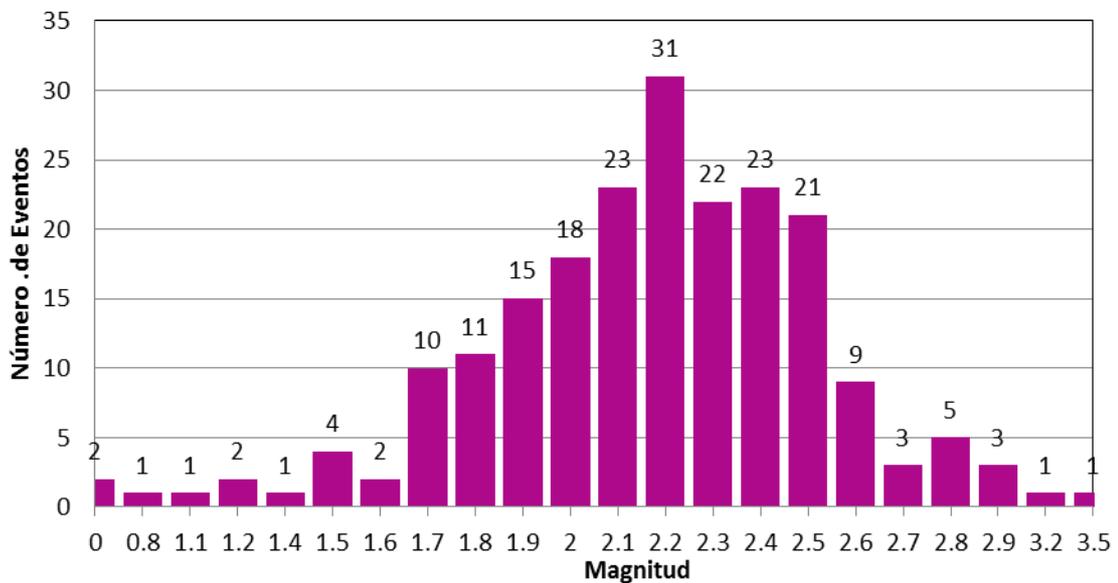


Figura 8.2. Histograma de magnitud versus número de eventos. El número en la parte superior de la barra indica el número total de temblores dentro de esa magnitud para los 209 sismos localizados.

Por otro lado, se observó que los intervalos que registraron un número superior a los 10 eventos ocurrió en el intervalo de magnitudes de 1.7 a 2.6, actividad que corresponde al 87.55 % del total. Para el resto de los epicentros se observó una menor concentración ya que solamente se determinaron 12.44 % del total de ellos fuera del intervalo de magnitudes mencionado anteriormente.

En la figura 8.3 se muestra la distribución del número de sismos de acuerdo con su profundidad. En ella, se ve en que profundidades se concentra la sismicidad; sobresaliendo el rango de 3.1 a 6.0 km con un total de 69 sismos que representan el 33.01 % de la sismicidad total. De este mismo histograma, se aprecia un grupo entre los 30-40 sismos que se da entre los 0a 3 km de profundidad con un total de 34 sismos representando el 16.26%, entre los 6.1 a 12 km de profundidad con un total de 71 sismos que son el 34.13 %. Finalmente, existen otros dos grupos con una cantidad mínima de sismos, uno de ellos está representada por la cantidad de 24 sismos en un rango de 12.01 a 15 km que viene representando el 11.48 %, y por último el rango que va de 16.1 a 25 km de profundidad con 11 sismos para ese intervalo, y representan el 5.28 %. Se puede decir que la sismicidad se concentró

por arriba de los 15 km de profundidad, enfatizándose entre los 3 a 6 km. Es importante mencionar que esta estadística tiene sentido solo para $M > 2.2$, ya que con $M < 2.2$ no todos los eventos se registran. La calidad de los 209 sismos localizados se calculó con el promedio de los valores E_{rx} , E_{rh} y E_{rz} (parámetros que arroja el Seisan donde permite ver por error en determinada componente del sismo calculado), para su componente en la Longitud el error promedio resultó de 18 km, en la Latitud resultó de 15 km y en su componente vertical de 15 km. Estos valores son altos sobretodo en la componente vertical, muy posiblemente debido a que el modelo de velocidades utilizado fue elegido con el método de prueba y error.

Cabe mencionar que este histograma se realizó con intervalos a cada 3 km debido a que el promedio de error en su componente vertical (E_{rz} , parámetro que software Seisan), arroja un promedio del 15.11 de error.

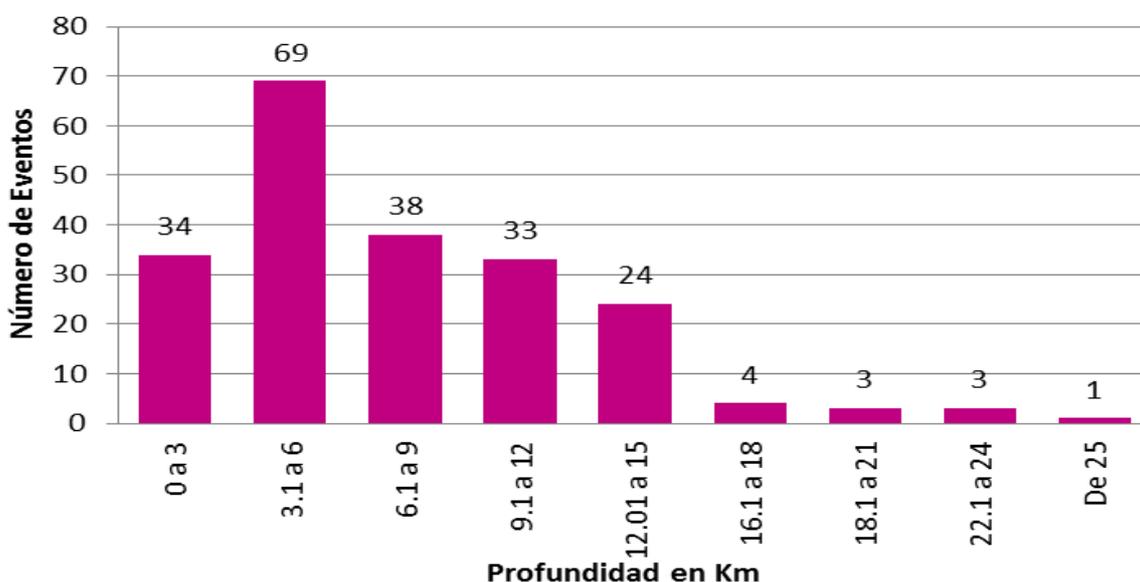


Figura 7.3. Histograma de profundidad en kilómetro versus número de eventos. El número superior de la barra indica el total de eventos en el intervalo de profundidad para los 209 sismos localizados.

Cabe mencionar que durante el periodo de estudio, del 18 al 29 de noviembre realizado por CFE donde registro un total de 209 sismos locales con un rango de magnitudes de 0 a 3.5, el SSN registró dos sismo de magnitud 4, uno ocurrido el 11 de noviembre y el segundo el 21 del mismo mes, la relevancia de un sismo con otro, es que el primero ocurrió a una distancia de 86 km al oeste de nuestra área de interés, mientras que el segundo, el SSN lo localizó a 17 km al SE de Santa Gertrudis, este ocurrió el a las 13:24 hora local de la Cd. de México con una profundidad de 10 km, sin embargo, el sismo de importancia para nosotros, es el de $M=5.4$ ocurrido el 21 de septiembre. En el catálogo que se presenta en este trabajo, se aprecia con el No. 67, y con una magnitud de 3.2, y fue el único sismo que registró el SSN y la RDT de CFE durante el tiempo de medición de ésta. El margen error en planta se debe al diseño de la red de cada una, y la diferencia de magnitudes, es de considerar que la que se maneja en este trabajo es M_c (magnitud coda).

8.2 SELECCIÓN DE MEJORES EPICENTROS.

Los 209 sismos localizados tiene una característica primordial, la mayoría se concentran en una región particular, justo al norte de la estación 4184, limitada por las estaciones 4185 y 4186. Por lo que se aprecia, la red instalada mostró buena cobertura al cercar la sismicidad que ocurre en la zona de estudio, permitiendo definir una nueva área de estudio (cuadro en color rojo) y tratando de encerrar el cúmulo de actividad sísmica. Son pocos los epicentros que caen fuera de la red, como la que se aprecia al oeste de la estación 4186.

Con la finalidad de identificar los mejores eventos para obtener sus parámetros focales y un modelo sismotectónico, fueron escogidos del catálogo sísmico aquellos eventos bajo los criterios de RMS (error cuadrático medio), GAP (máxima separación azimutal entre estaciones) y Número de Fases (No), los cuales corresponden al error medio cuadrático de la localización, al ángulo de cobertura de estaciones para cada epicentro y al número de fases (arribo de ondas P y S) usado para la localización de cada epicentro.

En la selección de RMS fue de aquellos eventos con menor o igual a 0.4 segundos, los que tuvieran un GAP menor o igual a 180, por último para el número de fases, se consideró a todos los epicentros localizados con más de 8 fases. Así resultó que fueron seleccionados 109 sismos de los 209 temblores localizados durante el periodo de estudio. Los eventos de mejor calidad se aprecian en el Apéndice I y se indican con asterisco a lado del epicentro. Cabe resaltar que los eventos seleccionados son los que serán usados para el análisis sismotectónico.

La confiabilidad de los datos que son el resultado de los criterios de selección (109 sismos) es justificada en la figura 8.4, donde se muestra que el promedio de error en la longitud, en km, de los eventos localizados, es de 3.08; mientras que el error promedio en la latitud, en km, tiene un valor de 3.93. En el caso de la profundidad, el error promedio fue de 9.7 km. El RMS, que se define como una media cuadrática ponderada de los residuos de los tiempos de llegada para cada estación, fue menor o igual a 0.4, por tal motivo podemos determinar que las localizaciones son bastante confiables. De esta forma podemos sostener que los eventos que ocurrieron fuera de la RDT no se ven demasiado influidos por su posición con respecto a la distribución de estaciones de la RDT, Martínez, Ma. Del Rosario, (2011).

En la obtención de los mecanismos focales (MF), se eligieron sismos del resultado de la elección anterior que se localizaran en la Falla Vallecillo con la intención de obtener una mejor descripción de los esfuerzos a lo largo de ésta. El control de los datos elegidos para los MF, pueden considerarse confiables debido a que vienen del resultado de una elección donde se tomaron parámetros que permitirán apoyarse en sus resultados. Es decir, el rango del Número de Fases es de 8 a 12 fases, su rango del GAP es de 98 a 152 y en el RMS es de 0.1 a 0.3 y con la polaridad bien definida en sus arribos de dichos eventos.

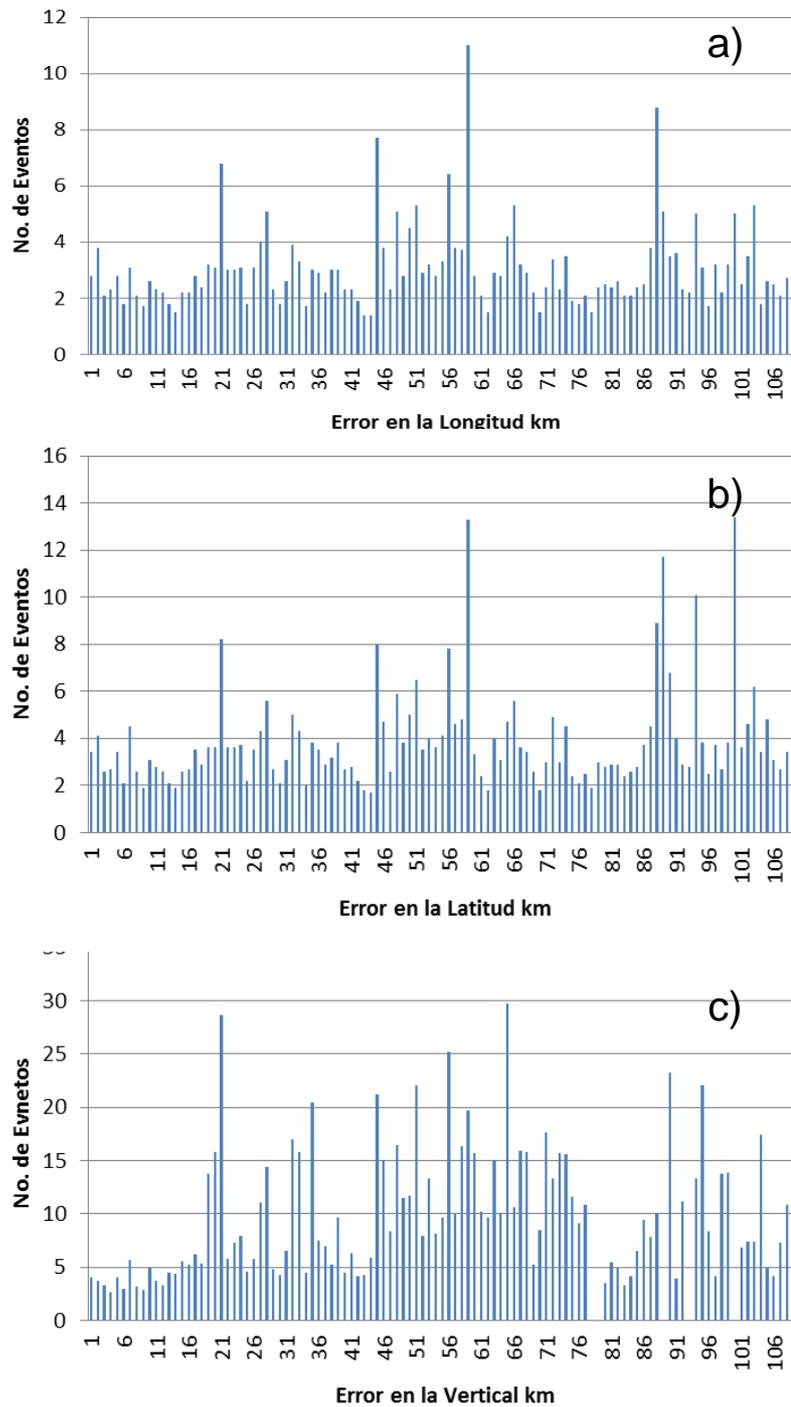


Figura 8.4. Presenta los histogramas de los 109 sismos para cada componente versus número de eventos. a) Número de eventos versus error en la longitud de los sismos. b) Número de eventos versus error en la Latitud de los sismos. c) Número de eventos versus error en la vertical de los sismos. El eje vertical indica el número de evento, mientras que el eje horizontal, el error en km del cálculo para cada componente.

8.3 DISTRIBUCIÓN DE EPICENTROS

La distribución de epicentros de los 109 sismos seleccionados, se muestra en la figura 8.5 donde se clasificaron de acuerdo con la magnitud. Los epicentros en el intervalo de magnitud 1.2 a 2.0 en círculos azul claro. En azul fuerte, los sismos de magnitud entre los 2.0 a 3.0. En rojo, se muestra el evento de mayor magnitud, $M=3.2$, registrado por la RDT, que en catalogo sísmico esta descrito con el número 67. Este evento, fue localizado por el SSN a 12km al SW de Naica. De manera práctica los epicentros se distribuyeron dentro del graben o cuenca El Caballo, limitados en ambos flancos por las sierras El Peñasco y El Vallecillo, las cuales también contienen fallas paralelas a la sierra del mismo nombre. En la porción septentrional se encuentra limitada por el Lineamiento Alamitos y al sur por la sierra Santa Gertrudis. Así también se aprecia en estrella roja, la localización obtenida por el SSN del sismo de $M=5.4$ ocurrido casi un mes antes de estudio de sismicidad. Este sismo de gran magnitud, por la localización arrojada por el SSN, se encuentra sobre la Sierra El Vallecillo. Este sismo de gran magnitud para esta zona, podría indicar que rompió la falla y como consecuencia del fracturamiento de la zona, se fue generando la sismicidad.

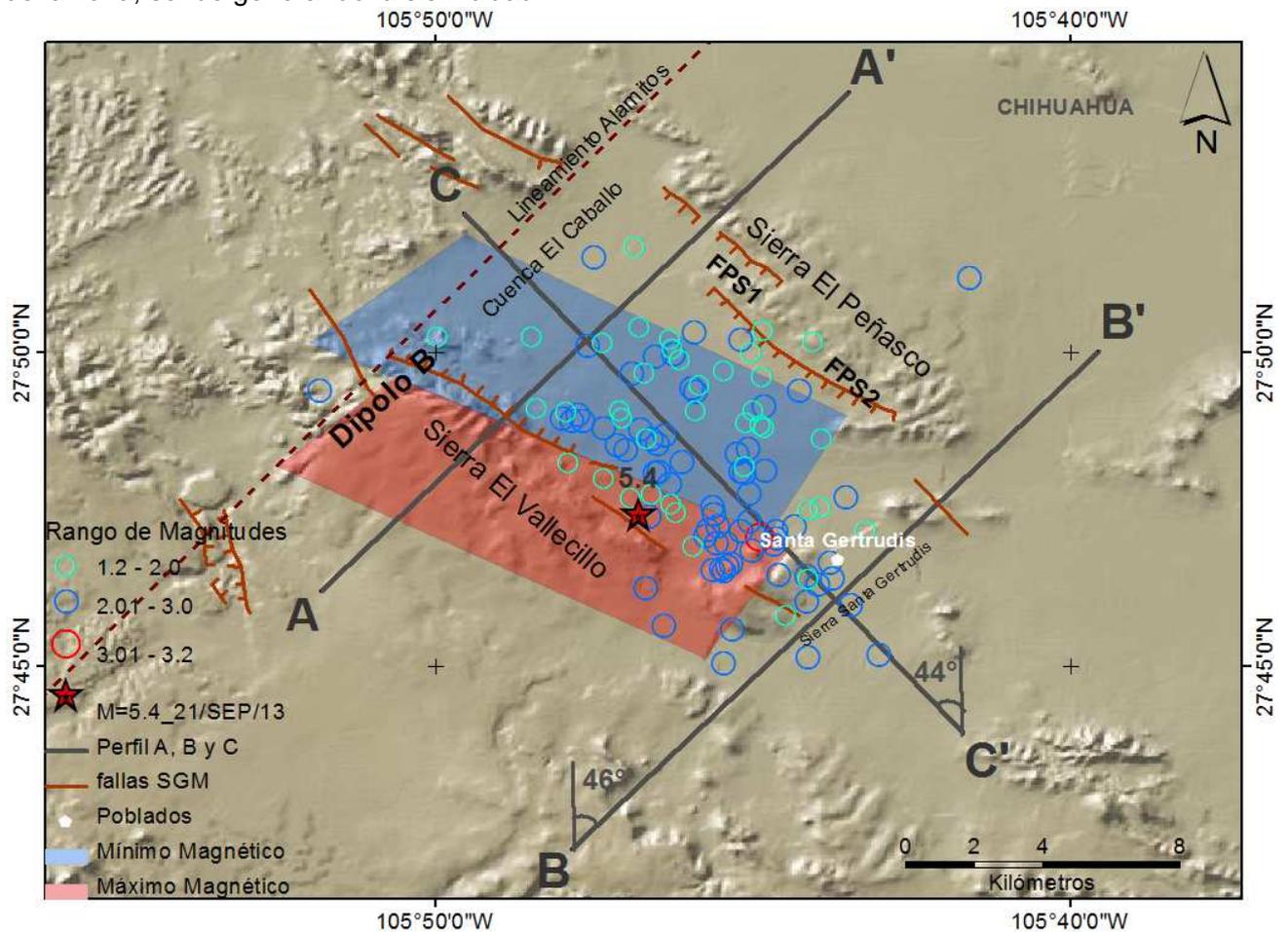


Figura 8.5. Distribución de los 109 sismos seleccionados. Líneas continuas grises indican los Perfiles A, B y C. Sistema de fallas locales obtenidas de los mapas geológicos del SGM. En color azul se muestra el mínimo magnético y en color rojo, el máximo magnético total del Dipolo B. FV: Falla Vallecillo, FP: Falla Peñasco con sus segmentos 1 y 2.

La distribución de epicentros muestra lineamientos preferenciales. La más clara de identificar es la acumulación de epicentros alrededor de la sierra El Vallecillo, al sur de la FV y muy probablemente,

es la continuación de esta misma falla. Aparentemente, la porción sur de la FV es la que se puede asociar como fuente generadora de la actividad sísmica que está aconteciendo en la zona. Estas localizaciones tienen un error promedio en longitud de 3.9 y un error promedio en la latitud de 4.6, lo cual, es un margen de error aceptable, sin embargo, lo preferente es que este error tuviera un valor inferior a 1.

Como se comentó anteriormente, el Lineamiento Alamitos (línea punteada) se presenta al norte de la sierra El Vallecillo, cruza casi perpendicularmente al graben El Caballo y la que marca el límite norte de la sismicidad.

Otra acumulación de epicentros y no es precisamente un lineamiento, es la que se presenta alrededor de la sierra Santa Gertrudis (SSG), muestra aquí la diferencia entre lineamiento de la FV y la acumulación de temblores en la SSG. Además, se detectó que durante el periodo de estudio, la zona produjo los sismos de mayor magnitud, tal es el caso del evento con mayor magnitud 3.2 que precisamente está localizado dentro del cúmulo mencionado.

Existen lineamientos no muy definidos dentro de la cuenca El Caballo, los cuales pueden conectar los extremos de dicha cuenca, es decir, entre la FV y FPS2. No obstante, a la dispersión de epicentros se puede inferir de manera simple la orientación que se tienen entre el cúmulo de epicentros alrededor de la SSG y en dirección prácticamente hacia el norte geográfico hasta conectar con la FPS2.

En términos generales, esta sismicidad, como se habló en el capítulo anterior, se concentra el mínimo magnético alrededor del Dipolo B (área azul) y en el bloque caído de la falla El Vallecillo, como se ve en la figura 7.6. Debido al acomodo de la sismicidad, se trazaron tres líneas que representaran las secciones sísmicas A-A', B-B' Y C-C'.

Esta sismicidad muestra un rango predominante entre los 1.9 a 2.3 con un total de 64 sismos que representan el 58.71% de la sismicidad total. Sin embargo, las magnitudes con mayor número de ocurrencia son las magnitudes de 2.1 y 2.2, con 14 y 15 sismos. Sobresalen también los sismos estimados en 2.5 de magnitud, con un total de 11 eventos y que representan el 10.09%. El resto de la sismicidad se determinó en el intervalo de 1.2 a 1.8, de 2.4 y de 2.6 a 3.2 que representan el 31.20% del total, ver figura 8.6. Cabe destacar que durante la selección de datos de mejor calidad, solamente sobresale un sismo de magnitud 3.2, el cual se identifica en el Apéndice I, catálogo sísmológico, con el número 67. Debido a que la distribución de la sismicidad se concentra en $M=2.2$, el nivel mínimo de detección se determina en ese valor, es decir, el catalogo se define nuevamente, con esta selección de datos en el valor de $M \geq 2.2$.

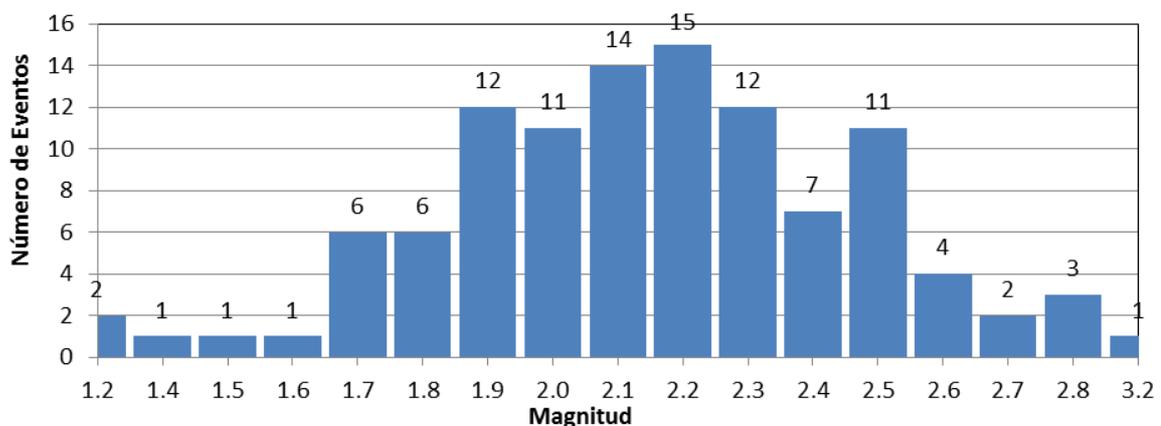


Figura 8.6. Histograma de magnitud versus número de eventos. Indica el total de eventos de cierta magnitud de los 109 sismos seleccionados.

Por otro lado, la distribución de hipocentral con respecto a sus profundidades se aprecia en la figura 8.7, de los cuales se clasifican tres rangos. El primero es la sismicidad somera clasificada para este trabajo de tesis con los sismos con hipocentros entre los 0.3 a 7 km, los cuales representan el 71.55%, con un total de 78 sismos. La sismicidad intermedia definida por hipocentros de 7 a 15 km de profundidad que representan el 24.77% con un total de 27 sismos. Finalmente, la sismicidad profunda cuyos hipocentros se localizaron entre los 16 a 25.6 km de profundidad, representan el 3.66 % con un total de 4 eventos, ver figura 8.8.

La figura 8.7 muestra esta sismicidad acomodados por rangos de profundidades donde los círculos en amarillo indican los sismos con profundidades someras, descrito en el párrafo anterior. Los círculos en color anaranjados representan los sismos de profundidades intermedias y los círculos en color rojo, representan los sismos profundos (nombrados así para este trabajo).

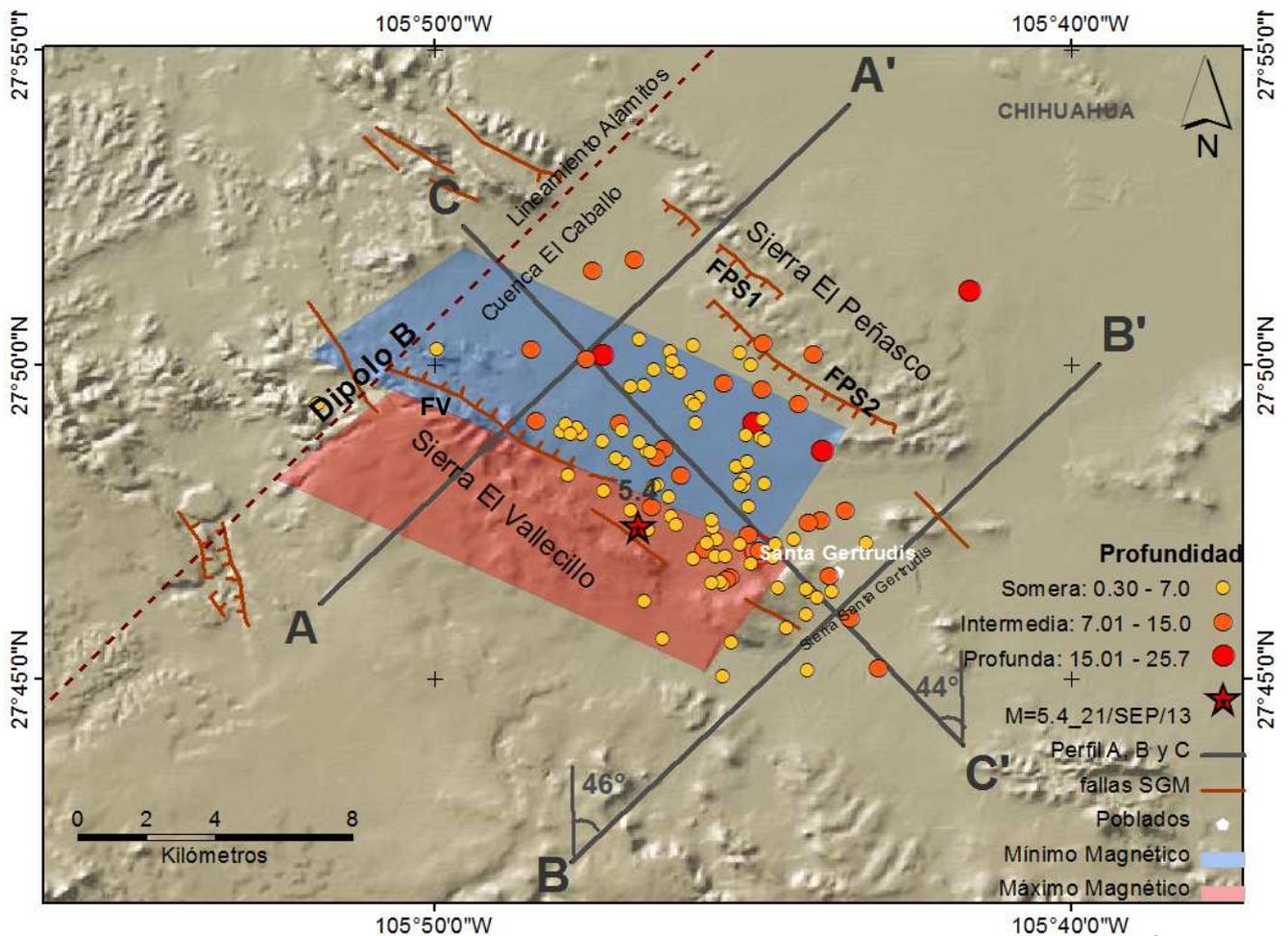


Figura 8.7. Círculos en colores, son la sismicidad por rangos de profundidad de los 109 sismos. Área azul, indica el mínimo magnético y en rojo, el máximo magnético del Dipolo B. FV: Falla Vallecillo, FP: Falla Peñasco, segmento 1 y 2.

Los rangos de sismicidad que se aprecian, muestra que la sismicidad está muy bien definida en todo lo que encierra las Sierras El Vallecillo y El Peñasco con profundidades someras, lo que muestra que la posible estructura geológica que genere esta actividad tiene dimensiones que se pueden definir por el largo de la Sierra El Vallecillo y de profundidad, hasta los 7 km, que es lo que muestra la sismicidad en planta. Las profundidades que van de 0.3 a 7 km de profundidad se alinean muy claramente sobre

la Sierra El peñasco y se alinean sobre la línea del perfil B, que pasa por la Sierra Santa Gertrudis. Los sismos más profundos, se generan determinó que se dan más al norte de la Cuenca El Caballo.

Así también, se aprecia que la sismicidad está muy bien limitada al norte, por la continuación del Lineamiento Alamitos, y al sur, por la Sierra Santa Gertrudis.

La sismicidad presentada por profundidad, no muestra relación alguna con el dipolo magnético B, que fue explicado en el capítulo anterior.

De la figura 8.8, cabe destacar que el intervalo en que sobresale el mayor número de sismos, es el de 3.1 a 6 km y representa el 44.95 % de la sismicidad total, con un total de 49 sismos.

Con los porcentajes de ocurrencia de la sismicidad, se aprecia que la sismicidad se considera somera, pues la mayoría se da en un rango muy superficial y conforme se profundiza más, este número de eventos, disminuye. Inclusive, existen sismos en un rango inferior (de 0.3 a 3 km) que representan el 11% de los 109 sismos analizados para este histograma.

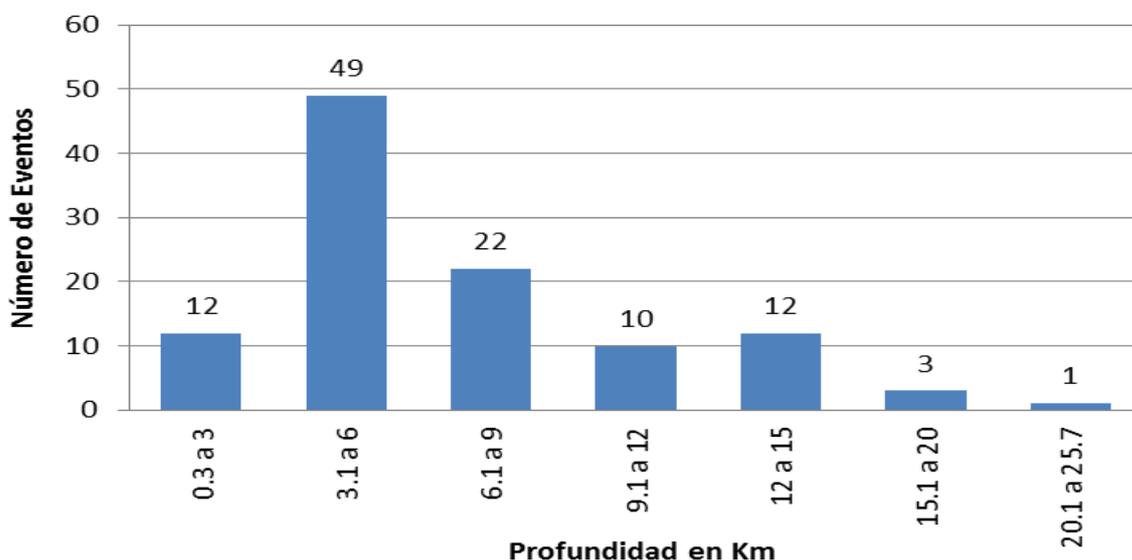


Figura 8.8. Histograma de magnitud versus número de eventos. Indica el total de eventos de cierta profundidad de los 109 sismos seleccionados.

8.4 ANÁLISIS DEL CAMPO MAGNÉTICO TOTAL

En base al análisis realizado por Franco-Rubio (2002), donde analiza los cambios drásticos de coloración con imágenes satelitales, así como los cambios abruptos de geología que le definieron el lineamiento Alamitos, se buscó información en cartas magnéticas de Campo Total del Servicio Geológico Mexicano (SGM) de escala 1: 50 000 que se encuentran disponibles en su página de internet, siendo éstas cartas la de Santa Gertrudis G13-A17, Naica G13 A18, La Jabonera G13-A27 y La Boquilla de Conchos G13-A28 , todas del estado de Chihuahua, esto con la finalidad de buscar un cambio de polaridad que pueda proporcionar algún tipo de información que relacione el comportamiento magnético con la actividad sísmica en la zona de estudio.

En la figura 8.9a, se muestra la unión de las cartas magnéticas mencionadas en el párrafo anterior. En ella se observa que en la región existe una gran variedad de dipolos magnéticos (elemento puntual que produce un campo magnético dipolar) donde el comportamiento magnético ubica el

mínimo al norte y, el máximo al sur debido a la alineación magnético de la Tierra que viajan de S a N y van de positivo a negativo polarizando los cuerpo de esta manera, de lo anterior, se asume que la inducción en el campo magnético de la Tierra es la responsable de la magnetización de las cuerpos rocosos, lo anterior define el concepto de campo magnético total. Se observan dos estructuras de gran interés por su ubicación que se encuentran en la zona de sismicidad, estas estructuras las llamamos dipolo A y dipolo B. Estos dipolos magnéticos, en su conjunto forman una estructura definida, para resaltarlas, con líneas discontinuas en color azul indican el mínimo magnético de las estructuras, y en líneas discontinuas de color rojo como el máximo magnético. El dipolo A representa una estructura de 45 km de longitud, y la distancia entre los valores de su máximo y su mínimo es de 15 km aproximadamente.

Por otro lado, el Dipolo B está contenido dentro del dipolo A, ubicándose en una porción del mínimo magnético de éste. En el dipolo (B) y cercano a él (al NE y SE) es donde se concentra la sismicidad localizada por la RDT, ver figura 8.9b. En este dipolo B, las dimensiones magnéticas describen la estructura de un cuerpo con dimensiones de 8 km de largo por 3.5 km de ancho (definido de la distancia de los valores mayores del máximo a los menores del mínimo), que se localiza en la cuenca El Caballo. Del sistema de fallas que se presenta en la Cuenca, existe una falla (FV) de gran interés que tiene dirección NW-SE, esta falla atraviesa la parte central del cuerpo del dipolo B y que puede ser la generadora de la actividad sísmica.

En términos generales, la sismicidad es ubicada en la porción mínima del cuerpo que forma el dipolo A, limitada al sur por la presencia del máximo de dicho dipolo. De igual manera, los epicentros se ubicaron dentro del mínimo del Dipolo B magnético, por lo que, se exhibe que la sismicidad está localizada dentro de los mínimos magnéticos para ambos cuerpos. Las anomalías magnéticas se asocian con cuerpos intrusivos, ya que es la manera en que se explica la presencia de un dipolo magnético. Por lo que, la anomalía magnética de campo total está respondiendo quizá ante la presencia de un cuerpo intrusivo con dirección NW-SE con características de fallamiento hacia su flanco NE, donde el máximo y mínimo corresponden a este tipo de modelo. La intención de este análisis, es realizar una interpretación similar a la de Franco-Rubio (2002) por medio del campo magnético total de la zona de estudio, sin embargo, es necesario resaltar que, para caracterizar y modelar los cuerpos (fuentes) de las anomalías magnéticas, es necesario reducirlas al polo magnético y posterior se realiza la continuación ascendente para obtener la modelación de la fuente correctamente, Martínez, 2011. Debido a que el SGM no cuenta con esa información, se realiza una interpretación con su campo total.

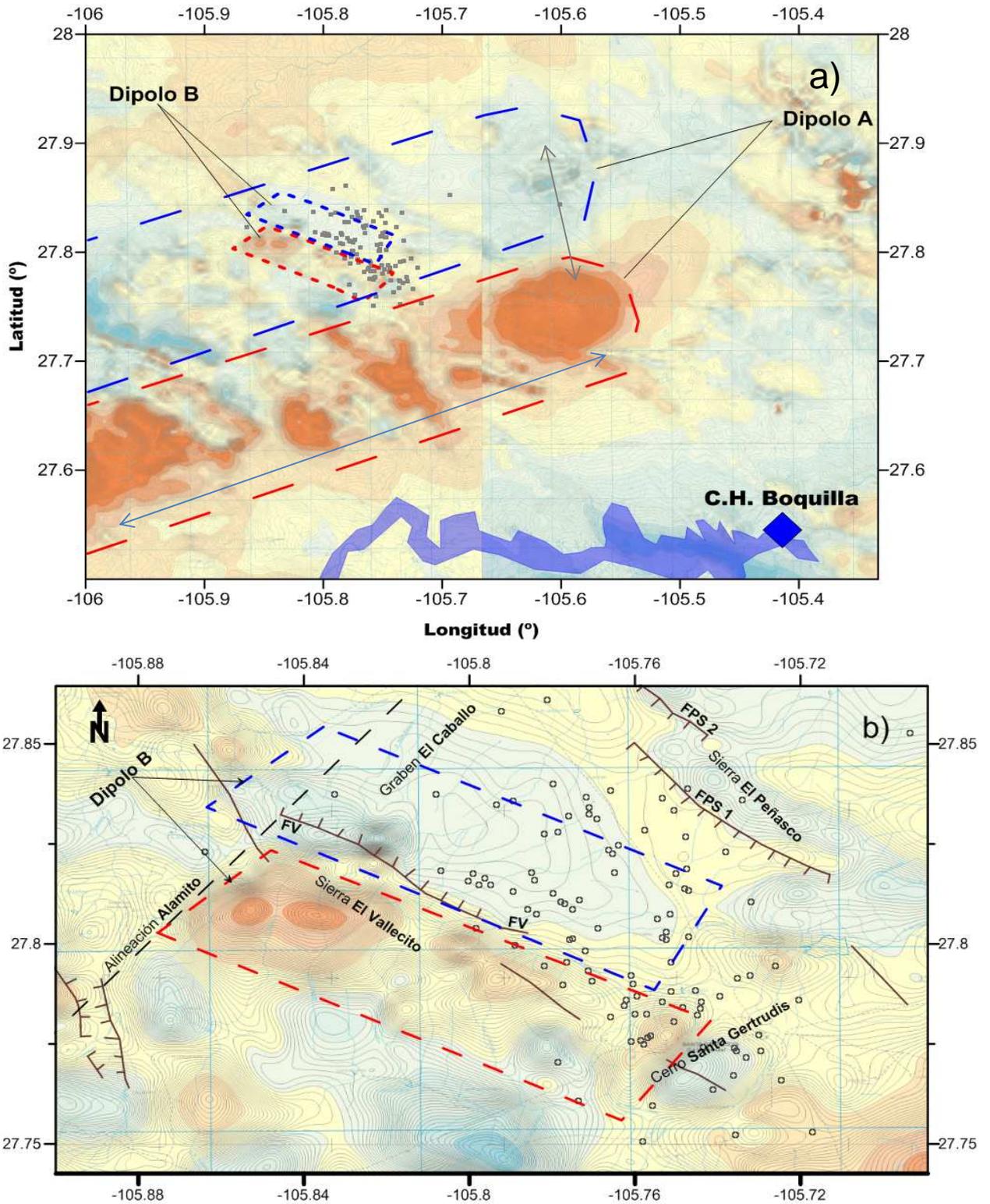


Figura 8.9. Mapa de Anomalías Magnéticas con el catálogo de sismos (Círculos grises). a) Representación de los dipolos magnéticos A y B. b) Dipolo magnético B con rasgos estructurales (Cartas tomadas y modificadas del Servicio Geológico Mexicano).

8.5 ACCELERACIÓN MÁXIMA TEÓRICA RESPECTO A M_s .

Para conocer el efecto de la aceleración, resultado del movimiento de una falla se realizó un análisis teórico entre la longitud de falla, asociada a la sismicidad, la distancia del punto medio de la falla al poblado de Santa Gertrudis y la aceleración. Este último valor con la finalidad de preveer un probable daño ante el movimiento súbito de la falla Vallecillos la cual se encuentra activa.

Para la estimación de la magnitud de onda (M_s) asociada a la falla El Vallecillo, se utilizó la siguiente expresión generada por Nowroozi (1985).

$$M_s = 1.259 + 1.244 \text{ Log}(L) \dots\dots\dots 1$$

donde L representa la longitud de ruptura en metros.

Utilizando la expresión anterior con una longitud de ruptura de 14 km, se obtuvo una magnitud (M_s) de 6.4. Tomando la distancia de 50 km desde la superficie de ruptura al poblado de Santa Gertrudis, se tiene que el valor de la mediana estimado de la aceleración para la presa sería de 57 cm/s^2 , calculado en roca. Este valor fue obtenido al emplear la relación de atenuación de Abrahamson y Silva (1997) para fallas transcurrentes o de rumbo. Cabe aclarar que se tomó como fuente sísmica a la longitud total de la sismicidad en la zona, sin embargo, los análisis de la actividad muestran que aparentemente son dos fuentes FV y FSG en interrelación con las fallas FPS1 y FPS2, por lo que las dimensiones de la fuente cuando más pueden llegar a 9 km por separado. Valor que es menor al asumido en un principio y por lo tanto la aceleración debe ser menor.

De tal forma que el resultado esperado como la aceleración producto del deslizamiento de la falla causaría alarma en el poblado, sin peligro alguno de sufrir daños de importancia. De acuerdo con la estimación de la aceleración la intensidad sería registrada entre los III y IV en la escala de Mercalli modificada y que provocaría vibración semejante al paso de un camión pesado, los vehículos estacionados se balancean sin generar daños a estructuras en general.

8.6 RELACIÓN GUTENBERG-RICHTER

El número de sismos que ocurre anualmente en el mundo varía con la magnitud, esta observación fue hecha por Gutenberg y Richter en 1940, a la cual nombraron relación "frecuencia-magnitud". Esta relación Gutenberg-Richter (G-R) se interpreta como el número de sismos ocurridos en cualquier región del mundo en función de la magnitud, donde para sismos de magnitudes bajas habrá una mayor cantidad de eventos sísmicos en comparación con el número de sismos fuertes (por ejemplo sismos de magnitudes superiores a 6.5) y para un mismo intervalo de tiempo. Esta relación permite cuantificar el número esperado de sismos que acontecen en un determinado rango de tiempo y representada por la ecuación 2:

$$\text{Log}_{10} N = a - b \cdot M \dots\dots\dots 2$$

Donde N es el número de sismos de magnitud mayor o igual que M ocurridos en un tiempo determinado. La distribución es descrita por una relación lineal con constantes como a que está relacionada con el número de terremotos en el tiempo y la región muestreada, y el valor de b con valor promedio a nivel mundial igual a 1, Nava (1987), representa la inclinación de la recta de la relación y corresponde a la proporción de sismos de determinada región. Este ha sido motivo de una serie de estudios que sugieren una relación de este valor con las características tectónicas de la región en estudio. De acuerdo con Bullen y Bolt (1987), este parámetro puede ser utilizado en la predicción sísmica y en estudios sismotectónicos comparativos.

Con lo anterior, el valor del coeficiente de b , indica la proporción logarítmica de sismos pequeños respecto a la cantidad de sismos grandes. Sin embargo, el valor de b varía dependiendo del arreglo, de la densidad de las estaciones, del periodo de monitoreo, del nivel mínimo de detección de la red y de acuerdo a la escala utilizada para medir las magnitudes de los sismos, ya que las diferentes escalas al utilizar la amplitud del registro de los sismos resultan frecuentemente afectados por el cambio en las propiedades físicas de cada región que atenúan en mayor o menor grado a las ondas (Zúñiga y Wiss, 1995; Zúñiga y Wiener, 1999).

Se considera que, si $b < 1$, la actividad tectónica es moderada, si $b > 1$ corresponde a zonas con actividad tectónica considerable, inclusive, asociada a regiones volcánicas. Este valor, como ya se mencionó, está ligado a las características físicas de cada región, de modo que valores altos de b indican el predominio de sismos de pequeña magnitud, es decir, una región tiene concentración de esfuerzos menores, es decir, la zona tiene poca resistencia para la acumulación de esfuerzos, es decir, a mayor valor de b , menos esfuerzo tendrán las placas. Ahora bien, cuando el valor de b es bajo, indica que predominan los sismos de magnitudes mayores, lo que indica un medio con mayor resistencia y sugiere zonas con una concentración de esfuerzos mayores, un ejemplo de esto es en la región de subducción en las costas del océano Pacífico en los estados de Guerrero y Oaxaca, en el trabajo de (Zúñiga y Wyss, 2001) donde se observa que en esta región, los valores de b oscilan entre 0.5 y 1.5 existiendo un predominio de valores menores a 1, ver figura 8.10. Por tal motivo, se considera el valor de 1.0 como ideal que significa sismos de origen tectónico.

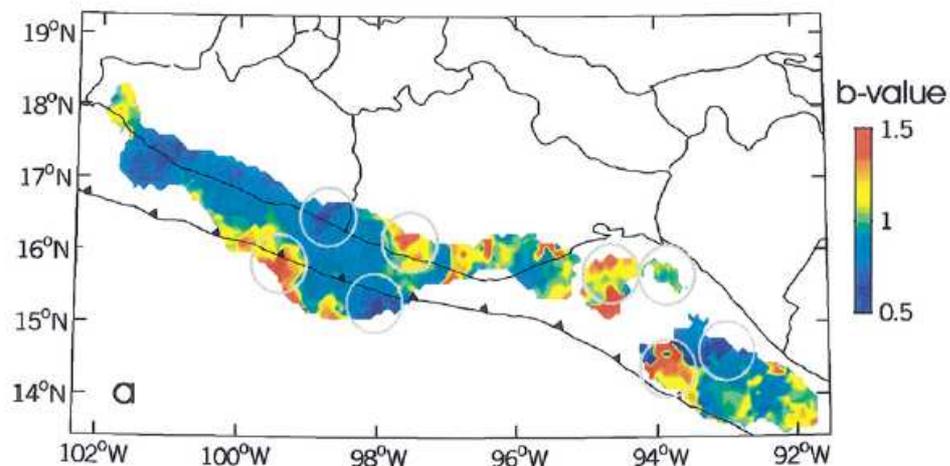


Figura 8.10. Valores de b para la región de las costas de Pacífico en México, el rango de valores va de 0.5 a 1.5 (escala de colores a la izquierda), se observa que la región entre los estados de Guerrero y Oaxaca existe un predominio de valores menores a 1. (Imagen tomada de Zúñiga y Wyss, 2001).

Relacionando la concentración de los esfuerzos y el valor de b , se analiza que cuando el valor de b es inferior a 1 implica un menor tiempo de recurrencia, Stein and Wyssession (2003). Entonces, el valor de b depende de la región sismotectónica.

En el caso para enjambres de terremotos es a menudo mayor que 1 llegando acercarse a 2.5, como ejemplo la sismicidad asociada al colapso de la caldera de Fernandina en la Isla Galápagos (1968) con un valor de $b=1.9$, Stein and Wyssession (2003) donde la sismicidad de la región se asoció a enjambres sísmicos que pueden estar asociados a regiones volcánicas; sin embargo, Zúñiga y Wyss (2001).

Los coeficientes fueron calculados mediante el software Wizmap II del Servicio Geológico Británico. El ajuste de la recta se hizo a través del método de mínimos cuadrados, ver figura 8.11. De esta

manera, para los 109 datos de mayor confiabilidad con el catálogo de la sismicidad de la región de Santa Gertrudis se obtuvo la relación de frecuencia- magnitud se obtuvieron los valores de a y b, de tal forma que la ecuación 2, queda definida de la siguiente manera:

$$\text{Log}_{10} N = 5.43 - 1.70 * M$$

En la figura 8.11 se muestra el gráfico que nos permite determinar cuál es la magnitud esperada a partir de la cual se puede decir que el catalogo esta completo, la cual con lo que se apreció en los histogramas anteriores, esta es de $M \geq 2.2$. Por tal motivo, la minima magnitud de “complitud” (punto inicial de la recta, color rojo) que se deriva de este catalogo es de 2.2, Pacheco, et., al. (2004). El valor de b o pendiente de la curva del logaritmo del número de sismos con magnitud mayor o igual a M, contra la magnitud, es de 1.7, en el intervalo de entre $M=2.2$ y $M=3.2$. Además, se determinó el valor de a, el cual es de 5.43 ± 0.2 , se discriminó por su error tan significativo, quedando sólo $\text{Log}_{10} N = - 1.70 * M$.

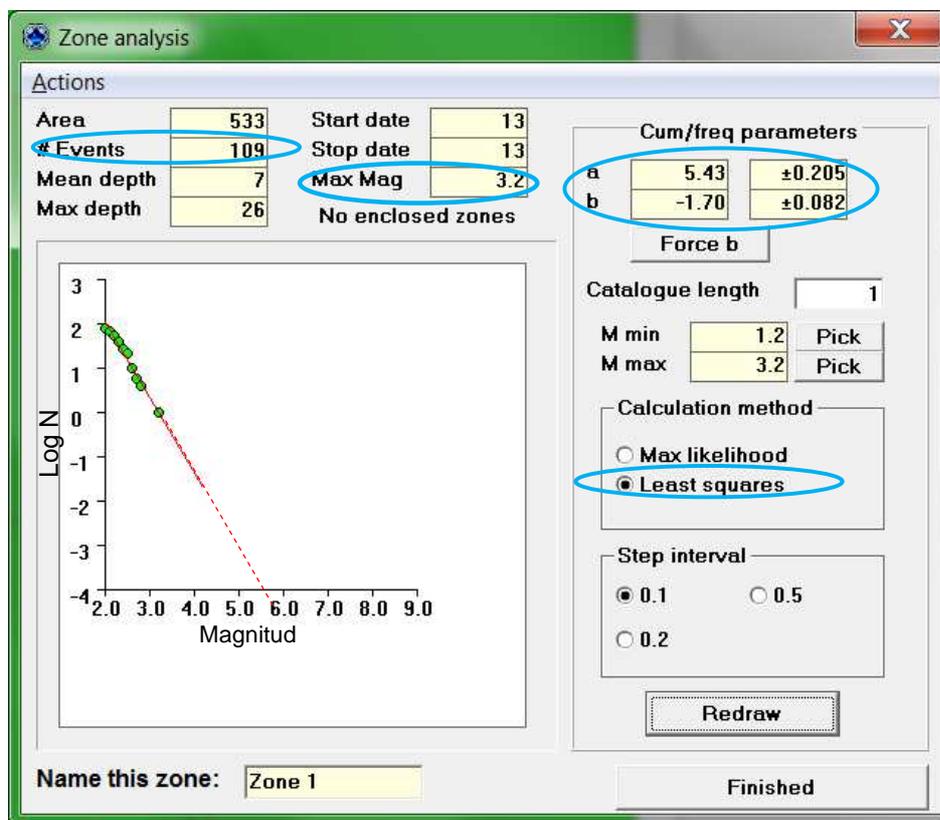


Figura 8.11. Muestra la ventana de resultados obtenida con el software Wizmap II. En el eje de las abscisas se encuentra la magnitud mientras que en el eje de las ordenadas los valores son el logaritmo del número de eventos por año. La línea rojo continua indica la tendencia de los datos y la línea punteada roja es la continuación de la misma pero hacia el eje de las absisas.

De lo anterior podemos observar que $b=1.7$ es un valor alto, el cual esta referido, en este caso, a sismicidad de origen tectónico y para el tiempo del estudio con el número de sismos registrados en total (109) se considera que la zona esta en un estado de esfuerzos donde comienzan a relajarse, es decir, presenta esfuerzos de distension; además nos permite notar que disminuye la proporción de sismos grandes frente a los sismos pequeños, de lo contrario si “b” disminuyera, aumentaría la proporción de sismos grandes frente a los sismos pequeños. Así también para nuestra zona de estudio, se considera un mayor tiempo de recurrencia.

Un antecedente que es importante mencionar es el trabajo realizado para el proyecto: "Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe" (Zúñiga, Et al, 1997), en donde se realizó una regionalización sismotectónica con base en datos de sismicidad instrumental, en dicho trabajo, la zona de estudio se localiza en la región identificada como "BAR", caracterizándose porque delimita a los sismos que se suscitan en la posible continuación de la fisura del Rio Bravo y de las Cuencas y Sierras. La sismicidad se presenta en general a profundidades someras, es de baja magnitud y con una frecuencia de ocurrencia baja. Hay presencia de fallas de tipo normal y de rumbo. Además en esta región es donde se suscitó el sismo histórico de Bavispe en 1887 descrito anteriormente.

Con la descripción dada a esta región (BAR) y de acuerdo con el valor de $b=1.7$ obtenido, es notable que existe una concordancia en cuanto a que se observa como una zona con una concentración de esfuerzos menores. Cabe mencionar que no tenemos antecedentes de cálculos anteriores para la estimación del valor de b para la misma región, por lo que el resultado expuesto aquí es un antecedente importante para estudios posteriores.

Si calculamos el periodo de recurrencia para un sismo de magnitud 6.5 en un intervalo de tiempo de 1 año, resulta que, si obtenemos el valor de N da un valor de $2.398E-6$, en este caso, N va a corresponder al periodo de análisis de un año (tomado del valor de la gráfica del wizmap). Lo anterior se puede entender como $N/1 \text{ año} = 2.398E-6$ (de 1 año) lo que sería una tasa de recurrencia, al calcularlo en tiempo o periodo de recurrencia, simplemente sería el inverso, dando como valor de 416,869 años.

8.7 EFICIENCIA DE LA RED DENSA TEMPORAL (RDT)

Al finalizar la actividad de instrumentación que consistió en el trabajo de campo (selección de sitios), instalación y recuperación de datos, se alcanzó el objetivo de la instrumentación con un **100%** de eficiencia, es decir, para la grabación de cada estación instalada en campo libre, no falló la batería, tampoco se presentó algún factor natural o humano (animal o lluvia) que moviera el sensor pues además se cuidó la seguridad del equipo; así también, la configuración previa del equipo tuvo como resultado, archivos correctamente cerrados por el digitalizador y con la duración del archivo correspondiente. Al extraer la información se cuidaron detalles de organización de datos que permitieron un perfecto desempeño de grabación de la red. Por tal motivo, durante la medición, se generaron los 24 archivos por día para las 12 estaciones, excepto cuando se reubicaron los equipos, no se registró información durante el traslado de éstos. Procurando el detalle de la eficiencia, Comisión Federal de Electricidad (CFE) generó un documento llamado "Bitácora de Campo para Red Densa Temporal" el cual es un formato que permite tener un control sobre el voltaje de la batería, la extracción segura del digitalizador, el estado físico del digitalizador, sensor y batería y mantiene un registro de la próxima visita a la misma para evitar una saturación de la memoria del equipo, y finalmente, el número de serie del sensor y digitalizador y las coordenadas para evitar confundir equipos en el caso que se reubiquen éstos. Este formato contiene un apartado sobre la calibración del sensor previo a dejarlo en medición. Por tal motivo, la campaña de medición cumplió las normas de calidad y eficiencia de la empresa donde la calidad es referida estado físico y calibración de los sensores y en la eficiencia como mínimo se tiene estipulado un 80%.

9.MECANISMOS FOCALES

La determinación del mecanismo focal junto con la cinemática regional nos ayuda a tener una idea de la probable geometría de las estructuras sismogénicas (el sentido y orientación del movimiento del bloque de techo de la falla, y por supuesto, el tipo de falla que produjo el sismo, ya sea normal, inversa, lateral o mixto). Lo anterior indica que una falla normal es cuando el bloque de techo cae y el bloque de piso sube, y sus esfuerzos son de extensión, ver figura 9.1.

El mecanismo focal está asociado con la orientación espacial de la falla mediante los ángulos que la definen. El mecanismo focal por su parte está definido por 2 planos nodales perpendiculares entre sí. Uno de estos planos corresponde al activo y el otro al auxiliar. De tal forma que si tenemos suficientes elementos (distribución de sismicidad, conocimiento de las principales estructuras en campo, etc.) podemos sugerir cuál de los dos planos es el activo. En este trabajo de tesis nos auxiliamos de la geología, reportada por diferentes autores y la distribución de sismicidad para tratar de identificar la estructura sismogénica y su probable plano activo. Los mecanismos focales también proporcionan una idea de los procesos físicos que ocurren en el foco de un terremoto durante la ruptura del material litosférico, y la consiguiente liberación de energía en forma de ondas sísmicas.

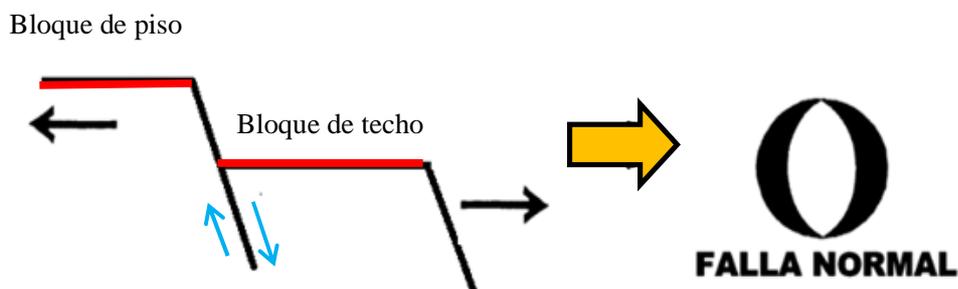


Figura 9.1. Descripción de los desplazamientos del bloque de techo y de piso que generan mecanismos normales.

En este trabajo se utilizó el método de las polaridades de los primeros arribos de las ondas P para determinar el mecanismo focal. El análisis de la distribución de los mecanismos focales permite estimar el estado de esfuerzos en la región. Uno de los métodos más socorridos para determinar el mecanismo focal es el método de polaridades de la onda P, éste es el más sencillo, considera el comportamiento de polaridades y amplitudes del sismograma en función del patrón de radiación de la onda P, para un modelo de foco puntual, representado por un doble par de fuerzas sin momento resultante. El método de polaridades de la onda P, consiste en trazar la orientación de cada rayo desde el foco a cada estación. Para ello se sitúa una esfera unitaria imaginaria en el foco y se calcula la orientación del rayo que arriba en cada estación de registro. La idea básica es que la polaridad (direccional) de los primeros arribos de la onda P varía entre las estaciones sísmicas que están ubicadas a diferentes azimuts con respecto al epicentro de un terremoto. El movimiento es de compresión para las estaciones en las cuales el material cerca de la falla se mueve hacia la estación, o dilatación donde el material se aleja de la estación. En este trabajo los mecanismos focales se obtuvieron con el método del primer impulso de la onda P calculado con el programa FOCMEC. Este programa realiza una eficiente y sistemática búsqueda de la esfera focal y proporciona las soluciones aceptables sobre la base de criterios de selección previamente definidos para errores en la polaridad y en las relaciones de amplitud, Martínez, M. (2011). El criterio para la solución de los mecanismos focales estuvo basado en el Máximo número de error de polaridad permitida, que en nuestro caso fue -1, debido que este valor restringe mejor la solución. Con una búsqueda de soluciones cada 5° y 10°. Este programa está basado en la convención de Aki y Richards (2002).

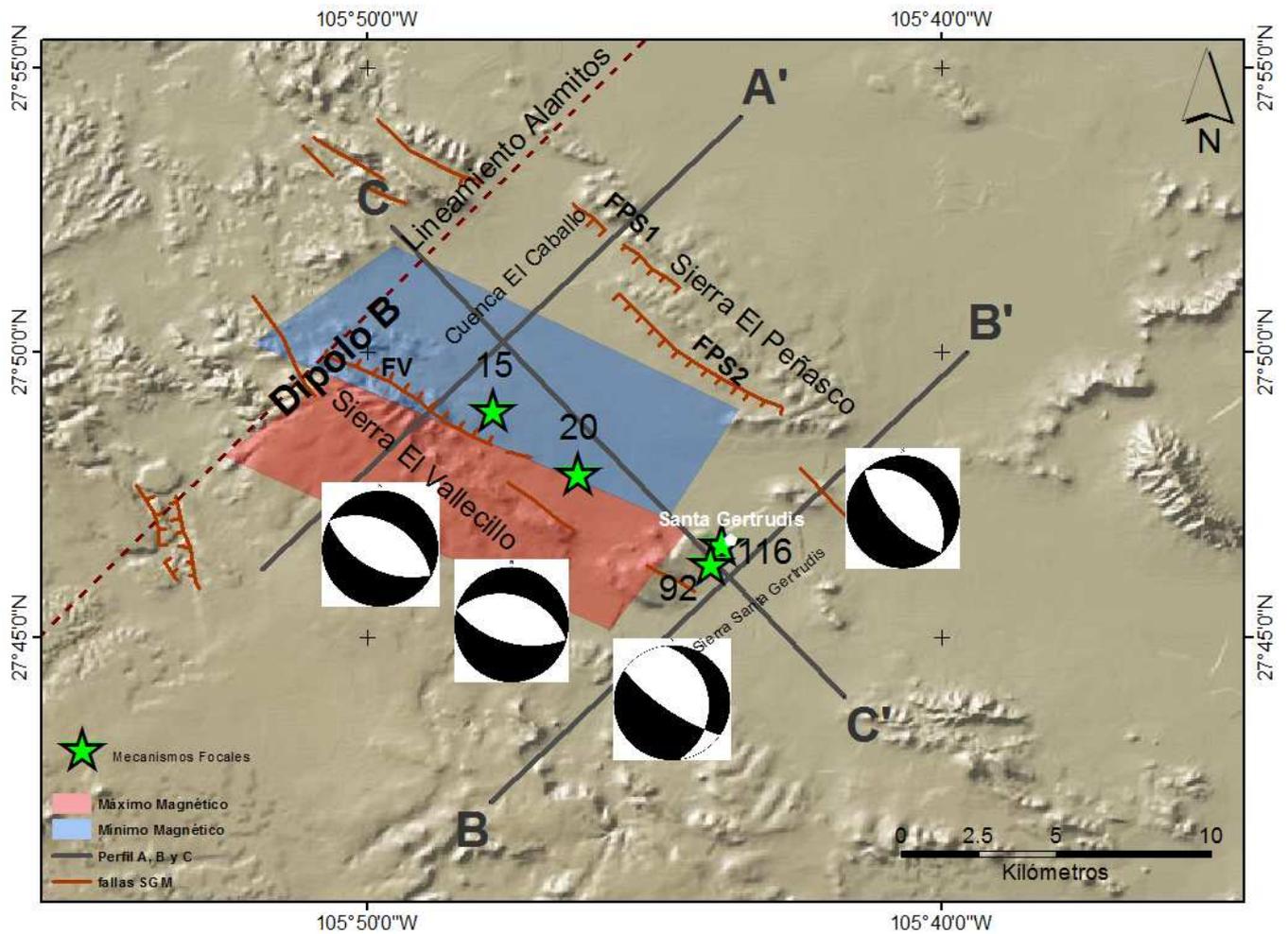


Figura 9.3. Eventos 15, 20, 92 y 116 y sus respectivos mecanismos focales, presentan solución a fallas del tipo normal.

Entonces, se aprecia y acusa que la sismicidad es generada por desplazamientos normales y de acuerdo con sus planos principales de fallamiento se asocian a estructuras de rumbo NW, casi en el mismo ángulo que muestra la falla El Vallecillo. Lo anterior, demuestra que la zona se comporta perfectamente como un graben entre la Sierra El Vallecillo y la Sierra El Peñasco, donde la mayor concentración de epicentros se presenta hacia el extremo SE del graben (Santa Gertrudis), mismo lugar donde se observa un ligero desplazamiento lateral.

Tabla 3. Descripción de los mecanismos focales.

Evento	Plano	Rumbo	Echado	Deslizamiento
15	Falla Principal	N63° W	50°	91°
	Auxiliar	N61° W	40°	89°
20	Falla Principal	N76° W	55°	90°
	Auxiliar	N74° W	35°	89°
92	Falla Principal	N46° W	60°	91°
	Auxiliar	N42° W	30°	89°
116	Falla Principal	N56° W	73°	109°
	Auxiliar	N06° W	25°	43°

10. PERFILES SÍSMICOS

Para observar la distribución de hipocentros se realizaron tres perfiles sísmicos que permitieron observar la continuación en profundidad de alguna estructura en el subsuelo. Las coordenadas de los puntos extremos de los perfiles sísmicos A, B y C, son mostrados en la Tabla 4.

Los perfiles A y B tienen 20 km de longitud, con 5 km de ancho hacia ambos extremos de la línea central y orientación hacia el N46E; cada perfil fue dispuesto casi perpendicular a la sierra El Vallecillo. No obstante, el perfil C tiene las mismas dimensiones que el A y B, sólo que está dispuesto con una orientación N44W, es decir, paralela a la sierra El Vallecillo y cruza por toda la cuenca El Caballo. Los sismos que se grafican en estos perfiles, son los de mejor calidad, donde la nomenclatura se sigue respetando. Estos perfiles se aprecian en plano Apéndice IV. Cabe señalar que la escala vertical del relieve topográfico está exagerado 10 veces para resaltarla.

Se puede observar en los perfiles sísmicos que vienen el texto en color rojo, la proyección de los MF de las fallas definidas (FV, FPS1 Y FPS2) sobre los perfiles, lo cual nos permite, definir la orientación de las fallas que se están estimando a profundidad, con este dato (el valor de las elipses), observamos cómo se definieron las fallas. Excepto en el perfil C-C' donde no se proyectaron los ángulos de los MF debido a que las fallas son paralelas al perfil.

Tabla 4. Muestra las coordenadas de los extremos utilizados, A, B y C.

Perfil	Lat. N	Long. W
A	27.77°	-105.86°
A'	27.90°	-105.72°
B	27.70°	-105.79°
B'	27.83°	-105.65°
C	27.87°	-105.82°
C'	27.73°	-105.69°

PERFIL A-A'

En la parte superior del perfil sísmico se muestra la elevación topográfica y la distribución de hipocentros. En este perfil topográfico, se observa del lado izquierdo la sierra El Vallecillo, en su parte intermedia se encuentra la cuenca El Caballo y en el lado derecha la sierra El Peñasco. En él se graficaron 54 hipocentros en tres intervalos de colores que indican la magnitud de ellos. La posición del perfil es prácticamente perpendicular a la falla El Vallecillo y a las fallas El Peñasco en sus dos segmentos (1 y 2). En este perfil se graficaron 54 sismos, observándose alineaciones que son asociadas a las proyecciones, vistas perpendicularmente las fallas, ver figura 10.1.

La mayoría de los hipocentros se concentraron de manera superficial, es decir, a menos de 6 km de profundidad, y a pesar de ser los eventos con mejor control, de acuerdo con los parámetros descritos anteriormente, es obvia la dificultad de escaso control de profundidad puesto que algunos temblores fueron ubicados alrededor de los 4 y 6 km; característica que obliga a reprocesar los datos. Sin embargo, los hipocentros se encuentran contenidos dentro de la cuenca El Caballo y existe una alta correlación entre la distribución de hipocentros con la geometría que guardan el graben originado por las fallas El Vallecillo y Peñasco en sus segmentos 1 y 2.

Los hipocentros asociados a la falla El Vallecillo se localizan aproximadamente a unos 8 km de distancia del origen del perfil, y la cual se puede deducir un echado aproximado de 67° hacia el NE.

Angulo parecido con la determinación del mecanismo focal como lo consigna el ángulo del plano de falla principal en la solución para los eventos 15 y 20.

Para el extremo contrario al graben, se tiene situado la falla El Peñasco y debido a que se compone de dos segmentos no es posible realmente definir cuál de los dos segmentos es la que presenta movimiento. Ciertamente es, que el segmento 1, ubicado hacia dentro del graben es la que puede correlacionarse casi de manera directa con los hipocentros hasta los 13 km de profundidad. Esta proyección marca una falla del tipo normal con echado de 68° hacia el SW.

Por otro lado, algunos hipocentros presentan lineamientos cuyo ángulo se vuelve más horizontal conforme se incrementa la profundidad. Así, se disponen los eventos ubicados en los intervalos de 9 a 10 km y de 12 a 16 km de profundidad, estos lineamientos presentan escalamientos de la falla principal (FV) la cual en forma aparenta a una falla del tipo lístrico.

Para el flanco SW del graben El Caballo, los mecanismos focales (eventos 15 y 20 con 5.9 y 4.1 km de profundidad respectivamente) muestran que la geometría de ruptura se origina por el movimiento de las fallas de tipo normal, las cuales se ejemplifican esquemáticamente con los desplazamientos del bloque de techo (goben El Caballo) y el bloque de piso (sierra El Vallecillo) proyectado a la falla FV, ver la figura 10.2. En la misma figura pero para el caso contrario, es decir, en el flanco NE del graben El Caballo, el bloque que cae (cuenca El Caballo) y el bloque de piso sube (sierra El Peñasco en sus segmentos 1 y 2), ver la figura 10.2, muestran deslizamientos de tipo normal con echado hacia la Cuenca. La proyección del plano de falla del mecanismo focal para el evento 20, muestra un plano que tiene un echado aparente de 72° y el evento 15, presenta un echado aparente de 74° , lo cual implica que el ángulo va incrementándose entre más se profundiza. Lo anterior acusa la posible caída del bloque que define la FV, que tiende a ser más vertical conforme se profundiza.

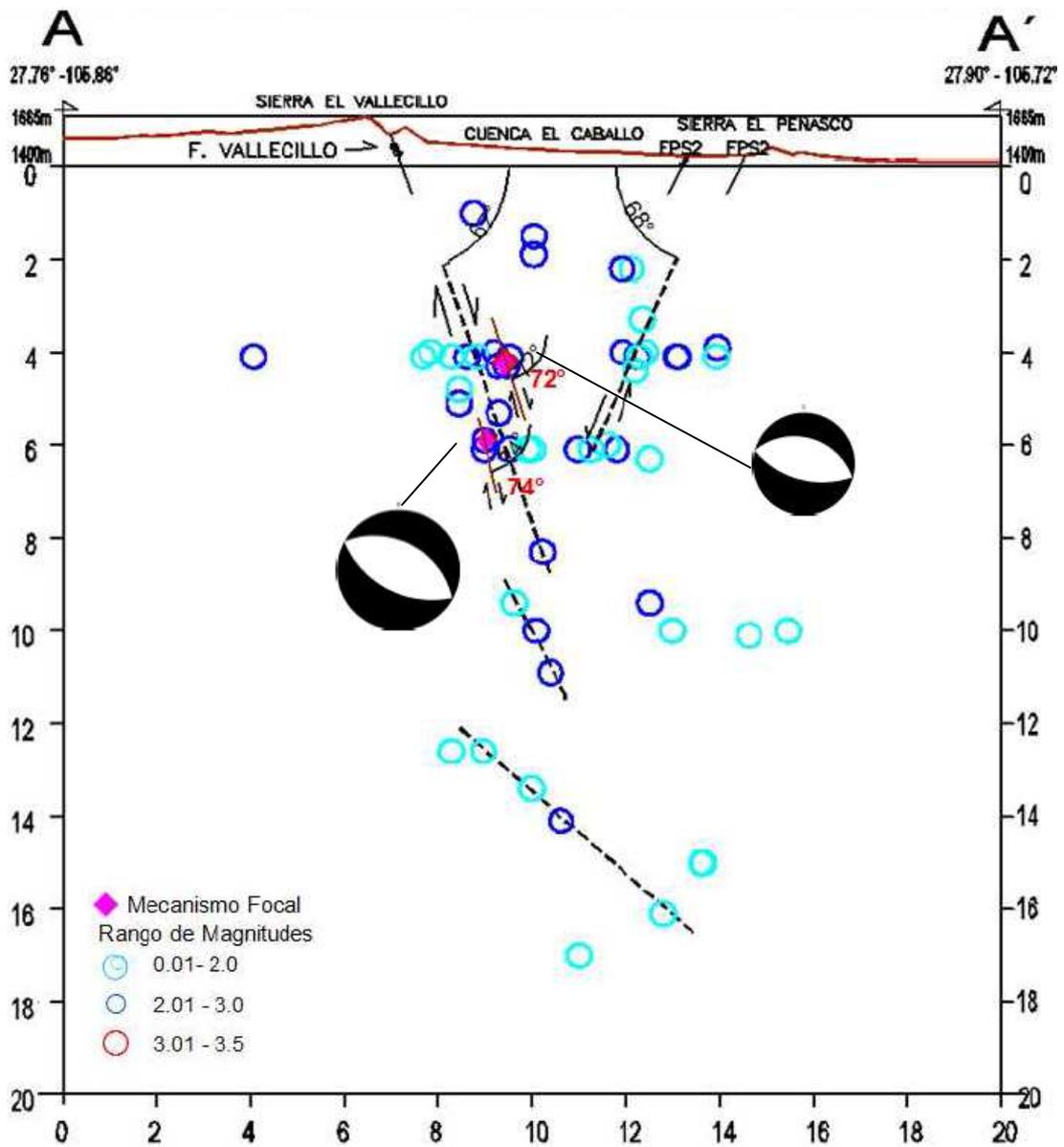


Figura 10.1. Sección Sísmica A-A'. Se muestran los 54 sismos que se encuentran en el área de 10x20km. Se muestra la topografía del perfil. Las líneas color negro punteadas muestran las alineaciones sísmicas asociadas a posibles fallas. Las líneas rojas continuas, muestran la orientación y echado aparente de las proyecciones de los mecanismos focales (evento 15 y 20. Apéndice I. Catálogo Sísmico).

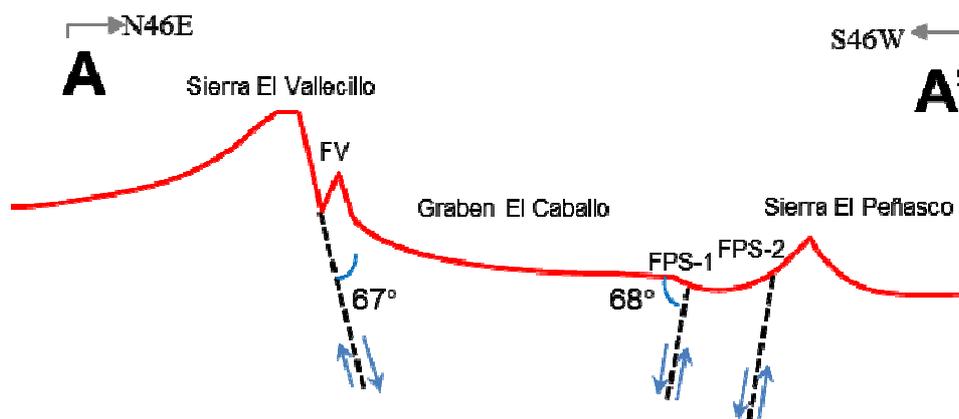


Figura 10.2. Esquema estructural de bloques al norte del graben El Caballo conforme los lineamientos de sísmicidad. FV: Falla Vallecillos, FPS1: Falla Peñasco Segmento 1 y Falla Peñasco Segmento 2.

PERFIL B-B'

En este perfil se graficaron 48 hipocentros donde la mayoría de ellos se concentraron en el intervalo de 7 a 12 km aproximadamente a partir del origen del perfil y justo alrededor del cerro Santa Gertrudis, ver figura 10.3. En la figura se eligieron tres hipocentros que están alineados (línea negra punteada), los cuales fueron elegidos considerando las fallas mapeadas en superficie, es decir, se buscó la alineación de estos hipocentros a fin de ser consistente con los ángulos obtenidos por los MF y concordaran con estimación de un plano de falla que se le estima a las estructuras mencionadas en este trabajo.

En la parte superior del perfil sísmico se muestra la elevación topográfica, ver figura 10.3. El perfil sísmico se ubicó hacia el sur de la sierra Santa Gertrudis por lo que no es evidente la proyección de la cuenca El Caballo. En la figura se observa que la mayoría de los hipocentros al igual que en el perfil sísmico A-A' se concentró desde los 2 hasta los 6 km de profundidad, donde se ven también dos alineamientos cerca de los 4 y 6 km de profundidad que también dan indicio de escaso control.

En este perfil sísmico aparece un hipocentro con profundidad de 24.7 km que los mostrados en el perfil A-A', sin embargo, este sismo no está plasmado en el perfil pues en la actualidad existen pocos eventos corticales con profundidad mayor a 15 km en todo el mundo y considerando el error promedio vertical para este evento (Erz) de 6.7, se descarta para el análisis de los perfiles pues es el valor más alto dentro del catálogo.

Aun así, más o menos se define el graben El Caballo debido a que fueron incluidos los hipocentros localizados hacia dentro del mismo graben. También es posible ver a los 8.2 km de distancia del origen la proyección de la falla El Vallecito en este perfil. Existen hipocentros que pueden alinearse a la estructura FV desde los 3 km y hasta los 20 km de profundidad, el ángulo que forma con la horizontal es de 74° con dirección hacia el NE. Esta falla da muestra del borde occidental del graben.

El otro borde del graben está limitado por la falla geológica inferida y que probablemente sea la continuación de la FPS2 o quizá sea una falla del mismo sistema. El buzamiento de 72° hacia el SW de dicha falla se puede inferir por los hipocentros, desde los 13.8 km de distancia al origen.

La solución del plano de falla de los mecanismos focales fueron proyectados para mostrar el echado aparente en perfil, de tal forma que el mecanismo focal del evento 116 a 4 km de profundidad, define un fallamiento normal con desplazamiento lateral y un echado aparente de 70° con una dirección

semejante a la Sierra El Vallecillo de NW. El evento 92 muestra una falla de tipo normal a 8 km una profundidad con un ángulo de 55°. Este cambio drástico de ángulo de 70° a 55° hace suponer que el sistema de esfuerzos que se genera en ese rango de profundidades, describe una cuenca lítrica.

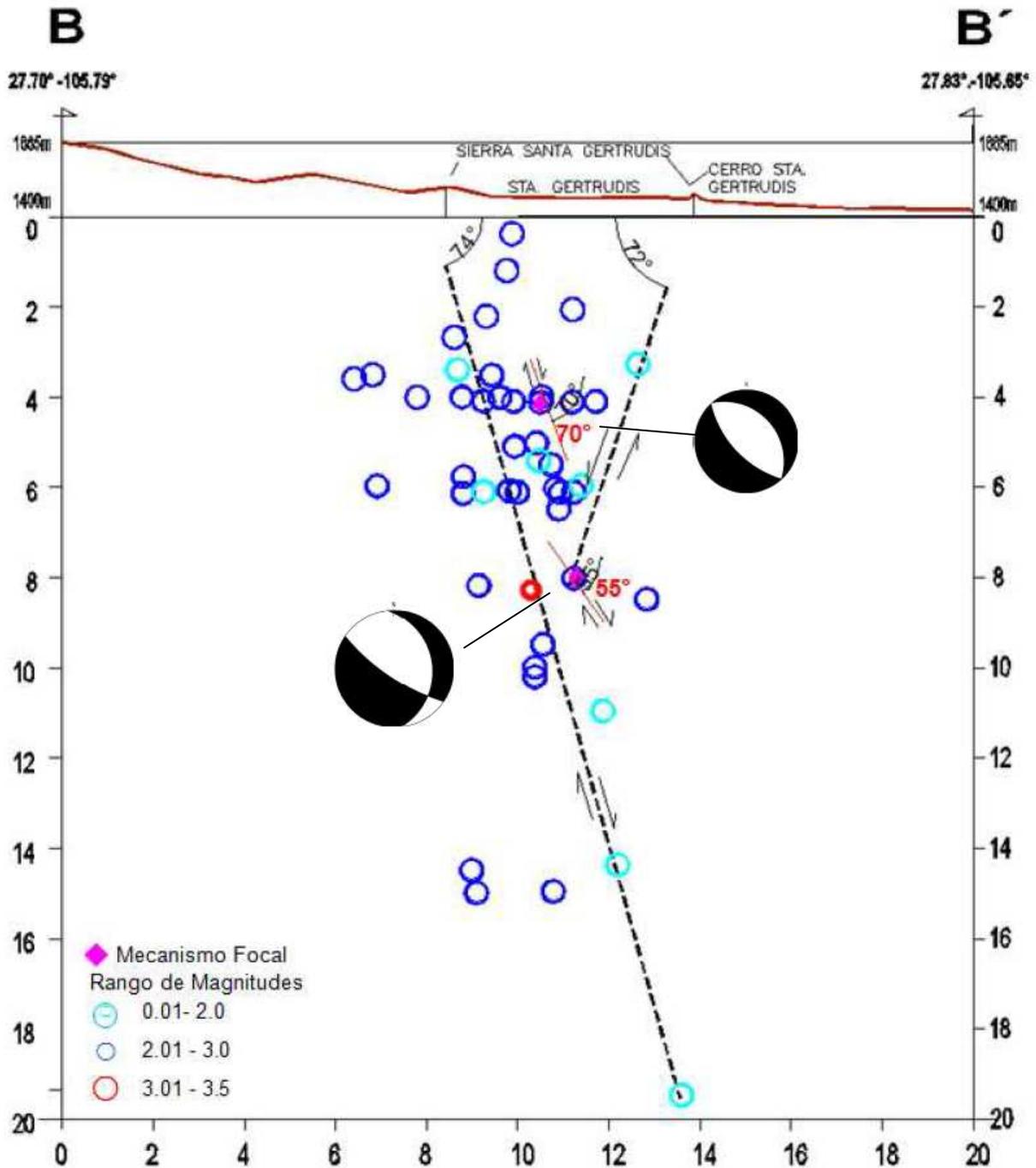


Figura 10.3. Sección Sísmica A-A'. Se muestran los 48 sismos que se encuentran en el área de 10x20km. Se muestra la topografía del perfil. Las líneas color negro punteadas muestran las alienaciones sísmicas asociadas a posibles fallas. Las líneas rojas continuas, muestran la orientación y echado aparente de las proyecciones de los mecanismos focales (evento 92 y 116. Apéndice I. Catálogo Sísmico).

Lo anterior permite realizar un esquema sobre el perfil B-B' donde se dibujan dos fallas importantes, las definidas con anterioridad: FV y FPS2 que limitan la forma de la cuenca al sur del área de estudio, ver figura 9.4. Éstas muestran deslizamientos de tipo normal con echado hacia la Cuenca.

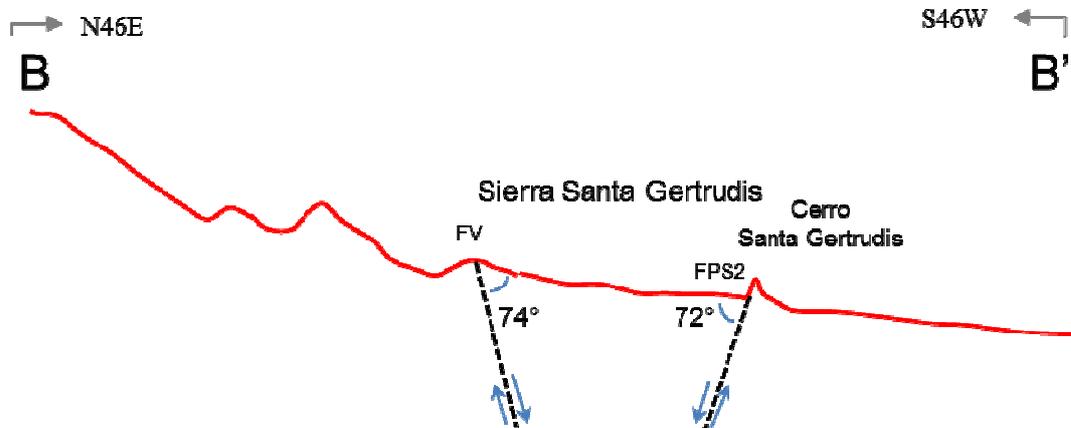


Figura 10.4. Esquema estructural de bloques al sureste del graben El Caballo conforme a la distribución de hipocentros.

PERFIL C-C'

En el perfil sísmico (C-C'), se muestra la elevación topográfica y donde se distingue que la cuenca o graben El Caballo no es un típico hundimiento, sino que presenta un alto relativo hacia la parte central del mismo, es decir, que se visualiza como una loma donde el centro del graben es más alto que los flancos hacia el NW y SE, ligeramente basculada hacia el SE.

Esta sección está construida a lo largo de la cuenca El Caballo y a 15 km aproximadamente del extremo C, se ubica el cerro de Santa Gertrudis. Esta sección abarca en sus lados largos, abarca las sierras El Vallecillo y Sierra El Peñasco. En este perfil se graficaron 107 eventos sísmicos los cuales, tienden a alinearse horizontalmente a 4 y 6 kilómetros de profundidad aproximadamente, ver figura 10.5.

Debido a la disposición paralela de a FV y FPS2 para esta sección, el perfil no intersecta a dichas fallas, entonces los rasgos estructurales que se pueden observar son la extensión de ambas fallas evidenciadas por la distribución de los hipocentros a lo largo del perfil. Los hipocentros se encuentran desde los 2.5 km hasta los 16.5 km aproximadamente del origen del perfil, definiendo así la longitud de 14 km de ruptura total. Sin embargo, como se ha comentado no todos corresponde a una misma estructura, sino que pueden estar subdivididos en varias secciones que sean asociadas a las diferentes estructuras locales.

De la distribución de hipocentros se ha observado que existe una aparente alineación a los 11 km con respecto al origen y en el intervalo de profundidad de 3 a 16 km aproximadamente. Esta línea fue elegida con la intención de asociar la falla en superficie con la obtenida a profundidad y une a los hipocentros hasta la superficie alargándola con el escarpe del cerro Santa Gertrudis, debido a si existe una alienación de la falla en superficie con los hipocentros, se piensa que puede ser debida a una falla geológica no referida por el SGM y que sea la que esté produciendo la mayor acumulación tanto en el número de sismos como en la magnitud de ellos.

En la figura 10.6 se muestra el esquema estructural que tiene el graben El Caballo, el cual como se ha comentado no es una subsidencia completa del suelo, porque en la parte central se evidencia un alto topográfico, además de que bloque está basculado hacia el SE.

Los mecanismos focales obtenidos, no fueron incluidos en este perfil debido a la orientación del perfil (NW) y la orientación de los mecanismos que son NW, al proyectar estos mecanismos al perfil, lo único que veríamos sería una proyección paralela, la cual no nos indica ningún rasgo estructural descriptivo.

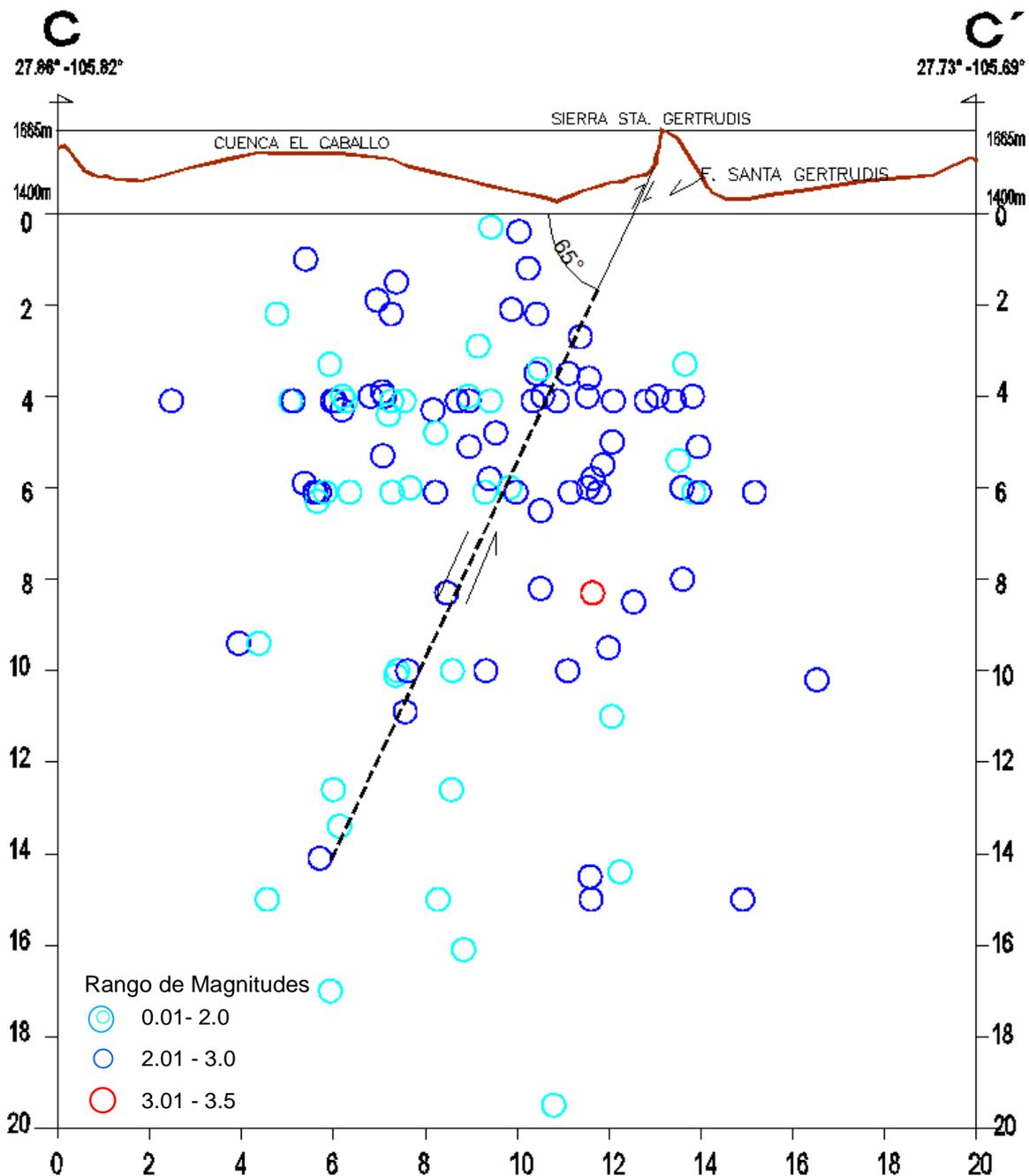


Figura 10.5. Sección Sísmica A-A'. Se muestran los 107 sismos que se encuentran en el área de 10x20km. Se muestra la topografía del perfil. Las líneas color negro punteadas muestran las alineaciones sísmicas asociadas a posibles fallas.



Figura 10.6. Esquema de bloques conforme acusan los lineamientos de la sismicidad para el perfil del graben El Caballo.

11.CONCLUSIONES

Las grandes estructuras regionales como son la Falla San Marcos, La Babia o la Megacizalla Mojave-Sonora no presentaron influencia como fuentes generadoras de sismicidad durante el periodo del estudio, así como el lineamiento Alamito que aparentemente está limitando la actividad sísmica hacia el norte de la zona en estudio tampoco tiene influencia en la sismicidad reciente de la región.

Las fuentes probables de acuerdo con la distribución de hipocentros son las estructuras locales que se asocian al graben El Caballo formado por las fallas El Vallecito y El Peñasco en sus dos segmentos, delimitado al Norte por el lineamiento Alamito y al sur por la sierra Santa Gertrudis. Así, también lo confirman tanto la solución de los mecanismos focales de tipo normal, así como la presencia del dipolo magnético de campo total llamado en este informe Dipolo B. lo importante es que este dipolo de la anomalía magnética puede correlacionarse con la distribución de la sismicidad.

La sismicidad definió dos alineaciones importantes, la primera es la alineación de epicentros que permite asociarla a la FV, definiendo el plano de falla que varía del norte (límite el Lineamiento Alamitos) al sur (límite con la Sierra Sta. Gertrudis). Es decir, la posición de la FV al norte de ésta queda definida por una falla normal con echado de 67° hacia el NE; hacia el sur, presenta un incremento en el buzamiento de la falla a 74° hacia el NE, soportándolo el MF que dio un rumbo NW con variación de 46° a 76° . Así también, se definió con dos fallas FPS1 Y FPS2 de las cuales se estimó la posición de éstas, presentando al norte de la zona de estudio un echado de 68° hacia el SW y al sur, un echado de 72° .

Se determinó que el nivel mínimo de detección obtenido por la RDT para los datos seleccionados, fue de sismos con magnitud ≥ 2.2 , con una confiabilidad en sus datos en la longitud de 3.08km, en la latitud de 3.93km y en la profundidad 9.7 km, donde el RMS, se definió ≤ 0.4 .

Se estiman las dimensiones del graben El Caballo con 14 km de longitud y 5 km de ancho en su porción al sur y 7 km hacia el norte. Además, las secciones acusan que las fallas normales tanto de El Vallecito como El Peñasco no son fallas geológicas continuas, sino que están seccionadas en diferentes segmentos y longitudes, quizá eso favorezca para que no ocurra un deslizamiento súbito de todo el segmento en el mismo instante, y por ende reduzca la magnitud del sismo máximo que pudiera presentarse, ya que, se estimó un temblor máximo de $M_s=6.4$. Si consideramos la magnitud 6.5 para un periodo de recurrencia, se entiende que puede presentarse un sismo mayor a 6.4 de acuerdo a G-R, entonces su periodo de recurrencia es más del doble, que ocurra un sismo de 6.5 que uno de 6.4.

El valor alto de $b=1.7$, considera que la zona esta en un estado de esfuerzos relajado, además nos permite notar que disminuye la proporción de sismos grandes frente a los sismos pequeños, de lo contrario si " b " disminuyera, aumentaría la proporción de sismos grandes frente a los sismos pequeños. Así también para nuestra zona de estudio, se considera un mayor tiempo de recurrencia.

El sismo localizado por el SSN del sismo del 21 de septiembre de magnitud 5.4, se atribuye fue la generadora de la sismicidad ocurrida en lo que se definió como el graben de Santa Gertrudis, compuesto por FV, Cuenca El Caballo y FP (S1 y S2).

REFERENCIAS

- Abrahamson N. A. y Silva W. J. (1997), Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, *Seismological Research Letters*, 68, 1, 94-127.
- Anderson, T. H., and Schmidt, V. A., 1983. The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 941-966.
- Bullen, K. E. y B. A Bolt. (1987). *An Introduction to the Theory of Seismology*, Cambridge, 4^oed., 371 - 395.
- Carrillo Salcedo, Omar. Instrumentación C.H. La Boquilla, Chihuahua. Octubre de 2013. Inédito, CFE.
- Anderson, T. H., y Silver, L. T., 2005, The Mojave-Sonora Megashear-Field and analytical studies leading to the conception and evolution of the hypothesis, pp. 712.
- Anderson. T. H., and Silver, L. T., 1981. An overview of Precambrian rocks in Sonora. *Revista del Instituto de Geología, UNAM*, v. 5, p. 131-139.
- Anderson, T. H., and Silver, L. T., 1978, The nature and extent of Precambrian rocks in Sonora, Mexico (bas.), in *Primer Simposio sobre la Geología y Potencial Minero en el Estado de Sonora*, edited by Roldán-Quintana, J., y Salas, G. A. Resúmenes, Hermosillo, Instituto de Geología, UNAM, p. 9-10.
- Anderson, T. H., and Silver, L.T., 1977b, Geochronometric and stratigraphic outlines of the Precambrian rocks of northwestern México: *Geological Society of America Abstracts with programs*, v. 9, p. 880.
- Anderson, T. H., and Silver, L.T., 1977a, U-P isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora. *Economic Geology*, v. 72, p. 827-836.
- Aranda-Gómez, J. J., Housh, T. B., Luhr, J.F., Henry, C. D., Becker, T., and Chávez-Cabello, G., 2005a. Reactivation of the San Marcos fault during mid- to late- Tertiary extension, Chihuahua, México, In: Anderson, T., *The Jurassic Mojave-Sonora Megashear, Southwest North America: Evidence, Assessment, and alternatives*. Geological Society of America Special Paper.
- Atwater, T. M., 1970. Implication of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, p. 3513-3533.
- Carey, S. W., 1958. The tectonic approach to continental drift, in Carey, S. W., ed., *Continental drift, a symposium: Hobart, Tasmania, Tasmania Univ. Geology Dept.*, p. 177-355.
- Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J. J., Molina-Garza, R. S., Cossio-Torres, T., Arvizu-Gutiérrez, I., González-Naranjo, G. A., 2005. La falla San Marcos: una estructura jurásica de basamento multireactivada del noreste de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVII, n. 1, p. 27-52.
- Christiansen, R. L., and Lipman, P. W., 1972. Cenozoic volcanism and plate-tectonic evolution on the Western United States; Part II, late Cenozoic: *Royal Society of London Philosophical Transactions*, ser. A, v. 271, p. 249-284.

Cook, K. L., 1969. Active rift system in the Basin and Range province, in *The world rift system Internat. Upper Mantle Comm., Upper Mantle Project sci. rept. 19: Tectonophysics*, v. 8, p 469-511.

Franco-Rubio, M., 2007. *Geología y paleomagnetismo de porción centro oriental del estado de Chihuahua, México, definición del lineamiento Delicias-Mulato*, Tesis de Doctorado, posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 278 p.

Doser, D.I. (1987), the 16 august 1931 Valentine Texas, earthquake evidence for normal faulting in west Texas, *BSSA*, Vol. 77, pp. 2005-2017.

Doser, D.I. y Rodriguez, J. (1993) The seismicity of Chihuahua, Mexico and the 1928 Parral earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* V78 pp 97-104

Goldhammer, R. K., Lehman, P. J., Todd, R. G., Wilson, J. L., Ward, W. C., and Johnson, C. R., 1991. *Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental, northeast Mexico, a field guide-book*. Gulf Coast Section, Society of Economic Paleontologist and Mineralogists, 85 p.

Gough, D. I., 1974. Electrical conductivity under western North America in relation to heat flow, seismology, and structure: *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, v. 26, p. 105-123.

Hamilton, W., and Myers, W. B., 1966. Cenozoic tectonics of the western United States: *Reviews of Geophysics*, v. 4, p. 509-549.

Haenggi, W. T., 2001. Tectonic history of the Chihuahua Trough, Mexico and adjacent USA; Part I, the pre-Mesozoic setting; *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LIV, p. 28-66.

Henry, C. D., and Aranda-Gómez, J. J., 1992. The real southern Basin and Range: mid- to late Cenozoic extension in Mexico, *Geology*, v. 20, p. 701-704.

Karig, D. E., 1971. Origin and development of marginal basins in the western Pacific: *Journal of Geophysical Research*, v. 76, p. 2542-2561.

Karig, D. E., 1974. Evolution of arc systems in the western Pacific: *Earth and Planetary Science Ann. Rev.*, v. 2, p. 51-75.

Márquez-Azuá, B., Demets, C., 2003. Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: implications for the neotectonics of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 108 (B9), 2450.

Martinez, Ma.del Rosario, 2011. *Studio sismico de la estructura cortical en el bloque de Jalisco a partir de registros locales del proyecto MARS*. Posgrado en Ciencias de la Tierra.

Mastuda, T., and Uyeda, S., 1971. On the Pacific-type orogeny and its model-extension of the paired belts concept and possible origin of marginal seas: *Tectonophysics*, v. 11, p. 5-27.

McKee, E. H., 1971. Tertiary igneous chronology of the Grand Basin of Western United States Implication for tectonic models: *Geological Society of America Bulletin*, v. 82, p. 3497-3502.

McKee, J. W., Jones, N. W., and Long, L. E., 1984. History of recurrent activity along a major fault in northeastern Mexico. *Geology*, V. 12, p. 103-107.

McKee, J.W., Jones, N.W., and Anderson, T.H., 1990. Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, Mexico: *Geological Society of America, Bulletin*, 102, 593-614.

Nava, Alejandro, "Terremotos", Fondo de Cultura Económica, 1987.

Natali, S.G. y Sbar, M.L. (1982) Seismicity in the epicentral region of the 1887 Northeastern Sonora earthquake Mexico. BSSA V72 pp. 181-196

Noble, D. C., 1972. Some observation on the Cenozoic volcano-tectonic evolution of the Great Basin, Western United States: Earth and Planetary Science Letters, v. 17, p. 142-150.

Nowroozi A. (1985), Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran, Bulletin of the Seismological Society of America, 75, 5, 1327-1338, 1985.

Ottmøller, L., Voss, P., Havskov, J., 2012. Seisan Eartquaker Analysis Software.

Padilla y Sánchez, R. J., 1982.Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México, Austin, Texas, University of Texas (Ph. D. Thesis), 217 p.

Padilla y Sánchez, R. J., 1986.Post Paleozoic tectonics of northeast México and its role in the evolution of the Gulf of México. Geofísica Internacional, v. 25, p. 157-206.

Pacheco, J. Fco., Jiménez, C., Perez, J., et at, 2004. Sismicidad del centro y sur de México. (Periodo Enero a Junio, 2004). Bulletin Geos, Vol. 24, No. 3, p. 457-461.

Salvador, A., 1991c.Origin and development of the Gulf of Mexico basin: in Salvador, A., ed., The Gulf of Mexico basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Geology of North America, v. J, p. 389-444.

Salvador, A., 1991b.Triassic-Jurassic: in Salvador, A., ed., The Gulf of Mexico basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Geology of North America, v. J, p. 131-180.

Salvador, A., 1991a.The Gulf of Mexico basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Geology of North America, v. J, 568 p.

Salvador, A., 1987. Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of the Gulf of Mexico basin. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V. 71, p. 419-451.

Shawe, D. R., 1965.Strike-slip control of basin-range structure indicated by historical faults in western Nevada: Geological Society of America Bulletin, v. 76, p. 1361-1378.

Silver, L.T., and Anderson, T.H., 1974. Possible left-lateral early to middle Mesozoic disruption of the southwestern North American craton margin: geological Society of America, Abstracts with Programs, 6, 955-956.

Slemmons, D. B., 1967.Pliocene and Quaternary crustal movements of the Basin and Range province, USA, in Sea level changes and crustal movements of the Pacific—Pacific Science Cong., 11th, Tokyo, 1966, Symposium 19: Osaka City Univ. Jour. Geosciences, v. 10, p. 91-103.

Stein, S., and Wysession, M., 2003. An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Blackwell Publishing. Pag. 274 – 277.

Stewart, J.H., 1998.Regional characteristics, tilt domains, and extension history of the late Cenozoic Basin and Range province, western North America, in: Faults, J. E., and Stewart, J. H., eds.,

Accommodation zones and transfer zones: The regional segmentation of the Basin and Range Province. Geological Society of America Special Paper 323, p. 47-74.

Stewart, J.H., 1978. Basin-range structure in western North America, a review, in Smith, R.B., Eaton, G.P. (eds.), *Cenozoic Tectonics and Regional Geophysics of the Western Cordillera*: Geological Society of America, Memoir, 152, 1-43.

Wilson, J. R., and Ward, W. C., 1993. Early Cretaceous carbonate platforms of northeastern and east-central Mexico, in Simo, J. A. T., Scott, R. W., and Masse, J. P., eds., *Cretaceous carbonate platforms*. American Association of Petroleum Geologists Memoirs 56, p. 35-50.

Wise, D. U., 1963. An outrageous hypothesis for the tectonic pattern of the North American Cordillera: *Geological Society of America Bulletin*, v. 74, p. 357-362.

Zúñiga, R, Suarez, G, Ordaz, M, García-Acosta, V, "Peligro sísmico en Latinoamérica y el Caribe. Capítulo 2: México", Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 1997.

Zúñiga, R., Wyss, M, "Most – and least likely locations of large to great earthquakes along the Pacific coast of México estimated from local recurrence times based on b-values", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 91, No. 6, 2001.

http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/region_sismica_mx.jsp

http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=62&Itemid=71

APÉNDICE I

CATÁLOGO SISMOLÓGICO

Tabla 1. Catálogo de localizaciones Epicentrales.

	No	Date	HH:MM HL	seg	Lat N	Long W	Prof	Mag	No	Gap	Rms
	1	131117	6:10	30.91	27.3832	-105.2480	15	2.4	4	242	0.06
	2	131118	2:45	23.74	27.8110	-105.6702	14.1	2.3	4	349	0.19
	3	131118	11:04	8	27.9157	-105.5688	7	2.3	4	180	0.31
*	4	131118	16:09	39.46	27.7870	-105.7395	4.1	2.1	8	167	0.25
	5	131118	16:36	42.17	27.5145	-105.7553	3.9	1.5	4	191	0.14
*	6	131118	17:33	50.31	27.8040	-105.7985	4	1.7	8	140	0.37
*	7	131118	21:48	56.33	27.8148	-105.7948	6.1	2.2	8	144	0.3
	8	131119	2:53	39.48	27.7760	-105.7823	0.1	2	10	142	0.44
	9	131119	3:00	35.65	27.4633	-105.7465	1	2.4	4	289	0.2
	10	131119	3:14	45.64	27.8020	-105.5065	4	2.5	4	274	0.3
*	11	131119	3:38	32.02	27.7955	-105.7765	12.6	1.9	10	149	0.25
*	12	131119	6:15	29.19	27.7822	-105.7448	5	2.2	10	164	0.19
	13	131119	8:49	49.79	27.8305	-105.8137	5.4	1.5	6	227	0.04
	14	131119	9:31	20.12	27.8002	-105.7342	3.6	2	6	172	0.12
*	15	131119	9:33	30.64	27.8165	-105.7963	5.9	2.2	8	143	0.19
*	16	131119	9:34	59.65	27.8157	-105.8003	4.1	2.1	8	141	0.18
*	17	131119	9:46	11.78	27.7817	-105.7658	3.4	2	8	152	0.14
	18	131119	10:02	2.09	27.4140	-105.8073	1	2.1	4	292	0.1
*	19	131119	10:08	14.82	27.7825	-105.7600	4.1	2.2	8	155	0.16
*	20	131119	11:04	48.26	27.7982	-105.7720	4.1	2.1	8	152	0.08
	21	131119	13:16	10.66	27.8103	-105.8070	4.9	2.1	8	137	0.48
	22	131119	15:03	29.09	27.8390	-105.8423	2.9	2	8	126	0.46
*	23	131119	18:10	19.24	27.8085	-105.7860	4	2.3	8	147	0.35
*	24	131119	19:07	30.54	27.8012	-105.7758	4.3	2.1	10	151	0.19
*	25	131119	22:15	44	27.7607	-105.7737	3.6	2.5	10	143	0.27
*	26	131120	1:30	35.28	27.7897	-105.7775	5.1	2.2	8	148	0.23
*	27	131120	3:17	12.88	27.7997	-105.7890	4.1	2	8	144	0.29
*	28	131120	3:43	10.93	27.8375	-105.8327	4.1	1.9	8	130	0.38
	29	131120	4:29	33.29	27.7753	-105.7967	6.3	2	8	136	0.48
*	30	131120	4:39	43.64	27.8040	-105.7690	8.3	2.5	10	155	0.17
	31	131120	8:09	47.66	27.7755	-105.7793	10.6	2.7	6	247	0.03
	32	131120	9:44	47.94	27.8193	-105.7915	8.3	2.1	10	146	0.99
*	33	131120	11:26	51.5	27.8183	-105.8068	12.6	2	10	139	0.3
	34	131120	13:15	56.58	27.7510	-106.0740	10	2.2	4	180	0.29
	35	131120	14:19	1.35	27.7840	-105.6822	23	2.1	8	201	0.14
	36	131120	15:40	57.29	27.8343	-105.9287	10	2.3	6	151	0.18
	37	131120	15:43	17.32	27.5793	-105.8552	10	2.1	4	187	0.28
	38	131120	16:22	14.04	27.7433	-105.3765	15	2.3	4	182	0.17
*	39	131120	17:04	4.43	27.7765	-105.7570	14.5	2.3	10	97	0.22
*	40	131120	17:37	28.6	27.7805	-105.7505	6.1	2.5	10	93	0.16
*	41	131120	17:54	51.98	27.7595	-105.7557	4	2.6	10	152	0.31
	42	131120	13:24	7.84	27.7842	-105.7483	8.3	2.9	12	91	0.21
*	43	131120	20:22	38.88	27.7505	-105.7580	6	2.2	8	148	0.18

	No	Date	HH:MM HL	seg	Lat N	Long W	Prof	Mag	No	Gap	Rms
	44	131120	20:30	22.52	27.7735	-105.7203	11.2	2.1	6	261	0.21
*	45	131120	21:15	19.81	27.7755	-105.7608	2.7	2.2	8	153	0.19
	46	131120	22:16	6.09	27.7908	-105.7825	0	2.2	8	145	0.46
*	47	131120	22:44	14.53	27.7907	-105.7703	0.3	2	8	152	0.25
*	48	131120	23:24	32.59	27.7860	-105.7622	2.2	2.1	8	155	0.13
*	49	131121	0:35	52.65	27.8373	-105.8082	9.4	1.9	8	140	0.28
*	50	131121	1:10	58.7	27.8178	-105.7850	13.4	1.7	8	149	0.24
	51	131121	1:17	36.36	27.8947	-106.2702	1	2.2	4	295	0.05
	52	131121	1:48	19.5	27.8078	-105.7755	2.6	1.6	6	242	0.09
	53	131121	1:49	36.88	27.8113	-105.7680	10	1.8	6	244	0.21
	54	131121	2:27	9.41	27.8063	-105.7935	4	2.2	12	76	0.74
	55	131121	2:49	39.51	27.7807	-105.7973	10.1	2.3	12	73	0.74
*	56	131121	3:31	29.98	27.7705	-105.7785	3.5	2.1	8	143	0.18
*	57	131121	5:04	43.24	27.7932	-105.7713	2.9	1.8	8	151	0.16
	58	131121	6:20	8.07	27.5927	-105.7703	1	1.8	4	239	0.26
*	59	131121	6:58	18.87	27.8127	-105.7797	1.9	2.6	12	80	0.21
	60	131121	7:35	48.8	27.8063	-105.7670	6.1	2.4	6	245	0.16
	61	131121	9:35	15.98	27.8980	-106.2657	1	2.2	4	295	0.07
*	62	131121	11:19	42.18	27.8013	-105.7750	6.1	2.5	8	174	0.1
*	63	131121	11:24	7.96	27.8148	-105.7977	1	2.3	8	142	0.21
	64	131121	12:51	2.89	27.8873	-106.2862	1	2.4	4	297	0.03
*	65	131121	12:52	55.52	27.7900	-105.7605	1.2	2.3	8	157	0.15
	66	131121	13:19	19.11	27.5790	-105.8040	0.1	2.8	8	153	1.37
*	67	131121	13:24	7.89	27.8073	-105.7608	1.4	3.2	12	86	0.61
	68	131121	14:08	56.52	27.4747	-105.7518	1	2.5	4	286	0.13
*	69	131121	14:18	8.53	27.8015	-105.7533	2.1	2.1	8	176	0.27
	70	131121	14:32	3.46	27.9093	-105.9557	1	2.3	4	204	0.01
	71	131121	15:31	53.92	27.4802	-105.6273	1	2.6	4	273	0.19
	72	131121	15:32	47.23	27.6697	-105.8183	13.1	2.4	8	146	1.07
	73	131121	15:48	56.75	27.8540	-105.8203	0	2.4	8	136	0.65
	74	131121	16:32	9.64	27.8487	-105.8188	6	2.4	6	221	0.22
*	75	131121	16:39	38.43	27.7823	-105.7572	3.5	2.6	9	121	0.17
	76	131121	17:00	14.4	27.7960	-105.6115	1	2.3	6	238	0.44
	77	131121	17:01	13.9	27.8695	-105.6438	1	2.2	4	225	0.27
	78	131121	17:03	0.46	27.7757	-105.7138	10.1	2.2	6	205	0.55
	79	131121	17:26	7.04	27.8562	-105.5307	1	2.5	6	265	0.7
*	80	131121	18:43	49.34	27.8440	-105.6012	6.1	1.9	8	137	0.3
*	81	131121	18:48	15.76	27.7522	-105.7357	6.1	2.5	8	163	0.18
	82	131121	19:02	33.74	27.8185	-105.8033	3.9	2.5	8	140	0.43
	83	131121	19:27	54.62	27.8098	-105.7948	6.1	2	6	152	0.26
*	84	131121	19:36	8.19	27.7955	-105.7513	6.5	2.4	11	90	0.22
	85	131121	19:45	53.01	27.7452	-105.7132	4.4	2.1	8	177	0.45
	86	131121	19:55	40.83	27.7738	-105.7552	6	2.2	4	305	0.05
	87	131121	19:57	7.27	27.7752	-105.7445	23.3	2.2	12	92	0.55

	No	Date	HH:MM HL	seg	Lat N	Long W	Prof	Mag	No	Gap	Rms
	88	131121	20:07	52.95	27.7848	-105.7553	16.8	2.4	10	93	0.42
*	89	131121	20:11	35.96	27.7845	-105.7627	8.2	2.3	12	85	0.29
	90	131121	20:30	4.55	27.5858	-105.6842	18.8	2.2	6	222	0.45
*	91	131121	22:06	48.6	27.7838	-105.7442	9.5	2.4	8	164	0.13
*	92	131121	22:09	21.76	27.7773	-105.7300	8	2.3	12	99	0.26
*	93	131121	22:20	28.43	27.7750	-105.7578	5.8	2.4	12	86	0.39
*	94	131121	23:05	44.87	27.7758	-105.7585	4	2.2	8	155	0.34
*	95	131122	23:44	40.65	27.8110	-105.7735	10.9	2.1	10	89	0.31
	96	131122	0:02	16.56	27.8080	-105.8643	4.1	1.8	8	114	0.83
*	97	131122	0:06	58.05	27.7945	-105.7820	4.8	1.9	10	146	0.4
	98	131122	0:42	39.21	27.8385	-105.8350	21.2	2.4	6	218	0.4
	99	131122	0:54	24.51	27.7605	-105.7442	6.1	2.3	6	258	0.27
*	100	131122	1:40	31.34	27.7660	-105.7247	15	2.3	8	173	0.18
	101	131122	1:54	47.91	27.8037	-105.7582	6	2.4	7	160	0.2
*	102	131122	1:56	30.21	27.8073	-105.7837	5.3	2.1	8	148	0.09
*	103	131122	2:23	8.97	27.8175	-105.7992	4.1	2	8	142	0.22
	104	131122	2:30	59.75	27.7842	-105.7785	0	1.5	6	146	0.38
	105	131122	2:50	9.32	27.7387	-105.9150	4.1	2	6	221	0.55
*	106	131122	2:55	24.26	27.8130	-105.7893	4.3	2.4	12	77	0.36
*	107	131122	3:01	54.71	27.7870	-105.7595	4	2.6	12	86	0.4
*	108	131122	3:49	46.15	27.8100	-105.7770	1.5	2.4	10	90	0.34
*	109	131122	4:34	36.09	27.8158	-105.7842	6.1	2	8	149	0.07
	110	131122	4:36	32.79	27.8015	-105.5458	10.1	1.7	6	263	0.3
	111	131122	15:14	14.88	27.8942	-105.6252	10	2.1	4	279	0.4
*	112	131122	15:15	39.89	27.7530	-105.7172	10.2	2.4	8	118	0.35
*	113	131122	16:29	59.37	27.8017	-105.7470	4.1	2.3	8	109	0.24
	114	131122	17:52	43.27	27.8047	-105.7585	6	2.5	6	160	0.09
	115	131122	22:22	47.92	27.7430	-105.7303	12.4	2.4	12	97	0.74
*	116	131122	22:26	19.59	27.7715	-105.7332	4	2.4	12	98	0.33
*	117	131122	22:33	58.11	27.7738	-105.7360	4.1	2.5	12	96	0.26
	118	131122	22:43	27.45	27.7848	-105.7298	1.7	2.5	12	99	0.43
*	119	131122	22:54	41.24	27.7732	-105.7355	5.4	2	12	96	0.28
*	120	131122	23:19	36.49	27.7742	-105.7435	4.1	2.8	12	93	0.25
	121	131122	23:34	29.75	27.8163	-105.7647	6.8	2.8	6	171	0.08
	122	131123	3:26	11.94	27.9558	-106.0127	1	2.4	4	233	0.14
*	123	131123	3:28	28.05	27.7732	-105.7295	6.1	2.2	10	171	0.16
	124	131123	3:30	55.46	27.8658	-105.6557	10.4	2.5	6	219	0.35
*	125	131123	3:50	35.3	27.8075	-105.7515	4.8	2.8	12	90	0.28
	126	131123	3:52	15.76	27.5487	-105.7248	15	2.4	4	275	0.06
	127	131123	3:59	14.47	27.7732	-105.7275	6.1	2.6	6	172	0.25
	128	131123	4:04	47.06	27.8448	-105.7585	15	2.9	12	86	0.53
	129	131123	4:21	17.98	27.8108	-105.7510	6	2.5	8	165	0.49
	130	131123	4:56	58.15	27.8307	-105.7800	4	2.9	6	153	0.22
	131	131123	4:59	17.71	27.7717	-105.6992	9.7	2.4	12	115	0.5

	No	Date	HH:MM HL	seg	Lat N	Long W	Prof	Mag	No	Gap	Rms
	132	131123	5:29	53.47	27.7645	-105.6008	15	2.6	4	247	0.4
	133	131123	7:58	44.82	27.8048	-105.7257	4	2.4	10	100	0.62
	134	131123	18:18	57.39	27.4835	-106.0977	10	2.5	8	261	0.58
	135	131123	18:51	30.94	27.8145	-105.7805	4	2.9	12	80	0.83
	136	131123	18:58	4.59	27.8387	-105.7670	7.2	2.2	8	160	0.47
	137	131123	19:18	58.66	27.7887	-105.8842	6.1	0.8	6	191	0.21
*	138	131123	19:23	3.29	27.8235	-105.7663	4	2.2	8	159	0.31
	139	131123	19:24	50.27	27.8393	-105.7775	7.3	2.3	10	82	0.55
*	140	131123	20:05	1.01	27.8230	-105.7382	10	2.2	8	173	0.31
*	141	131123	21:13	12.41	27.7855	-105.7440	5.5	2.7	12	93	0.34
	142	131124	19:40	52.4	27.8685	-105.8077	10	2.2	12	83	0.85
*	143	131124	22:22	12.51	27.8230	-105.8640	4.1	2.1	8	116	0.29
	144	131124	22:55	42.01	27.9000	-105.8538	10	2.3	6	196	0.23
*	145	131124	23:34	16.1	27.7855	-105.7533	6.1	2.1	12	89	0.21
*	146	131124	23:57	14.85	27.8105	-105.7778	6.1	1.9	8	151	0.23
	147	131125	0:40	57.99	27.8325	-105.7830	10	2.2	6	236	0.38
	148	131125	0:50	20.27	27.8063	-105.7188	7.1	2.2	8	182	0.1
*	149	131125	2:00	56.32	27.8360	-105.7342	10	2	10	177	0.17
	150	131125	2:53	10.76	27.7382	-105.6595	22.4	2.1	8	219	0.2
*	151	131125	4:12	35.79	27.7670	-105.7362	5.1	2.8	12	96	0.27
	152	131125	5:21	36.06	27.7343	-106.2273	10	3.5	4	281	0.33
	153	131125	5:31	19.68	27.8328	-105.7245	10	2.6	8	182	0.27
	154	131125	5:41	47.57	27.8562	-105.7985	10	0	4	282	0.29
*	155	131125	5:43	44.83	27.8063	-105.7545	5.8	2.5	8	162	0.29
	156	131125	5:46	5.68	27.8073	-105.5417	10	2.2	4	264	0.27
*	157	131125	6:16	25.96	27.8187	-105.7475	4.1	2.5	12	91	0.22
*	158	131125	10:20	44.34	27.7922	-105.7608	0.4	2.2	8	157	0.29
*	159	131125	10:24	38.03	27.7882	-105.7512	10	2.5	10	108	0.31
*	160	131125	5:07	35.22	27.8365	-105.7535	3.9	2.1	8	138	0.27
*	161	131125	5:44	49.73	27.8087	-105.7752	10	2.5	8	127	0.35
*	162	131125	5:51	35.37	27.8275	-105.7820	6.1	2.1	8	127	0.29
	163	131125	6:07	18.64	27.8160	-105.7395	4.1	2.2	12	139	0.55
*	164	131125	7:14	17.94	27.8383	-105.7658	4.1	2.5	14	77	0.18
*	165	131125	10:32	2	27.8010	-105.7525	6.1	2.3	10	139	0.33
*	166	131125	15:16	38.33	27.8348	-105.7935	14.1	2.7	8	142	0.12
*	167	131125	16:15	12.95	27.8582	-105.7922	9.4	2.2	10	102	0.24
	168	131126	0:00	9.87	27.9722	-106.2973	10	2.6	4	311	0.35
*	169	131126	3:03	3.34	27.8325	-105.7710	4.1	2.2	8	135	0.15
*	170	131126	4:20	16.46	27.8388	-105.7473	10.1	1.8	10	98	0.25
	171	131126	5:13	55.41	27.8027	-105.7275	15	1.9	6	256	0.06
*	172	131126	5:34	30.73	27.8610	-105.7812	15	1.5	12	94	0.31
*	173	131126	5:42	2.24	27.8358	-105.7895	17	1.9	10	111	0.33
*	174	131126	6:08	39.7	27.8147	-105.7518	4	1.8	10	134	0.22
*	175	131126	6:21	34.21	27.8320	-105.7760	6.1	2.2	10	155	0.37

	No	Date	HH:MM HL	seg	Lat N	Long W	Prof	Mag	No	Gap	Rms
*	176	131126	6:23	11.16	27.8268	-105.7478	15	1.8	8	153	0.14
*	177	131126	6:51	2.72	27.8340	-105.7710	3.3	1.8	12	91	0.23
*	178	131126	7:05	52.37	27.7770	-105.7562	15	2.1	10	96	0.28
*	179	131126	7:33	25.77	27.8105	-105.7320	19.5	1.8	10	141	0.15
*	180	131126	9:33	41.44	27.8527	-105.6935	25.7	2.3	10	117	0.29
	181	131126	9:37	51.91	27.8297	-105.7365	8.9	0	6	251	0.09
*	182	131126	10:45	49.42	27.7945	-105.7260	8.5	2.3	12	90	0.24
	183	131126	11:00	1.92	27.6662	-105.6310	14.6	1.9	8	227	0.25
*	184	131126	20:08	14.39	27.8313	-105.7692	4.1	2	10	91	0.19
	185	131126	21:14	11.6	27.8278	-105.7488	6.1	1.7	8	168	0.47
	186	131126	23:23	2.73	27.8207	-105.7192	16.7	2.5	10	183	0.4
*	187	131127	1:04	18.48	27.7860	-105.7203	3.3	1.6	8	129	0.18
*	188	131127	6:06	32.03	27.7635	-105.7412	6.1	2	10	96	0.26
	189	131127	6:14	41.26	27.7563	-105.6890	1	1.9	10	114	2.42
	190	131127	10:05	38.12	27.8215	-105.7528	6.1	1.8	10	92	0.42
	191	131127	10:07	3.04	27.8525	-105.7740	14.5	1.7	10	124	0.66
*	192	131127	11:19	1.14	27.8400	-105.7797	2.2	1.7	10	82	0.38
*	193	131128	1:13	23.23	27.8278	-105.7787	6.1	1.4	8	153	0.3
*	194	131128	3:11	36.87	27.8283	-105.7577	10	1.2	12	81	0.38
*	195	131128	4:18	35.09	27.8367	-105.7717	6.3	1.2	10	91	0.16
	196	131128	5:20	12.47	27.5223	-105.7575	14.4	1.1	8	111	0.47
*	197	131128	6:11	1.39	27.8225	-105.7655	2.2	2.3	12	84	0.19
*	198	131128	6:19	52.91	27.8030	-105.7523	6	1.7	8	138	0.26
	199	131128	8:01	58.23	27.6353	-105.5610	14.9	2	6	264	0.3
*	200	131128	11:02	34.85	27.7915	-105.7353	11	1.9	12	87	0.19
*	201	131128	13:18	10.69	27.7922	-105.7322	14.4	1.9	14	84	0.31
	202	131128	20:05	54.2	27.8620	-105.8207	6	1.8	6	218	0.35
*	203	131128	21:10	32.1	27.8178	-105.7650	6	1.7	12	85	0.21
*	204	131128	21:19	31.47	27.8133	-105.7470	4.1	1.9	10	91	0.31
*	205	131128	22:09	49	27.8177	-105.7500	16.1	1.9	10	92	0.18
*	206	131128	22:18	18.16	27.8333	-105.7507	4.1	1.9	8	128	0.34
*	207	131129	1:10	49.22	27.8247	-105.7640	4.4	2	14	75	0.31
	208	131129	4:09	58.09	27.8362	-105.7212	13	1.7	8	184	0.08
*	209	131129	5:07	0.56	27.8138	-105.7480	6.1	1.7	8	167	0.24

APÉNDICE II

FOTOGRAFICO



Fotografía 1. "Corraleño" (Equipo 4178)



Fotografía 2 "Nogalejo" (Equipo 4184)



Fotografía 3. "San Pedro" (Equipo 4185)

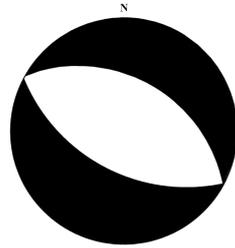


Fotografía 4. "Laguna de las Vacas" (Equipo 4189)

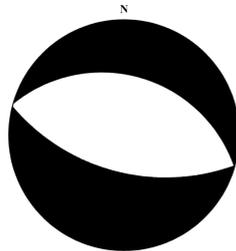
APÉNDICE III

MECANISMOS FOCALES

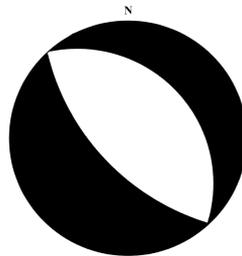
Mecanismo referido con el Número 15 del catálogo sísmico (Apéndice I)
Plano auxiliar, en grados: 299, 40 89 Plano de Falla, en grados: 117.69, 50.01, 90.84



Mecanismo referido con el Número 20 del catálogo sísmico (Apéndice B)
Plano auxiliar, en grados: 286, 35, 89
Plano de Falla, en grados: 114.78, 50.01, 90.70



Mecanismo referido con el Número 92 del catálogo sísmico (Apéndice I)
Plano auxiliar, en grados: 318 30 89 Plano de Falla, en grados: 136.85, 60.01, 90.58



Mecanismo referido con el Número 116 del catálogo sísmico (Apéndice I)
Plano auxiliar, en grados: 354 25 43
Plano de Falla, en grados: 124.20, 73.25, 108.83

