



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

SISMICIDAD EN EL PONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO
RESULTADOS EN LA PARTE NORTE DE LA DELEGACIÓN
ÁLVARO OBREGÓN

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:
THALÍA ALFONSINA REYES PIMENTEL

DIRECTOR:
Dr. MARTÍN CÁRDENAS SOTO

2009



AGRADECIMIENTOS.

Esta tesis se realizó con el apoyo del convenio de colaboración entre la Facultad de Ingeniería de la UNAM y la Delegación Álvaro Obregón para el estudio de zonas minadas en la zona poniente de la Ciudad de México.

Se agradece a las autoridades de la Delegación Álvaro Obregón, por las facilidades brindadas para la instalación de estaciones sísmicas, en especial al Ing. Alfredo Alanis Alcántara.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM (IINGEN), por las facilidades en el préstamo de equipo para la instalación de estaciones, así como equipo experimental realizado en la Coordinación de Ingeniería Sismológica en la primer etapa de monitoreo sísmico. De manera especial agradezco al Dr. Jorge Aguirre, al M. en C. Miguel Rodríguez y a los Ing. Horacio Mijares y Julio Cuenca.

A la Red Sísmica del Valle de México (RSVM), al Servicio Sismológico Nacional (SSN), y en especial al Dr. Luis Quintanar, por la facilidad brindada para compartir los datos de las estaciones.

Parte de la instrumentación, se llevó a cabo gracias al apoyo brindado por el Ing. Mario Simonett de la empresa AMPERE, con el préstamo de sensores GURALP.

Un especial agradecimiento a la Facultad de Ingeniería, a la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (DICT) y al Departamento de Geofísica por las facilidades y el apoyo brindados, así como por la calidez de las personas que hay laboran.

A mis sinodales: Dr. Luis Quintanar, M.C. David Escobedo, Dr. Jorge Aguirre, Ing. Luis Arturo Tapia. Por sus atinadas observaciones a este trabajo, y por el tiempo que dedicaron a esta tesis.

Un profundo agradecimiento a mi profesor de Sismología de Mov. Fuertes, una persona que me enseñó lo apasionante y fascinante que es la Geofísica, mi primer y único jefe hasta el momento, mi director de tesis y un gran amigo. Gracias Dr. Martín Cárdenas Soto.

Y por supuesto, a mi alma máter, mi segundo hogar y el lugar donde crecí como persona, la hermosa UNAM, GRACIAS!!!

DEDICATORIA.

A mis papas, que son todo en mi vida y vivo gracias a ellos. Les dedico este trabajo, que aunque tarde un poco, lo hice!! Gracias por todo y por estar siempre ahí.

A mis hermanas Jimena y Mara, que siempre estuvieron y están cerca de mí en todo momento, son mis mejores amigas y ejemplos de vida.

A mi hermano Alfonso, con quien he compartido una vida llena de alegrías, eres mi mejor amigo, la persona con quien comparto un interés profesional, te admiro mucho.

Agradezco profundamente a Mara, que trajo a mi mundo a dos personitas que hicieron que mi vida y mi corazón se llenara y fuera feliz con solo ver sus sonrisas, Paulina y Luis. Los amo.

A aquellas personas que conocí en el andar de la Facultad, y que me brindaron su amistad en especial: Eury, Brenda, Gaby, Luis, Minerva, Omar, Rafa, Juan.

A Omar gracias por todo.

A todos mis profesores de la Carrera, gracias por su conocimiento y dedicación.

A tres amigos que tuve la fortuna de conocer hace poco y cuya amistad se va fortaleciendo día a día: Martín, Jorge y David.

INDICE

1.-	INTRODUCCIÓN	
2.-	MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO.....	5
	2.1.- Zonificación de la CVM.....	14
	2.2.- La Sierra de las Cruces (SC).....	16
	2.3.- Fallas presentes en la Sierra de las Cruces (SC).....	21
	2.4.- Marco Geológico.....	25
	2.5.- El relieve de la Delegación Álvaro Obregón.....	25
	2.6.- Hidrología.....	29
	2.7.- Litología.....	30
3.-	SISMICIDAD Y ESTUDIOS PREVIOS.....	35
	3.1.- Redes de monitoreo sísmico.....	36
	3.2.- Sismicidad en la SC y piedemonte.....	40
4.-	CAMPAÑAS DE MONITOREO.....	48
	4.1.- Primer campaña.....	50
	4.2.- Segunda y tercer campaña.....	56
	4.3.- Cuarta campaña.....	62
	4.4.- Quinta campaña.....	64
	4.5.- Mediciones de Ruido Ambiental.....	66
5.-	ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS.....	69
	5.1.- Eventos del 23 de Noviembre del 2008.....	73
6.-	CONCLUSIONES.....	92
	REFERENCIAS.....	94

ANEXO A

Tabla A1.....	96
Tabla A2.....	100
Cocientes espectrales	
Figura A1.....	105
Figura A2.....	106
Figura A3.....	107
Figura A4.....	108
Figura A5.....	109
Figura A6.....	110
Figura A7.....	111
Tabla A3.....	112
Tabla A4.....	112
Tabla A5.....	113
Tabla A6.....	114

ANEXO B

B.1.- Trazas de los eventos locales de la tabla A2.....	116
B.2.- Eventos del 23 de Nov. 2008, estaciones DAO.....	132
B.3.- Eventos del 23 de Nov. 2008, estaciones RSVM.....	142

1.- INTRODUCCIÓN.

La Delegación Álvaro Obregón (DAO) se ubica al poniente de la Ciudad de México, en las faldas de la Sierra de las Cruces. La mayor parte de la zona urbana de esta delegación se encuentra dentro de la denominada zona geotécnica de lomas, y parte en la zona de transición. El relieve en la DAO es muy abrupto dividiéndose en tres zonas importantes: laderas montañosas, piedemonte y planicie lacustre (Lugo-Hubp *et al.*, 1995), aunado a estas características, por los terrenos de la DAO existe un sistema de fallas (Mooser *et al.*, 1986), muchas de las cuales están clasificadas como inactivas, sin embargo, la Red Sísmica del Valle de México (RSVM) cuenta con una lista considerable de eventos localizados dentro de la DAO.

La litología de la DAO consiste de materiales de la Formación Tarango (flujos piroclásticos, depósitos aluviales, paleosuelos, etc.) que datan del Pleistoceno; y que forman las laderas montañosas y un extenso piedemonte. Es debido a esta litología que a principios del siglo XX se generó una explotación de bancos material para la construcción cuya extracción no fue sistemática, generando sitios con cavernas y taludes que en muchos de los casos son actualmente inestables. Hoy en día, el desordenado crecimiento urbano sobre esos sitios ha causado hundimientos locales y falla de taludes.

La mayor parte de la superficie de la DAO ha sido geotécnicamente clasificada como zona firme, y en menor proporción en zona de transición. Un estudio realizado con algunas de las escasas estaciones acelerométricas que se encuentran en la zona de lomas muestra que existen efectos de sitio en el rango de frecuencia de 1 a 3 Hz (Montalvo *et al.* 2003).

El peligro sísmico al que está expuesta la zona urbana de la DAO es el mismo que amenaza la mancha urbana de la zona de lago, el cual se trata tanto de los sismos de subducción (los cuales pueden generar movimiento sísmico energético en frecuencias altas) y sismos de fallas locales o regionales como el de la potencial falla de Acambay. El peligro sísmico asociado entonces es mayor, al considerar la densa cantidad de viviendas asentada en zonas inestables de esa demarcación.

El objetivo de este estudio es caracterizar la sismicidad en los terrenos de la DAO, discriminando los eventos ajenos a la zona de estudio y haciendo énfasis a sismos muy locales de la zona poniente ciudad de México.

Para llevar a cabo el objetivo, la Facultad de Ingeniería de la UNAM (FI) en convenio con la DAO, ha llevado a cabo una serie de proyectos de geotécnica y geofísica, algunos de ellos, enfocados en caracterizar las minas abandonadas, y otro (que atañe al presente trabajo) en el monitoreo sísmico de la región.

Para llevar a cabo un monitoreo eficiente, se planteó la necesidad de contar con una red de al menos tres sismógrafos que monitoreará los movimientos sísmicos que en algunas ocasiones han sido reportados por los habitantes de la región. Por ello, la FI instaló desde el año 2005 arreglos triangulares con sismógrafos triaxiales de banda ancha, que han registrado prácticamente de forma continua el movimiento del suelo.

En este trabajo nos damos a la tarea de revisar los registros sísmicos de esos arreglos seleccionando los eventos locales e identificando el origen más probable de éstos. En el capítulo 2 se presenta un análisis de la historia geológica de la formación del Eje Neovolcánico Mexicano, destacando el origen y dirección de las fallas que se formaron, así como la importancia de estas en el origen y orientación de las Sierras que formaron la Cuenca endorreica de México.

De igual manera se aborda la compleja tectónica y sistema de fallas que se presenta en el piedemonte de la Sierra de las Cruces y su íntima relación con el desarrollo urbano de la zona poniente.

En el capítulo 3 se hace una reseña de la sismicidad histórica de la zona y de los esfuerzos realizados por varios autores (Delgadillo 2001 y Huesca-Pérez 2008) para tratar de caracterizar y determinar los mecanismos de fuente que producen sismicidad en el poniente, de igual forma, se mapearon los eventos históricos de la base de datos de la RSVM y de una recopilación realizada por el Dr. Mota-Palomino (Cserna, *et al.*, 1988) buscando así, la relación entre la sismicidad y los sistemas de fallas del piedemonte descritos por (García-Palomo, 2008).

Posteriormente en el capítulo 4 se describen en orden cronológico las campañas de monitoreo, detallando el equipo empleado, las características de las estaciones, áreas de cobertura y resultados obtenidos. Finalmente en el capítulo 5 se presenta el análisis de los eventos locales registrados. Debido a que un gran número de eventos solo fue registrado por una estación se hace un análisis de polaridad a fin de estimar la dirección del evento y generar una zona probable epicentral.

Una serie de dos eventos en un lapso de una hora, se registraron en dos de las estaciones que monitoreaban en ese momento a la DAO, en el esfuerzo por ubicar el epicentro de los eventos se buscó el apoyo de estaciones pertenecientes a la RSVM, que hubieran registrado los eventos, dando un total de cinco estaciones de la red. De tal forma que se contó con siete estaciones que registraron los eventos.

Al revisar los datos de manera conjunta, los eventos registrados en las estaciones aumentaron a cuatro (todos en el lapso de una hora), lo que generó a incertidumbre en saber si todos provenían de la misma fuente. En un primer esfuerzo por conocer la ubicación epicentral de los eventos, se realizó el método gráfico de intersección de circunferencias para al menos tres estaciones con cuatro diferentes velocidades. Y posteriormente con ayuda del programa Hypo.

De igual forma, se obtuvieron los valores de magnitud coda e intensidad para los eventos. Los resultados obtenidos del análisis de estos eventos se presentan en el capítulo 5.

Los resultados obtenidos son confrontados con los datos tectónicos, geológicos y de sismicidad histórica presentados en capítulos anteriores, a fin de validar y evidenciar la actividad sísmica que se ha mantenido de manera constante y casi imperceptible para el hombre en la zona poniente de la Cuenca de México.

RESUMEN.

Los riesgos geológicos que se presentan en la Delegación Álvaro Obregón (DAO) que han puesto en riesgo latente a la población en varias ocasiones, ha propiciado la generación de convenios de colaboración entre la Facultad de Ingeniería (FI) de la UNAM y la DAO, a fin de caracterizar y definir diversos agentes geológicos que afectan la zona. Uno de los objetivos de este convenio está fundamentado en los reportes de la población en relación a la percepción de movimientos del suelo o bien sismos. Muchas redes de monitoreo sísmico funcionan a nivel Nacional y local (dentro de la Cuenca de México), sin embargo no existe ninguna estación sísmica que registre de manera continua dentro de la zona poniente de la Ciudad de México, lo que trae como consecuencia que si el evento no fue lo suficientemente grande (en magnitud) las estaciones que se encuentran dentro de la Cuenca no generan alarma de la ocurrencia de actividad sísmica. Por lo cual las autoridades de la DAO no se encuentran con las herramientas suficientes para asegurar o desmentir a la población en relación a lo que perciben.

De tal forma, la FI ha monitoreado la sismicidad de la zona norte de la DAO desde el año 2005, por medio de estaciones que se han organizado en arreglos triangulares de al menos tres estaciones, y con sensores triaxiales de banda ancha. El objetivo del monitoreo consiste en la detectar y caracterizar la sismicidad local perteneciente al poniente de la Cuenca de México.

Los resultados obtenidos hasta finales del 2008 muestran 15 eventos locales de los cuales 11 fueron registrados por solo una estación y los 4 restantes se registraron en más de tres estaciones. Se utilizaron diferentes modelos de velocidad para ubicar a los epicentros de los eventos. El sitio de los epicentros se ubica en zonas donde la sismicidad histórica registrada muestra que se trata de zonas muy activas, y donde el sistema de fallas pertenece a la parte centro de la Sierra de las Cruces.

De esta manera se demuestra la actividad sísmica de tipo local en la zona poniente de la Cuenca de México, y la necesidad de un monitoreo sísmico continuo con estaciones fijas.

2.- MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO.

A continuación se presenta un marco teórico general de la geología en la zona de estudio, a fin de comprender de manera clara y objetiva la dinámica estructural que ha sufrido el centro del país en el pasado geológico y que da como resultado una estratigrafía y tectónica asociadas.

Se presenta al lector, la formación y geología de la Cuenca de México (CM) en forma genérica y posteriormente se tratará más a fondo la geología y tectónica de la zona poniente de la Cuenca de México, lugar donde se ubica la DAO.

El Eje Neovolcánico Mexicano (ENVM) es un arco volcánico continental, con una edad datada del Mioceno al reciente, su longitud es de 1000 km y su ancho varía de 50 a 250 km (Fig. 2.1). Se extiende desde las costas del Pacífico en el estado de Nayarit, hasta las costas del Golfo de México en el estado de Veracruz. Su origen está relacionado con la subducción de las placas de Cocos y Rivera debajo de la Norteamericana.

La FVTM puede ser dividida en tres sectores: el occidental por tres fosas tectónicas llamadas Tepic, Colima y Chapala; la central, constituida por vulcanismo monogenético de la región Michoacán – Guanajuato; y el oriental, caracterizado por el alineamiento de grandes estratovolcánes en dirección general N-S (García-Palomo *et al.* 2008).

La Cuenca de México, se ubica dentro de la porción oriental de la FVTM, se localiza entre los paralelos 19° 01' 18" y 20° 09' 12" de latitud norte y entre los meridianos 98° 31' 58" y 99° 30' 52" de longitud oeste de Greenwich. La cuenca se encuentra rodeada de las siguientes zonas montañosas: al norte por las sierras de Tezontlalpan, Tepetzotlan y Pachuca (con una altitud media de 3 000 msnm). Al este

se localiza la Sierra Nevada, con altitudes de hasta 5 747 y 5 286 msnm. En la cima de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl, al sur los límites de la cuenca son la sierra del Ajusco y Chichinautzin (puntos máximos de 3 800 y 3 900 msnm, respectivamente) y al poniente yacen las Sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo, con altitudes de 3 600 msnm. En la figura 2.1 se muestra un bosquejo de la ubicación de todos estos límites y la ubicación de la CM con respecto a la FVTM.

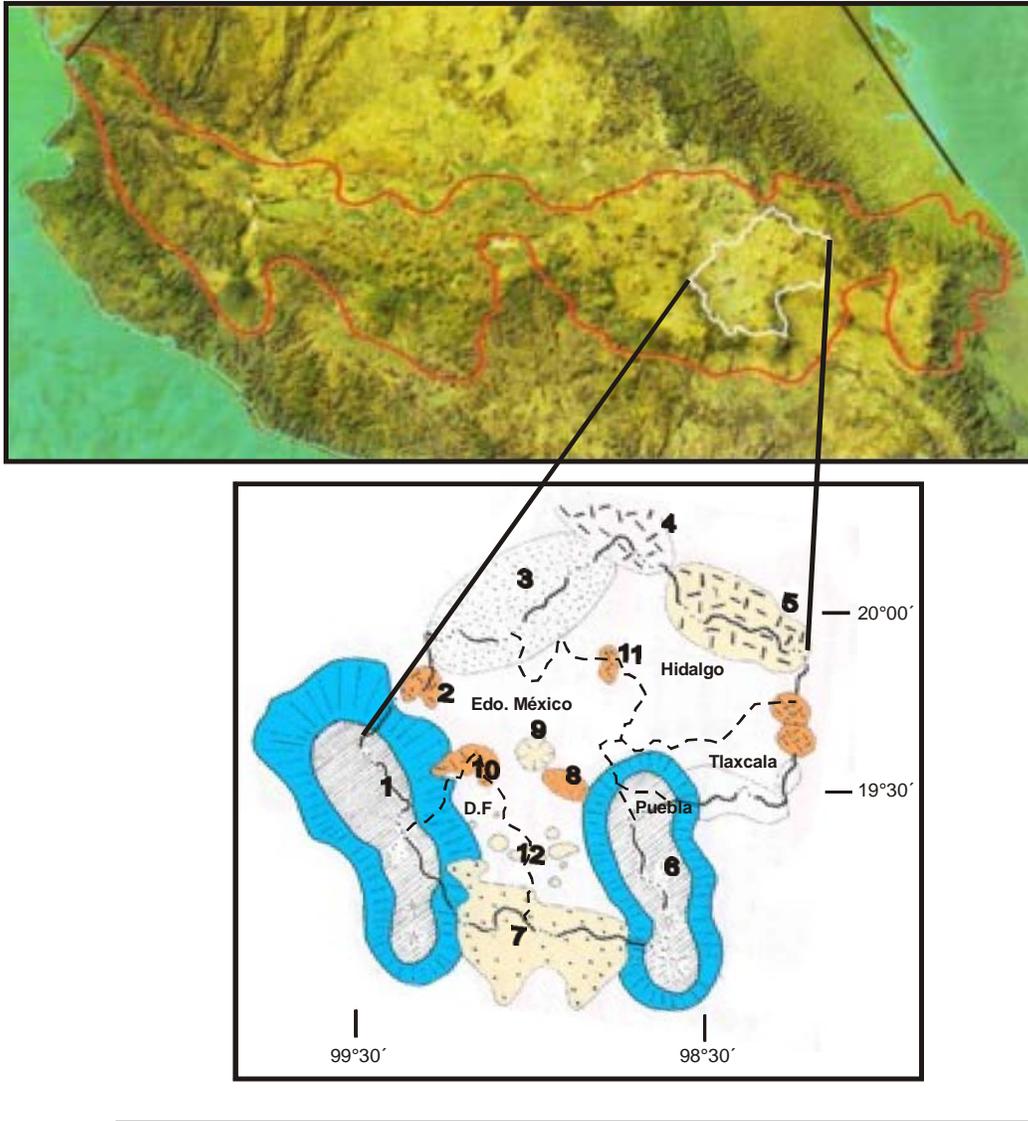


Figura 2.1.- Bosquejo de los elementos morfológicos mas importantes de la cuenca de México dentro de la FVTM (Figura superior). 1.- Sierra de las Cruces-Monte Alto. 2.- Sierra de Tepozotlan, 3.- Sierra de Tezontlapan, 4.- Sierra de Pachuca, 5.- Sierra de Singuilucan, 6.- Sierra Nevada- Rio Frio, 7.- Sierra Chichinautzin, 8.- Sierra Patlachique, 9.- Cerro Chiconautla, 10.- Sierra Guadalupe, 11.- Sierra de las Pitayas, 12.-Sierra de Santa Catarina, 13.- Sierra Calpulalpan. Modificada de (Santoyo-Villa et al. (2005)).

La tectónica que dio origen a lo que conocemos actualmente del centro del país se remonta al Triásico donde se genera una geosutura al sur del país y la cual es distinta al resto de la masa continental, dentro de esta geosutura al NW de la Cuenca se encuentra la Fosa de Acambay. Al sur de esta sutura se encuentran cuatro fragmentos de corteza terrestre (masa Jalisco, masa Michoacán, masa Guerrero, masa Oaxaca) y en la parte norte solo se tiene a la masa Chiapas, separando la parte norte de la sur se encuentra la Falla Polochic-Motagua. Cabe destacar la importancia que tiene la masa Oaxaca en el desarrollo de la FVTM y que será retomada más adelante en este capítulo.

Posteriormente en el Jurásico Temprano se tiene un periodo de vulcanismo extenso que cubre el centro y poniente del país, lo que da lugar a extensos depósitos de vulcanitas conocidos como Formación Taxco Viejo. Después de esto, también en el Jurásico se abre el Golfo, este proceso de tensión e hinchamiento genera hundimientos al centro del país en dirección SW-NE, de igual forma se generan una serie de grandes fracturas en esa dirección, cuando este gran sistema de fracturas se une con la geosutura del Triásico se genera un Proto-eje Volcánico. Durante todo el Jurásico la apertura del Golfo genera grandes cambios en el tamaño y forma del eje volcánico hasta que el Jurásico superior se logra la mayor apertura de este.

Durante el Cretácico se dio un periodo importante de formaciones marinas, donde ambientes lagunares, marinos de aguas someras, semiprofundas y en ocasiones batiales en los estados de Morelos, México, Querétaro, Puebla e Hidalgo dio lugar a formaciones de calizas, pedernal, yesos, dolomías y con registro fosilífero. Algunas de estas formaciones son la Morelos, Orizaba, etc. Los espesores de estos sedimentos marinos llegan a ser de 1000 m a 1500 m. Otra formación importante del Cretácico Superior, corresponde a la formación Mezcala formada de calizas, lutitas, areniscas correspondientes a ambientes de depósito de aguas medianas a profundas de mares en regresión formada poco antes y durante la Orogenia Laramídica. Estas formaciones sufrieron fuertes plegamientos durante la Orogenia ocurrida en el Paleoceno-Eoceno Temprano.

Es durante el Paleoceno-Eoceno Temprano (55 a 65 Ma) que se genera la Orogenia Laramídica creando la Sierra Madre Oriental y provocando que los depósitos mesozoicos depositados anteriormente se desplacen al noreste y se generen pliegues laramídicos.

Debido a este proceso tectónico a inicios del Cenozoico, el paisaje topográfico de México sufrió importantes cambios. La primer formación que se generó a raíz de esta Orogenia es la Formación Balsas, la cual está compuesta de areniscas, conglomerados y lodolitas arenosas, esta formación se encuentra en forma de relleno y abanicos aluviales así como depósitos post-origénicos producto de erosiones de cuerpos laramídicos. Esta formación se encuentra afectada casi en su mayoría por fallamientos de tipo normal.

Otro importante proceso tectónico ocurrió en el Oligoceno que dio lugar a la formación la sierra Madre Occidental, es la subducción de la Placa Farallón en el Pacífico Oriental. Es debido a este proceso que las vulcanitas Oligocénicas forman espesores máximos de 1000 a 1500 m. Durante la emisión de estas vulcanitas de composición intermedia se formaron pilares y fosas que se rellenaron con sus propios productos efusivos. La fosa Mixhuca y Roma son importantes ejemplos que se encuentran dentro de la Cuenca de México y su periodo de emisiones se prolonga hasta el Mioceno inferior, la segunda se extiende desde la Sierra de Guadalupe por debajo del Chichinautzin hasta el Amacuzac. Durante este periodo se genera un fracturamiento tectónico típico de la época, esto es, fracturas en dirección N-S.

Producto de lo anterior es que la zona de trinchera se movió a lo que actualmente es el estado de Guerrero lo que dio lugar a otros dos procesos, el primero de ellos es el desplazamiento de Centroamérica al Oriente, y el segundo es el desplazamiento de aproximadamente 20 km al norte de la masa de Oaxaca en el Mioceno Inferior creando el arco de pliegues Oaxaqueños. Las vulcanitas generadas en este proceso son de composición ácida a intermedia; la dirección

generalizada del fracturamiento en este periodo esta en dirección E-W como producto del frente de los pliegues oaxaqueños. Estas vulcanitas presentan espesores máximos de 1000 m.

Como producto de esta intensa actividad tectónica en el Mioceno, se produjo una reactivación de las fallas producidas en el Jurásico con dirección SW-NE, estas fallas controlan el borde sur del eje volcánico con los volcanes que van del Pico de Orizaba al Nevado de Toluca, y en el borde norte controla calderas y colapsos. De hecho la sierra formada desde el Pico de Orizaba hasta el Cofre del Perote con dirección NE es controlada por la reactivación de las fallas Jurásicas.

En el Plioceno inferior la conformación de la Cuenca de México fue debida a numerosos productos volcánicos que en su mayoría se encuentran en fosas en la Sierra de Pachuca. Es en Plioceno Medio que se presentan los primeros depósitos lacustres dentro de la cuenca, producto del desarrollo de numerosas cuencas endorreicas que se presentan tanto en el norte como en el sur. Como ejemplo de los primeros se presentan depósitos en Tlaxcala, Tula, San Juan del Rio, y en el sur en Morelos, Chalma y debajo del Teposteco, el espesor promedio de esta formación es de 200 m.

La evidencia de esos depósitos ha sido mediante estudios de reflexión sísmica mostrados en (Mooser, F. *et al.*, 1996) quienes muestran que los materiales de esos depósitos se encuentran interdigitados por cuerpos volcánicos, que sobrepuestos a éstos se desarrollaron numerosos estratovolcanes (generalmente domos ácidos) que constituyen a las Sierras Menores (Tepoztlán, Guadalupe, Patlachique, etc.). Todas estas emisiones volcánicas concluyen con grandes secuencias de flujos piroclásticos del Tepozteco, donde según Mooser, F. *et al.* (1996) provienen de diferentes centros eruptivos; los espesores que muestra esta formación son variables, pero al sur específicamente debajo de Xochimilco alcanza espesores de 600 m.

Es en el Plioceno Superior donde comienza la formación de las Sierras Mayores, cadenas de grandes volcanes que separan las cuencas de Toluca, Puebla y México, estas sierras se muestran en la figura 2.1 y corresponden a la Nevada y las Cruces. Su máximo desarrollo se logra en el Pleistoceno, debido a lo que se ha venido explicando hasta el momento, estas sierras descansan sobre la formación Teposteco, depósitos lacustres del Plioceno y en algunos casos sus erupciones cubren partes de las sierras menores, tal es el caso de las primeras erupciones de la Sierra de las Cruces (al poniente de la Ciudad, límite entre las cuencas de Toluca y México) que cubren flancos de la Sierra de Guadalupe al Norte.

Una característica que inmediatamente distingue a las Sierras mayores es la formación de extensos abanicos volcánicos en sus laderas, compuestos de flujos pirocásticos (intermedios a ácidos) que son nombrados en la Sierra de las Cruces como formación Tarango. La abundante presencia de agua en esta formación y su composición es un indicio de que las cámaras magmáticas que dieron origen a las Sierras son relativamente someras y representan hundimientos de menor profundidad en la corteza.

Es casi al mismo tiempo en que se formaban las sierras mayores, que la Sierra de Chichinautzin se formó (Cuaternario medio-superior); la importancia de esta Sierra radica en el hecho de que su presencia en la zona central, dio estructura formal a lo que actualmente se conoce como Cuenca de México, ya que literalmente cerró el antiguo drenaje fluvial generando la Cuenca endorreica que es en la actualidad, dando lugar a grandes depósitos aluviales y lacustres con espesores de 300 m y 200 m respectivamente. Su falla tectónica de mayor longitud es la de Santa Catarina, con una longitud de 140 km constituye una importante zona de debilidad cortical, como puntos intermedios esta el cerro de San Miguel en el poniente, y la Sierra de Santa Catarina en el sur de la cuenca. Esta gran falla propicia cámaras magmáticas superficiales o bien aportaciones basálticas del manto. Las lavas del Pedregal con bajo contenido en sílice son un ejemplo de esto.

Resulta importante señalar la orientación al NW que muestra la Sierra de las Cruces y la Sierra Nevada, a diferencia de la Sierra del pico de Orizaba con dirección NE (por fallas reactivadas del Jurásico), y ésto se debe a movimientos de cizalleo a la derecha entre la Sierra del Chichinautzin y el arco Tarasco.

Los párrafos anteriores muestran que la ENVM es una estructura compleja de arcos volcánicos terciarios sobrepuestos a una corteza originalmente fracturada en el Jurásico con el rift del Golfo de México.

Debido a que en materia de la geología los elementos gráficos son vitales para la comprensión y ubicación de estructuras, formaciones, secuencias, fracturas, etc. a continuación se muestran tres bocetos de la cuenca que engloban todo lo expuesto hasta el momento, y dan testimonio de la complejidad en la que se encuentra inmersa la formación del Eje Neovolcánico Mexicano y en específico la Cuenca de México.

En la figura 2.2 se muestran cortes ortogonales de la Cuenca, para el primero la dirección es N-S y para el segundo es E-W. Ambas imágenes son tomadas de (Santoyo-Villa, E., *et al.*, 2005).

En la parte superior de esa figura se muestra el corte en dirección N-S de la Cuenca con una longitud aproximada de 150 km, se muestran los arcos Tarasco y Chichinautzin al norte y sur cuyo movimiento de cizalleo lateral derecho generó el rumbo NW de las Sierras Nevada y las Cruces, se puede observar la diferencia en profundidad de las formaciones expuestas anteriormente ya que hacia el sur se acentúa más el hundimiento tectónico llegando a un máximo en la base de la Sierra del Chichinautzin, y ascendiendo nuevamente al pasar ésta. A la altura del cerro de la estrella se observa el contacto de la Orogenia Laramide con el frente de los pliegues Oaxaqueños. La falla Santa Catarina esta nombrada con el número 2 y alineada con la Sierra del mismo nombre, se puede observar que la profundidad de la falla está ubicada con los pliegues Laramídicos.

En la parte inferior de la figura 2.2 se muestra el corte en dirección E-W de la cuenca, a primera vista se puede observar que existe una destacada diferencia entre ambas secciones, que la complejidad estructural se encuentra primordialmente en esta dirección. Los límites W y E están representados por las Sierras Mayores del Plioceno. En la base de la sección el contacto entre los pliegues Oaxaqueños y Laramidicos se ve cortado por el intenso fracturamiento tectónico y por la profunda fosa Roma del Oligoceno, en esta sección no resulta complicado ir siguiendo geocronológicamente a todas las formaciones explicadas arriba.

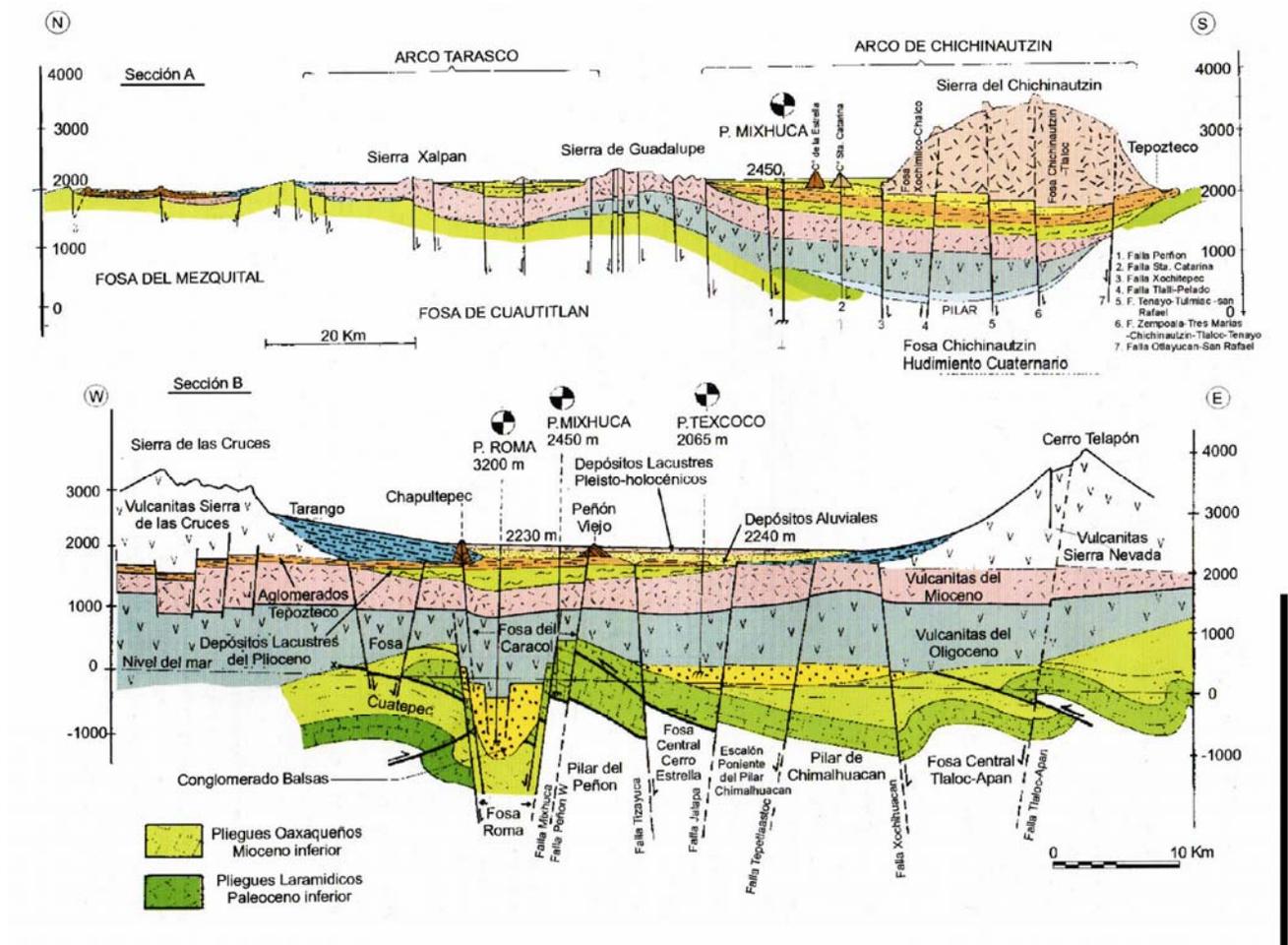


Figura 2.2.- Secciones de la Cuenca de México, la sección superior esta en dirección N-S, la inferior en dirección E-W. Imagen tomada de (Santoyo-Villa, E., et al., 2005). La información detallada de cada una de las formaciones mostradas, se encuentran en el texto.

2.1.- ZONIFICACIÓN DE LA CUENCA DE MÉXICO

Hemos observado como los procesos geológicos han conformado la cuenca de México. Por un lado, la estructura profunda e intermedia de la cuenca juega un papel importante en distintas disciplinas. Por ejemplo, se requiere conocer si las fallas son activas o no, qué relación existe entre esta estructura y los acuíferos, etc. Por otro lado, los materiales más superficiales son ahora motivo de estudios geotécnicos para la viabilidad de obras de ingeniería civil o desarrollo urbano.

En efecto el crecimiento acelerado de la Ciudad de México trajo consigo la necesidad de construcción de grandes edificaciones y caminos, razón por la cual destaco la importancia de conocer las características del subsuelo. Los ingenieros Raúl J. Marsal y Marcos Mazari realizaron estudios de la litología y mecánica de las rocas de gran parte de la Cuenca y los resultados obtenidos fue una diferenciación de los tipos de subsuelo que concluyeron en un mapa de zonificación, que fue presentado en 1959.

Al paso del tiempo este mapa ha sufrido algunas modificaciones producto de la especificación en algunas zonas y a la modernidad de estudios empleados. El mapa contenido en la figura 2.4 que se muestra a continuación, es el resultado de la última modificación al mapa.

La zonificación de la Ciudad de México donde se hace distinción en tres categorías, Zona de Lomas, Zona de Transición y Zona de Lago, las dos últimas se pueden subdividir en tres categorías que se muestran en la figura 2.4.

Zona de Lomas: los materiales de esta zona, presentan irregularidad en la compacidad, es la única zona donde se puede desarrollar mecanismos de falla superficial.

Zona de Transición alta: es la zona que se encuentra más cerca de las Lomas y presenta una transición interestratificada, debido a que sus materiales se originan

en las barrancas con acumulación de acarreo fluvial que descienden de las lomas a la planicie extendiéndose al lago.

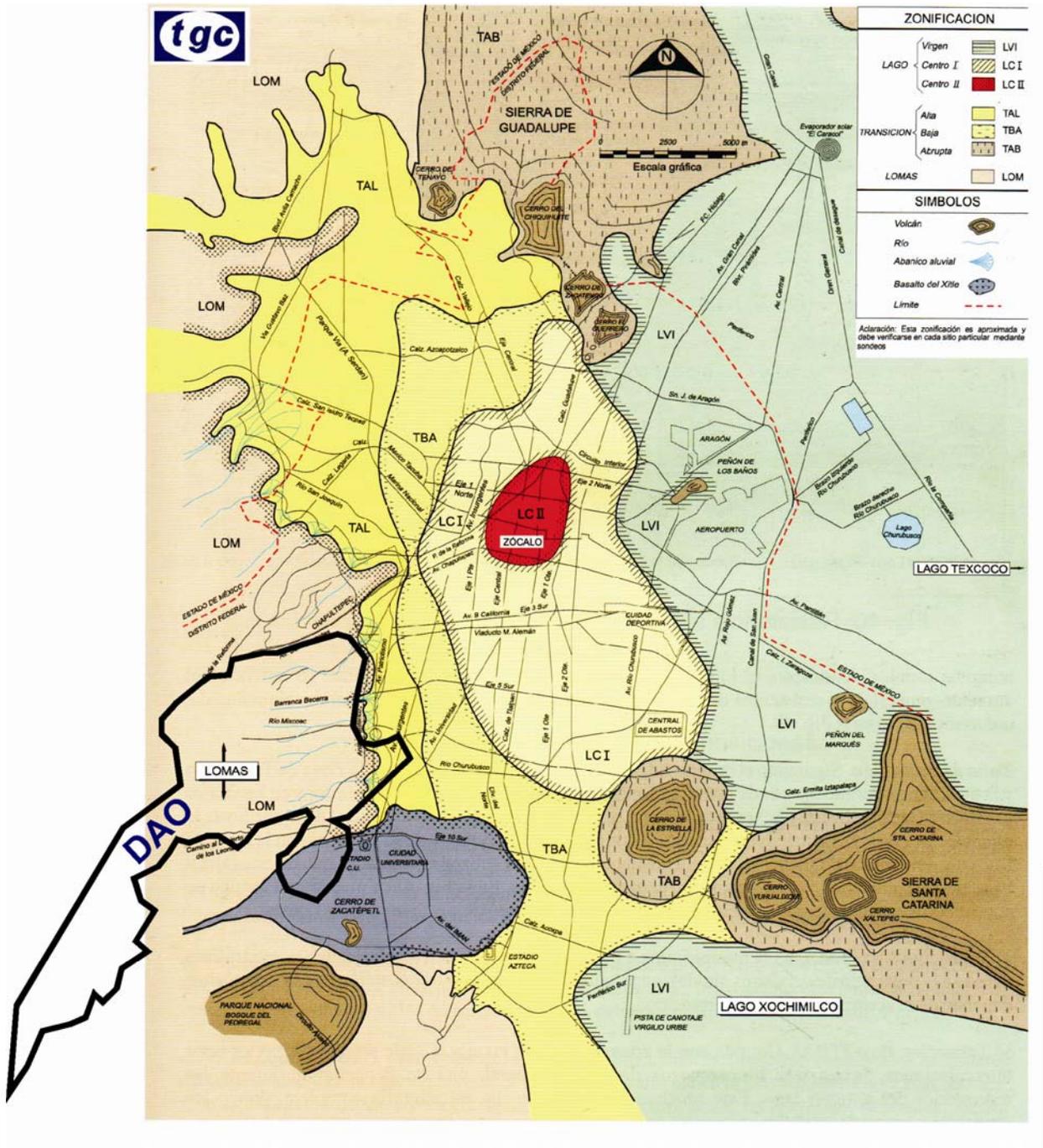


Figura 2.4.- Zonificación de la Cuenca de México, en la imagen se muestra la ubicación de la DAO en forma de bosquejo. Mapa modificado de (Santoyo-Villa, E., et al., 2005)

2.2.- LA SIERRA DE LAS CRUCES

La Sierra de las Cruces (SC) es un importante conjunto montañoso ubicado en la porción oriental del ENVM, conformada por ocho estratovolcanes alineados en dirección N-S que conforman la Sierra poniente de la Cuenca de México y constituye un límite morfológico entre las cuencas de México (2,220 msnm) y Toluca (2,400 msnm).

La SC está delimitada por las coordenadas 18°59' – 19°43'N y 99°00' – 99°40'W. Los estratovolcanes que la conforman son, de sur a norte: Zempoala (Z) (3690 msnm), La Corona (Co) (3770 msnm), San Miguel (SM) (3870 msnm), Salazar (S) (3660 msnm), Chimalpa (Ch) (3420 msnm), Iturbide (I) (3620 msnm), La Bufa (B) (3460 msnm), La Catedral (C) (3780 msnm), Ajusco (A). En la figura 2.5 se muestra la ubicación de cada uno de ellos.

Como se mencionó anteriormente, la actividad de estos volcanes corresponde al Plioceno-Pleistoceno durante la formación de la Sierra, y está caracterizada por derrames de lava, flujos piroclásticos, detritos, lodo, escombros, etc, conocido por la Formación Tarango y que en próximos apartados se hablará más a detalle. También en la figura 2.5 se puede ver claramente el piedemonte de la Sierra, el cual exhibe diferencias importantes en las vertientes de las cuencas de México y Toluca (marcadas con círculos de color azul), estas diferencias están influenciadas por aspectos estructurales de la Sierra que ayudan a comprender la forma del relieve, lo anterior se fundamenta en el hecho de que en el piedemonte se encuentran presentes los patrones de drenaje, corrientes fluviales, taludes inestables, barrancos y asentamientos humanos.

Cabe resaltar que el piedemonte actualmente se encuentra altamente urbanizado con una longitud en el lado de la Cuenca de México de 17 km entre las altitudes de 2800 msnm hasta los 2240 msnm. En la parte de la Cuenca de Toluca su longitud es de 6 km y va de los 2950 msnm hasta 2600 msnm (Lugo-Hubp, *et*

al., 1995). Aunado a estas variaciones de volumen en el piedemonte, se observan variaciones en los patrones de drenaje en ambos flancos de la sierra, los cuales resultan muy útiles ya que nos pueden brindar información referente a la estructura geológica de la zona (como la inclinación de las pendientes), o bien a la presencia de fallas y fracturas.

Como evidencia de la accidentada topografía del piedemonte de la SC en la Cuenca de México, se muestra una sección topográfica del mismo en la figura 2.6, y cuya ubicación se muestra en la figura 2.5 como una línea negra continua.

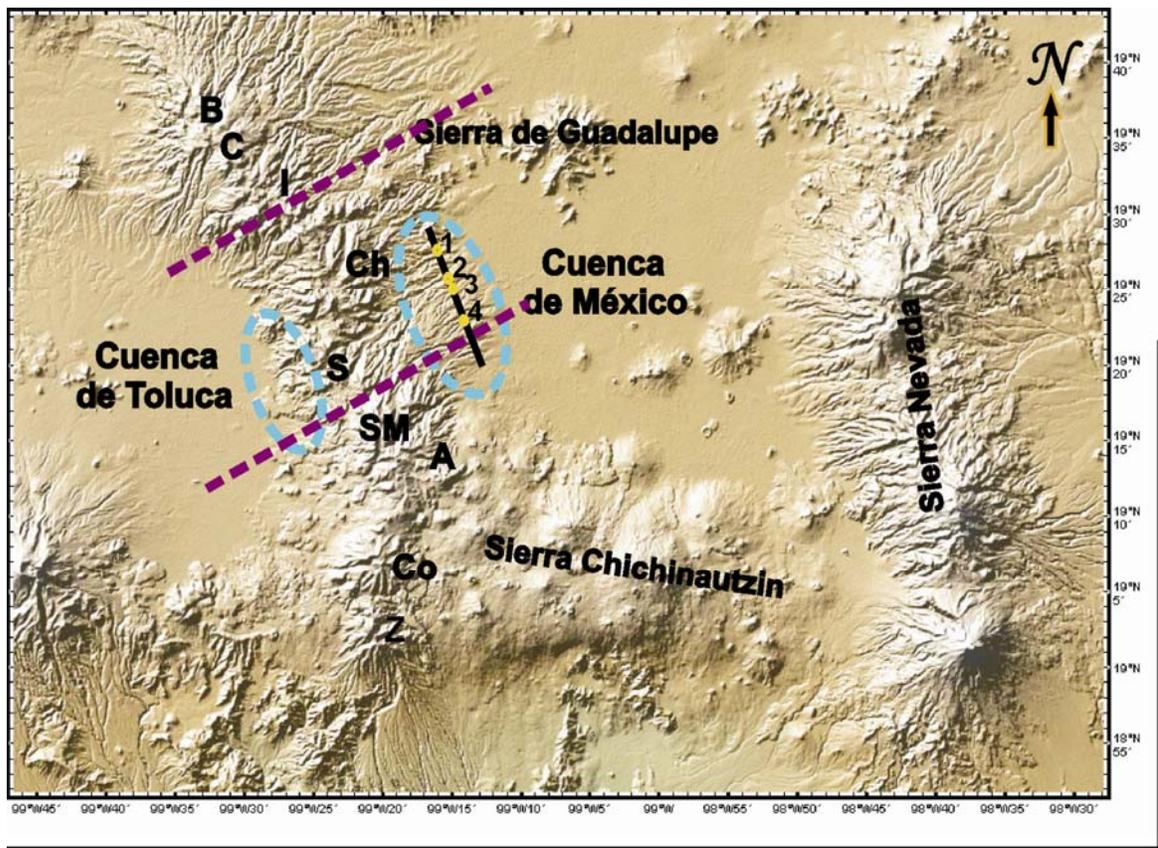


Figura 2.5.- Relieve de la Sierra de las Cruces. En los círculos de color azul se marcan las zonas de piedemonte en ambas cuencas, se puede observar que la orientación de los flujos de drenaje para la Cuenca de México están dirigidos al NE-SW. Las letras corresponden a los nombres de los estratovolcanes mencionados arriba y que le dan estructura a la SC. Las

líneas punteadas en color violeta con dirección NE muestran la división de los bloques de la sierra. En línea negra continua se ubica la sección topográfica.

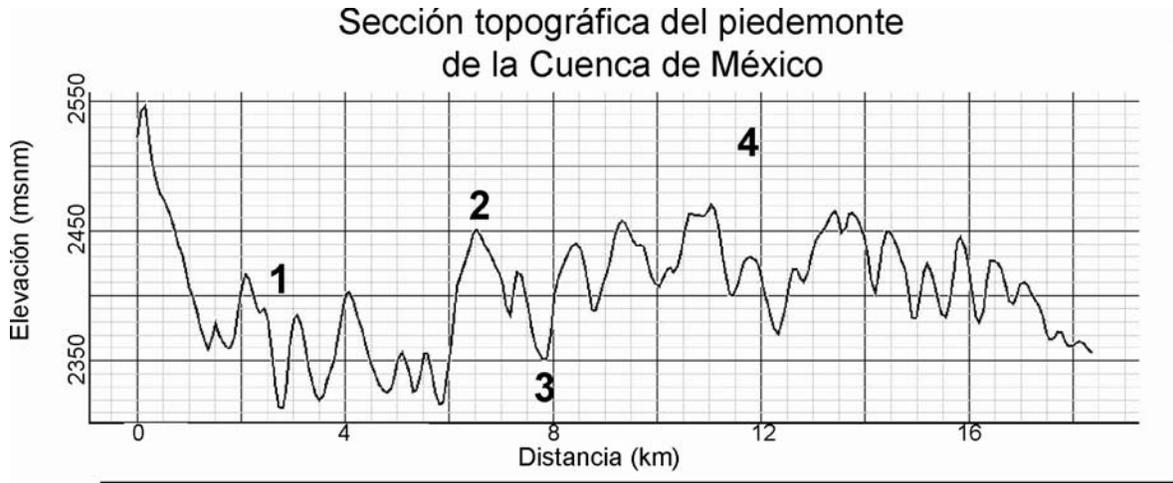


Figura 2.6.- Sección topográfica del piedemonte de la Cuenca de México, la ubicación de los altos y bajos topográficos marcados con números, están señalados en la figura 2.5 como una línea negra continua.

La estructura de la SC está relacionada con la presencia de tres tipos de sistemas de fallas: N-S, NE-SW, E-W, la última de ellas corresponde a la actividad producida por la formación de la Sierra del Chichinutzin en el Cuaternario. Es por la presencia de las fallas y las características morfológicas de la SC que García-Palomo, *et al.*, (2008) divide a la SC en tres grandes bloques (bloque norte, centro y sur) delimitados por fallas en dirección E-W. Dentro de la figura 2.5 se muestra en líneas violetas discontinuas a los tres bloques. En la figura 2.7 se muestra un perfil de la sierra, en la imagen A, se observa la ubicación de los bloques y los volcanes que las componen, así como las dos grandes fallas que al autor considera son las que producen la división entre los bloques.

La separación entre el bloque norte y el bloque centro la proporciona la Falla Ixtlahuaca esta falla tiene una orientación E-W una longitud de 30 km y 6 km de

ancho. El límite entre los bloques centro y sur está dado por la falla Xochimilco con orientación E-W.

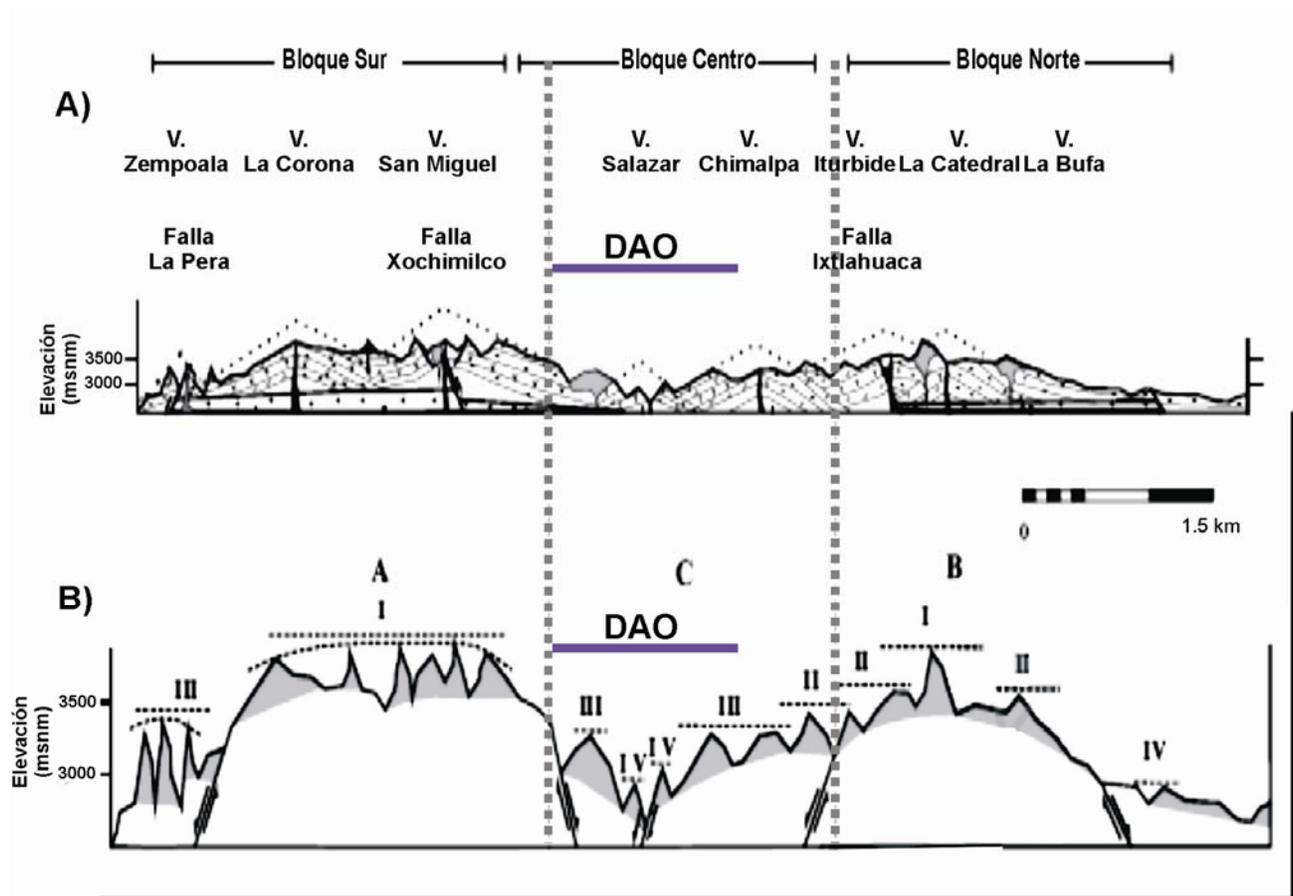


Figura 2.7.- Perfil de la SC, **A)** ubicación de los cuerpos volcánicos y las fallas que diferencian los tres bloques de la sierra. **B)** representación de las estructuras de la sierra, las letras A y B representan pilares, la letra C indica una fosa. En línea sólida se muestra la ubicación de la DAO. (García-Palomo, et al., 2008)

En el esquema B de la figura 2.7 los bloques norte y sur funcionan como pilares de un bloque centro, este bloque presenta escalones y desniveles producto de las fallas normales asociadas, la zona en gris representa las zonas afectadas por agentes erosivos, y la numeración (I - IV) indica las fases de la actividad fluvial.

En el esquema B se muestra que la parte central de la sierra ha estado bajo una mayor actividad erosiva y fluvial lo que ha dado como resultado un piedemonte más extenso y con una amplia presencia de flujos de corriente, si ubicamos esta zona en la figura 2.5 vemos que se encuentra dentro de la zona poniente de la Cuenca la cual coincide con la ubicación de la DAO, o sea, la zona de estudio de este trabajo.

Los sistemas de fallas presentes en la SC no resultan tan fáciles de identificar, debido a que el hombre ha modificado esta zona con grandes rellenos artificiales no compactados utilizados para nivelar terrenos cerca de las barrancas, por ello, el análisis de los patrones de drenaje presentes en los flancos de la sierra que son controlados por la pendiente, depósitos de materiales y presencia de fallas y fracturas, resulta ser una herramienta útil para la ubicación de fallas.

El comportamiento de los patrones de flujo bajo la influencia de las fallas tiene características muy peculiares, como el hecho de que las longitudes de los patrones están en el orden de kilómetros y presentan cambios de dirección en ocasiones bruscos.

El análisis de la alta densidad de corrientes ubicadas en las laderas orientales de los volcanes Chimalpa, Salazar y parte del complejo del volcán San Miguel (dentro del bloque centro) cumplen con las características de estar influenciadas por sistemas de fallas, ya que tienen longitudes que van de los 5 a 20 km, el drenaje es poco denso, con textura gruesa, muy espaciados y con trayectorias largas y curvadas en dirección NE, debido a la presencia de fallas como las de Hipódromo, Río Hondo y Contreras con orientación NE-SW, hay anomalías en el drenaje (García-Palomo, *et al.*, 2008). Lo anterior se puede observar en el piedemonte de la SC de la figura 2.5, donde la dirección de las corrientes están orientadas NE-SW.

2.3.- FALLAS PRESENTES EN LA SIERRA DE LAS CRUCES (SC).

El origen y desarrollo de la SC está ligado a los sistemas de fallas que lo caracterizan, y que se pueden distinguir en cada uno de los bloques en que se divide la sierra. El bloque sur se caracteriza por fallas tipo E-W, el bloque centro por fallas orientadas al NE-SW y el bloque norte por fallas en N-S, algunos autores como Mooser, F., *et al.*, (1996) llaman a esta combinación de fallas, como fallas tipo "Z" En la figura 2.8 se muestran los tres sistemas de fallas en la SC recopiladas por García-Palomo, *et al.*, (2008).

El sistema de fallas con orientación N-S es el más antiguo de todos, y es el responsable de la alineación de los elementos estructurales y volcánicos de la SC, dicho sistema ha sido reactivado en varias ocasiones desde el Eoceno tardío hasta el Pleistoceno tardío. Una de las fallas importantes dentro de este sistema, se encuentra a la falla Tula-Mixhuca ubicada en el bloque norte de la sierra y las fallas de Ayotuzco en el flanco oeste de la sierra y dentro del bloque centro, ambos se ubican en la figura 2.8.

El sistema de fallas NE-SW, presenta un rumbo general de N45°E a N65°E, que presentó dos tipos de comportamientos, como un sistema de fallas lateral izquierdo durante el Mioceno Tardío, y posteriormente como fallas normales durante el Pleistoceno. Dentro de este sistema se reconocen importantes fallas, en la parte norte las fallas de la Sierra de Guadalupe y Barrientos. En el bloque central de la SC se ubica a la Fosa de las Lomas con un rumbo de N53°E, la cuál es la causante del hundimiento del bloque, y se encuentra delimitada de norte a sur por las fallas Satélite (que buza al SE) y Contreras (que buza al NE), respectivamente, véase figura 2.8.

Dentro de la estructura de la parte central de la SC, se presentan largas fallas curvas controladas por la tectónica del Cerro de San Miguel, la intensa actividad

de este volcán dio origen a unas de las características más significativas del poniente de la Cuenca, las barrancas.

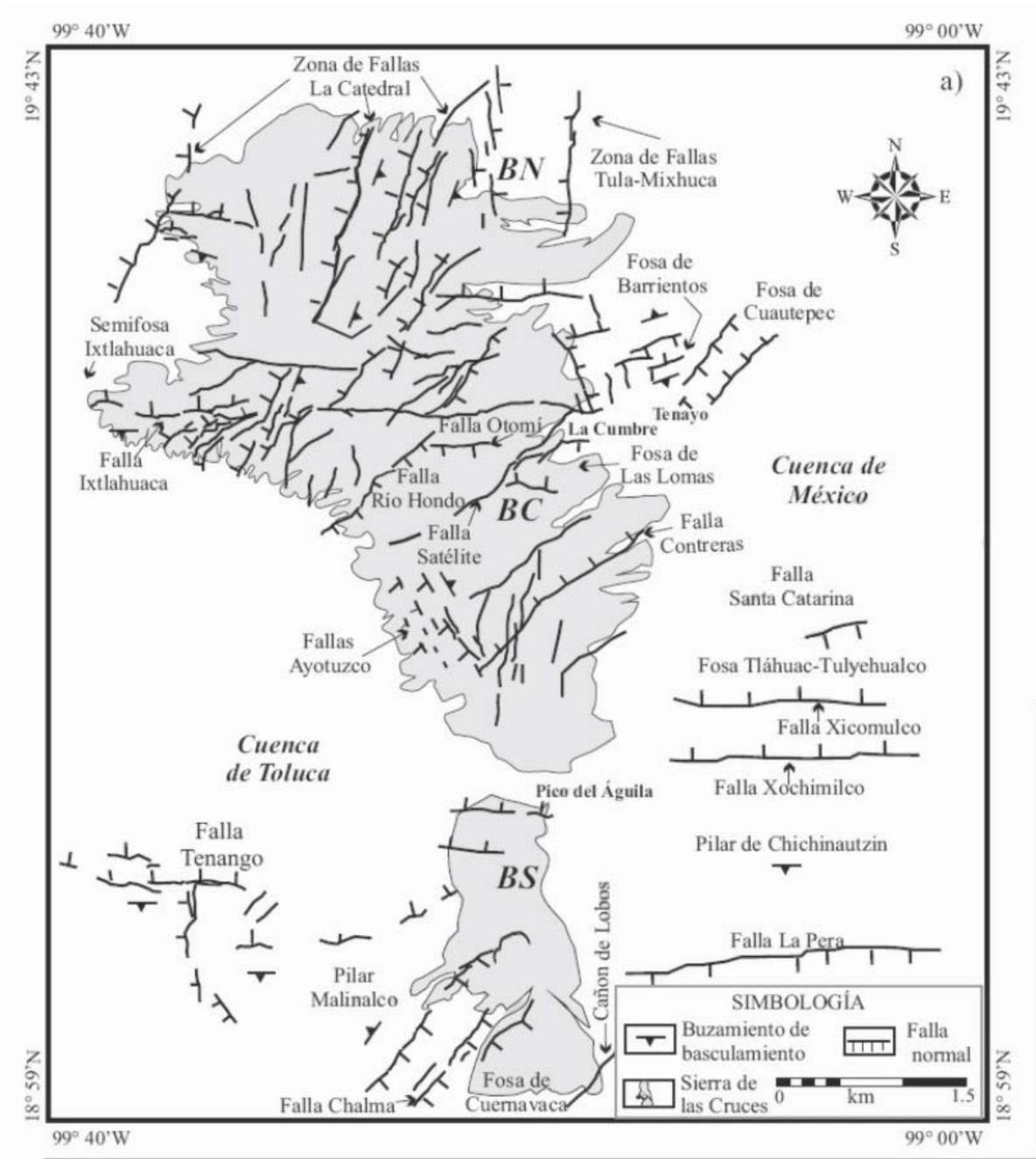


Figura 2.8.- Mapa de las principales fallas en la Sierra de las Cruces. Tomada de (García-Palomo, et al., 2008)

El sistema de fallas de la SC en dirección E-W, se caracteriza por tener fallas con longitudes cortas y paralelas, de este tipo sobresale la falla Ixtlahuaca al norte de la sierra y las fallas cercanas al Pico del Águila. En la figura 2.8 se pueden encontrar estas fallas.

El origen en común del arreglo de fallas y que juntas representan colapsos, son las erupciones del escudo-volcán que ha ido creciendo y colapsando desde hace aproximadamente 600,000 años, todos las erupciones y colapsos son posteriores a los desplazamientos del Arco Chichinautzin, en la figura 2.9 se muestran los colapsos y barrancas producidos por el volcán San Miguel

Los flujos piroclásticos del volcán han recibido distintos nombres, comenzando con Toba Cuquita (600,000 años), Xolopo (430,000 años) y Arenas Azules (270,000 años).

En la figura 2.9 se muestran las trazas de las elipses producidas por el volcán, todas con un centro en común y que corresponde a la barranca de la Magdalena Contreras. La estructura más grande la forma el colapso señalado con el número 1 en la figura, este colapso es importante de destacar debido a que generó el máximo producto volcánico del arreglo, y corresponde al Ajusco.

De igual forma se observa la presencia de la gran falla Santa Catarina producto de sierra Chichinautzin, la cual solo corta al elemento más antiguo del Volcán de San Miguel al sur de la Magdalena Contreras.

En la figura 2.9 se muestran con líneas azules las fallas mapeadas por Mooser F., *et al.*, (1996) de la zona de piedemonte, nótese que la mayoría se encuentra sobre los cauces de los ríos y de algunas barrancas, así como en algunos tramos de las trayectorias marcadas por los colapsos del Cerro San Miguel. La dirección general de los colapsos y fallas en NE-SW tal y como lo menciona García-Palomo, *et al.*, (2008) para la zona central de la Sierra de las Cruces.

Los sistemas de fallas presentes en la SC tuvieron un comportamiento de tipo normal a partir del Pleistoceno, provocando con ello levantamientos, hundimientos, escalonamientos y basculamiento de bloques.

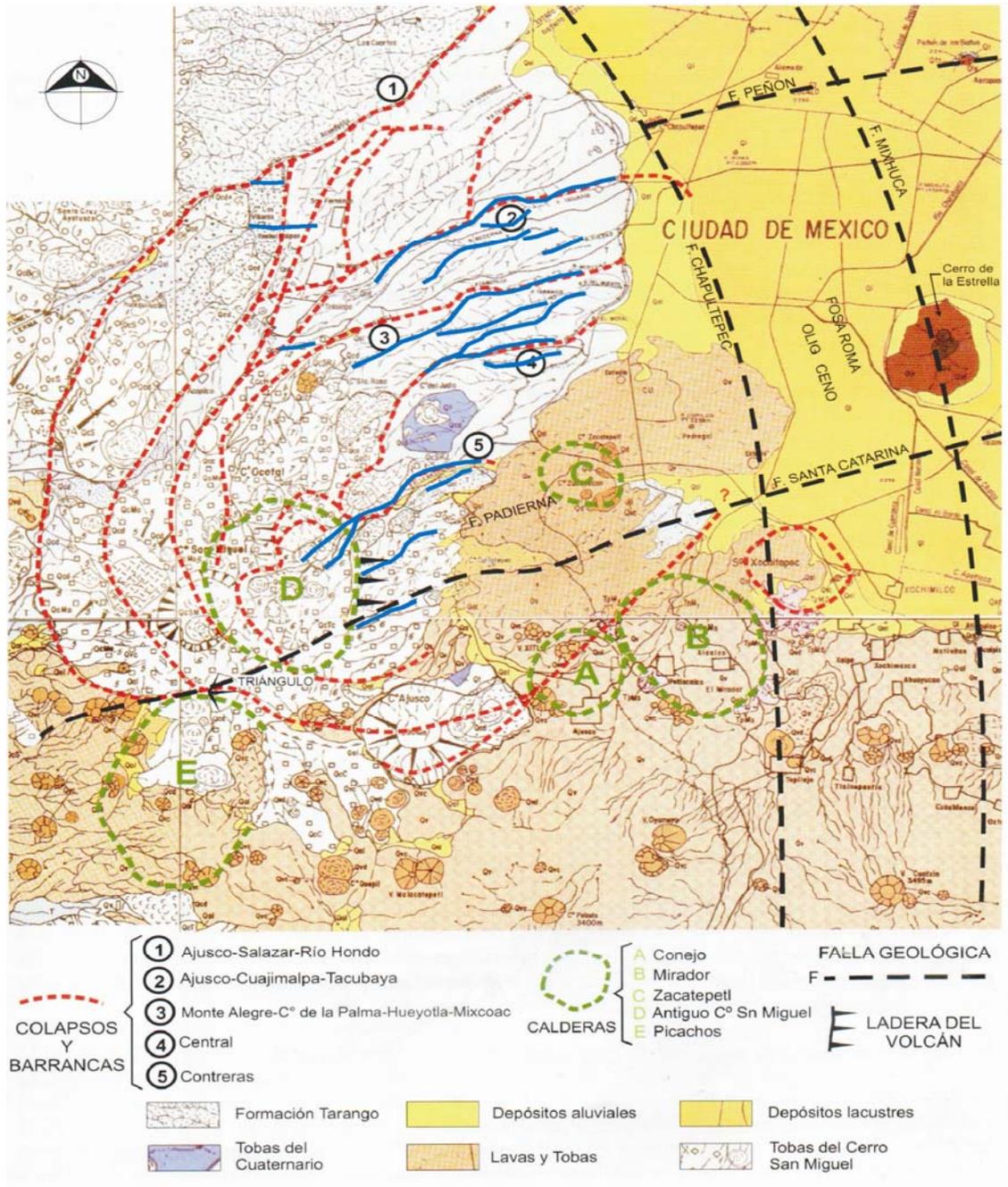


Figura 2.9.- Mapa de los colapsos del cerro de San Miguel, las líneas en azul son algunas de las fallas de la zona de piedemonte, imagen modificada de (Santoyo-Villa E., et al. 2005).

2.4.- MARCO GEOLÓGICO

Hasta el momento se ha presentado la formación de la Cuenca de México y de la Sierra de las Cruces, su morfología, relieve y tectónica han quedado ubicadas y definidas en los mapas anteriores. A partir de este momento se trabajará más a detalle con los terrenos a los que pertenece la DAO.

Estos ocupan el piedemonte y una parte de la zona de transición (figura 2.4) de la zona central de la SC. En el siguiente apartado se abordan los tópicos de la estratigrafía, hidrogeología, y los riesgos geológicos de la zona.

La DAO está ubicada geográficamente entre los paralelos 19°14'N y 19°25'S, y los meridianos 99 °10'E y 99°20'O, al suroeste de la Cuenca de México, en la ladera Oriente de la parte centro de la Sierra de las Cruces. Su territorio está conformado por un conjunto de estructuras volcánicas que alcanzan una altitud máxima de 3,820 msnm en el cerro del Triángulo; la mínima se localiza a los 2,260 msnm. En la delegación existen otras elevaciones importantes, como son el Cerro de San Miguel, de 3,780 msnm; el Cerro La Cruz de Cólica o Alcalica, de 3,610 msnm; el Cerro Temamatla, de 3,500 msnm; El Ocotál, de 3,450 msnm y Zacazontetla, de 3,270 msnm.

2.5.- EL RELIEVE DE LA DAO.

Como se puede apreciar en la figura 2.6 el relieve de la delegación es de fuertes contrastes, constituido por superficies de pie de monte, producto de la erosión de la sierra y las corrientes fluviales que en ella existen.

El relieve se puede subdividir en tres unidades principales: las laderas montañosas, el piedemonte y la planicie lacustre, debido a que la mayor parte de la delegación se encuentra asentada en el piedemonte y dado de que en esta

zona es donde se presenta un mayor riesgo geológico, es precisamente ahí donde se ubica el objetivo de este estudio.

En el piedemonte es donde se encuentran la mayor parte de los barrancos que forman el relieve accidentado de la DAO. De sur a norte existen siete barrancos principales: La Malinche (Contreras-Magdalena), San Ángel, San Ángel Inn (Guadalupe), Puerta Grande, Mixcoac, Becerra y Tacubaya.

Esta zona comprende desde los 2,400 y los 2,750 msnm, presenta un relieve de planicie inclinada de 4° a 8°, cortado por barrancos hasta de 100m de profundidad; conforman las laderas superiores de los abanicos volcánicos de la Sierra de las Cruces. Estos barrancos son de dos tipos: los mayores o principales y los secundarios.

Los primeros son paralelos, consecuentes con corrientes permanentes y formación antigua, están controlados por fallas, como se observa en la figura 2.9 donde las líneas de fallas (color azul) coinciden con los barrancos y colapsos del cerro de San Miguel.

Los barrancos secundarios, son mayoritariamente más pequeños y poco profundos, con corrientes de temporada, mucho más activos en lo que se refiere a su crecimiento sobre todo en las cabeceras, se originaron principalmente debido a la deforestación. Están en etapas iniciales de desarrollo con profundidades de 2-10 m y hasta 20-40 m los más profundos, el crecimiento se da principalmente en época de lluvias, favorecido por la litología de material no consolidado y por las modificaciones del relieve causadas por la acción humana. Son importantes debido al riesgo que representan a las vías de comunicación y asentamientos humanos, son las formas del relieve con mayor riesgo por deslaves. La ubicación de estas y otras características geomorfológicas se encuentran en la figura 2.10 elaborada por Lugo-Hubp, *et al.*,(1995).

Otro rasgo que forma parte del relieve de la DAO está constituido por los cauces y llanuras de inundación, que en gran parte están formados por la acción de las presas, que al frenar el flujo de agua generan una mayor sedimentación rellenoando el valle. También existen rasgos ocasionados por la acción del hombre, consisten en grandes depresiones formadas a partir de la excavación de bancos de material.

En los capítulos siguientes se hablará del equipo utilizado en el monitoreo sísmico, pero vale la pena mencionar en estos momentos que una de las estaciones nombrada como COCH fue instalada en un sitio donde al terreno contaba con características geomorfológicas como esta.

Dentro de los terrenos de la DAO se encuentran zonas con una alta densidad de población, y se ubican en las porciones más bajas o planas de la delegación. Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la población en estos lugares, son las inundaciones por desborde de presas e insuficiencia del drenaje. Los rasgos morfológicos que dan forma al relieve y que han sido expuestos arriba se encuentran contenidos en la figura 2.10

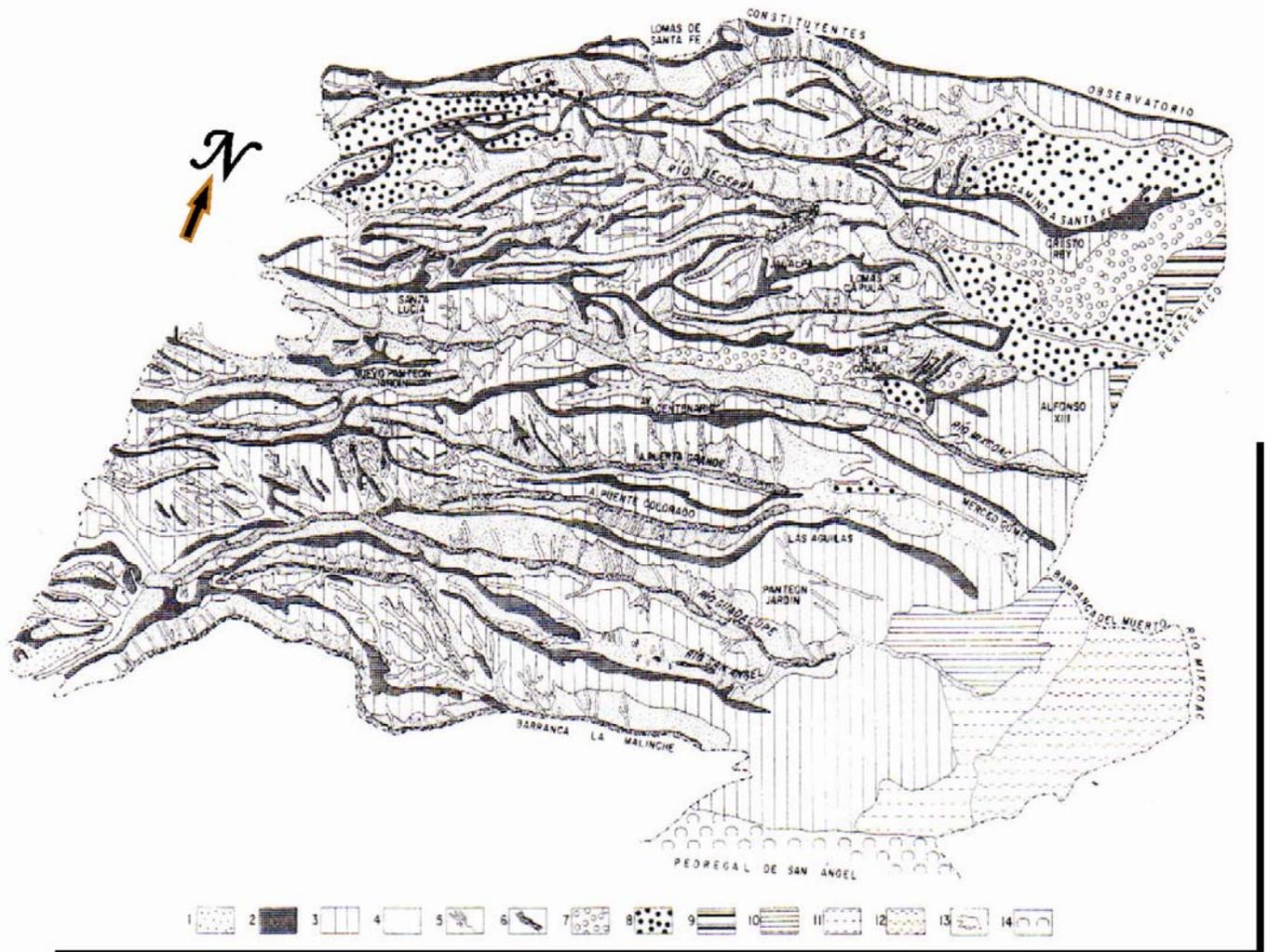


Figura 2.10.- Mapa geomorfológico de la DAO. 1.- Laderas montañosas de lava y material piroclástico, 2.- Superficies divisorias de aguas, 3.- laderas de piedemonte al borde de los barrancos, 4.- laderas erosivas de los barrancos principales, 5.- barrancos secundarios, 6.- cause y llanura de inundación de los barrancos secundarios, 7.- laderas erosionadas, con presencia de barrancos secundarios, 8.- canchales, 9.- planicie de piedemonte inferior, 10.- planicie inclinada, 11.- planicie transicional a la planicie lacustre, 12.- planicie lacustre-aluvial, 13.- presas, 14.- lavas del volcán Xitle. Imagen obtenida de (Lugo-Hubp, et al., 1995)

2.6.- HIDROLOGÍA

El sistema hidrológico actual de la DAO consiste en ocho subcuencas fluviales que corresponden a los ríos Tacubaya, Becerra, Mixcoac, Tarango, Tequilaza, Tetelpan, Texcalatlaco y Magdalena. Los cuales se ven favorecidos por las grandes precipitaciones en la parte alta de las montañas cuyo piedemonte es fácilmente cortado por el flujo de los ríos. La cantidad del flujo pluvial de la zona centro de la SC quedó definida por el perfil B de la figura 2.6, donde los números romanos indican las zonas con mayor flujo pluvial.

Las características fisiográficas de la DAO, la distinguen del resto de las delegaciones, debido a que en ella se encuentra la mayor concentración de cauces y barrancos de toda la cuenca. De todas las corrientes fluviales que atraviesan la delegación en dirección poniente-oriente destacan los ríos Tacubaya y Mixcoac, debido a que mantienen su escurrimiento todo el año. Una característica especial de estos ríos, es que en su parte baja tiene presas, cuya finalidad principal es la de evitar las inundaciones de la Ciudad de México, así como la de propiciar el infiltramiento de agua limpia para activar la recarga del acuífero. Lamentablemente lo último ya no es posible debido al alto grado de contaminación de las aguas.

En la tabla 2.1 se expone la relación de los principales ríos con su respectiva presa y barranca. Cabe recordar que en Santoyo-Villa, E, *et al.*,(2005) los cauces de la mayoría de estos ríos se encuentran sobre grandes fallas, que a su vez forman los colapsos del cerro de San Miguel.

RIO	PRESA	BARRANCA
Tacubaya	Tacubaya, Adolfo Ruiz C.	Río Tacubaya
Becerra y San Borja	Becerra A, B, C	Tlapizahua, Jalapa Becerra
Mixcoac	Mixcoac	Hueyatla, Mixcoac
Tarango	Tarango	Tarango, B. del Muerto
San Angel	Las Flores	Del Moral
Texcalatlaco	Texcalatlaco	La Malinche
Tequilasco	Tequilaso	Tequilasco
Río Mgdalena	Anzaldo	

Tabla 2.1.- Ríos en la DAO con nombre de presa y barranca. Fuente: Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Álvaro Obregón, D.D.F, (1995).

2.7.- LITOLOGÍA

La secuencia estratigráfica conocida de la Cuenca de México abarca desde el Cretácico hasta el Cuaternario, aunque en la superficie sólo afloran rocas de origen volcánico y derivadas de estas, cuyas edades más antiguas son consideradas del Oligoceno.

El piedemonte está constituido por varios tipos de sedimentos, conocidos como Formación Tarango, la cual tiene unos 300 m de grosor al surponiente de la Mixcoac, donde está bien expuesta y es indicio del fin del gran vulcanismo en la región.

Estudios geotécnicos realizados por Lugo-Hubp, *et al.*, (1995) en el piedemonte de la DAO, han reconocido a las siguientes unidades litológicas principales las cuales se muestran en la figura 2.11 son:

1.- Piroclastos finos. Principalmente cenizas, es el depósito con mayor distribución horizontal y vertical, el grosor mínimo es de unos 50 cm, y el máximo es de aproximadamente de unos 50 m observables.

2.- Ceniza. Con clastos angulosos, mal clasificados, con tamaños máximos de 70 cm, en promedio de 15 cm y un mínimo de 0.5 cm, esta capa tiene un grosor de hasta 2 m y un mínimo de 50 cm.

3.- Ceniza con pómez. Es una capa transicional entre dos unidades distintas, el grosor máximo es de 1.5 m y el mínimo es de 50 cm.

4.- Pómez. Es un depósito común en la zona, se observa en forma continua a poca profundidad, se observó en la mayoría de los barrancos profundos del piedemonte superior. Fueron reconocidos tres tipos distintos de pómez: a) En capas casi horizontales con grosor de 5 m a 50 cm, color amarillo claro. b) Una pómez fina, de color blanco, se presenta en lentes de 10 a 15 cm de grosor. c) pómez rosa, presente en estratos de 1 a 3 m de espesor, con fragmentos de 1 a 15 cm de diámetro.

5.- Depósitos de derrames piroclásticos: Se reconocen tres tipos principales: a) Clastos mal clasificados, angulosos, con tamaño de 2 a 5 cm con un máximo de 15 cm, se disponen en capas de 5 m o más de grosor, se observan los espesores máximos al norte de la Delegación, en la autopista Toluca, frente a la Universidad Iberoamericana cerca de Santa Fe donde las capas alcanzan hasta 30 m. b) Una capa delgada desde 60 cm hasta 2 m con clastos angulosos, son los más extendidos y los más jóvenes de 170,000 años (Mooser *et al.*, 1986). Un afloramiento representativo se encuentra en la Colonia Ampliación Presidentes. c) Sedimentos volcánicos de color gris azulado.

6.- Depósitos de Lahar: Reconocidos en las laderas del Río Puente Colorado, de un grosor de unos 35 m, la clasificación, del material es mala, presentan una compactación regular, cementados con piroclastos finos con pómez.

7.- Los depósitos de derrame de lodo: Producto de corrientes montañosas, reconocidos en afloramientos pequeños, a diferencia de los depósitos de lahar se

presentan en capas de menor grosor y con una mejor clasificación de los detritos, son los depósitos característicos de desembocaduras de arroyos montañosos.

8.- Conglomerados: Se encuentran principalmente en la base de los barrancos, con clastos bien clasificados y redondeados, un caso representativo de esto se encuentra en el río Guadalupe y La Peñita.

9.- Lavas del volcán Xitle: De aproximadamente hace 2,200 años, ocupan una pequeña parte de la DAO, una zona característica se encuentra en la colonia Pedregal de San Ángel.

El conocimiento detallado de la litología de la zona se dio gracias a los estudios de pozo, la ubicación de estos se indican en la figura 2.11, representados por círculos de color verde y cuyos números corresponden a las columnas litológicas de la figura 2.12.

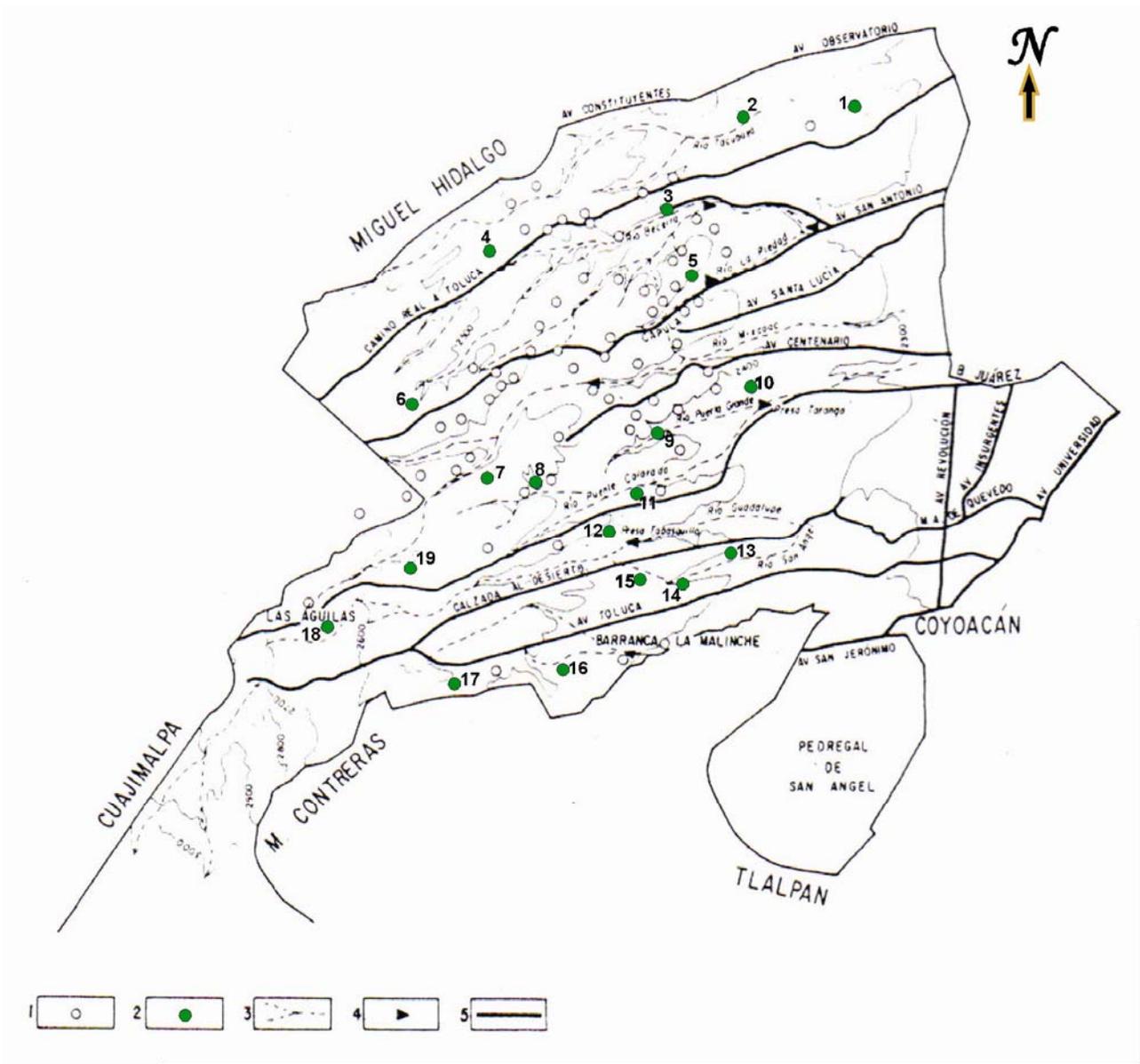


Figura 2.11.- Mapa índice de estudios. 1.- Ubicación de observaciones detalladas, 2.- Localización de columnas litológicas, 3.- Corrientes Fluviales principales, 4.- Presas, 5.- Avenidas principales. (Lugo-Hubb, et al., 1995).

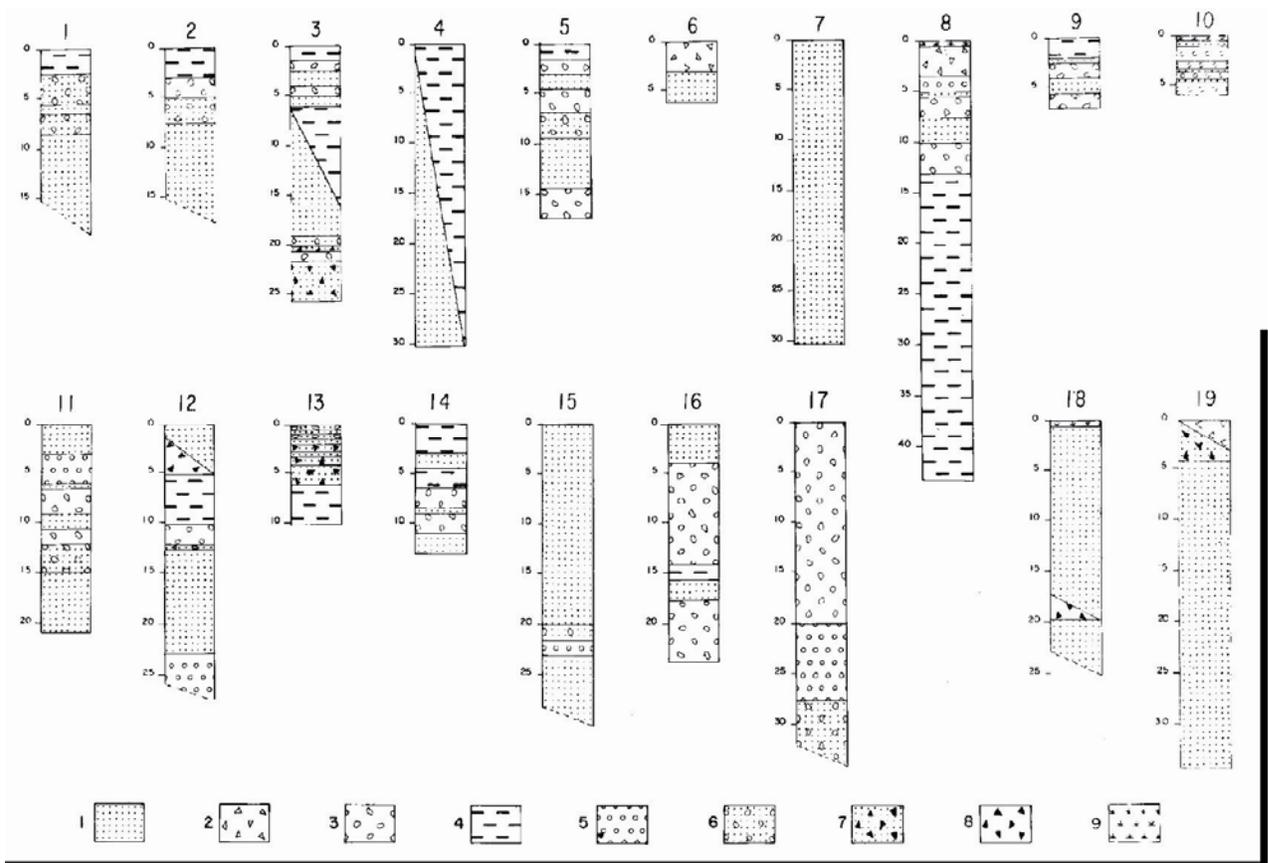


Figura 2.12.- Columnas litológicas marcadas con círculos de color verde en la figura 2.11. 1.- ceniza volcánica, 2.- depósitos de lahar, 3.- pómez, 4.- depósitos de derrames piroclásticos, 5.- conglomerado, 6.- ceniza con pómez, 7.- ceniza con clastos, 8.- depósitos de derrame de lodo, 9.- suelos. (Lugo-Hubp, et al., 1995).

3. SISMICIDAD Y ESTUDIOS PREVIOS.

En el capítulo anterior se ha presentado un marco tectónico de la CM que está estrechamente ligado con la formación del Eje Neovolcánico Mexicano, y se han mostrado la gran cantidad de fallas (producto de: la apertura del Golfo de México, de orogenias, movimientos de cizalleo entre los arcos del Chichinautzin y el Tarasco, presencia de sistemas volcánicos, etc.) sobre las que se encuentra asentada la Ciudad de México.

La Cuenca de México ubicada en el Eje Neovolcánico Mexicano, es una zona sísmicamente activa y afectada principalmente por sismos de tipo regional y local. Los primeros son el resultado de la interacción dinámica entre las placas continentales de Cocos con Norteamérica que encuentran sus puntos de contacto de tipo subducción en las costas del Pacífico, la intensa actividad sísmica genera efectos importantes en la Cuenca de México por efecto de las heterogeneidades laterales de la costa a la cuenca.

Un ejemplo importante de las repercusiones que tiene un sismo regional en la CM es el ocurrido el 19 de Septiembre de 1985 cuyo epicentro se ubicó en las costas del estado de Michoacán. Los efectos generados en la Ciudad sirvieron como pie de lanza para la motivación del estudio de la sismicidad del país y la respuesta sísmica en la Cuenca del Valle de México.

Los eventos de tipo local o intraplaca reciben este nombre debido a que el mecanismo de la fuente que los generó no consiste en la interacción de placas tectónicas como sucede en las costas, sino que se generan por la acción de fallas o fracturas en el continente.

Los sismos locales debido al tipo de fuente que los genera, fallas o fracturas son mas someros que los de tipo regional, y generalmente el valor de su magnitud es menor que los anteriores. El mecanismo de estos sismos pueden ser: la reactivación de las fallas, actividad volcánica, o bien, la acumulación de esfuerzos y tensiones producto de la actividad sísmica de tipo regional (en las costas del país), que genera condiciones de desequilibrio traducidos en actividad sísmica de tipo local costas adentro.

La sismicidad histórica del ENVM tiene un evento destacable hasta la fecha, se trata del sismo de Acambay Edo. de México, que ocurrió el 19 de Noviembre de 1912 con una magnitud $M_s = 7.0$, y propicio importantes daños en la Cuenca de México. El epicentro de este sismo se ubicó en la fosa de Acambay en el vértice del arco Tarasco en el límite norte de la Sierra de las Cruces, en la figura 2.3 se puede ubicar.

Existen una serie de reportes históricos que muestran la evidencia de la sismicidad y sus efectos en la Cuenca de México. Por ejemplo, el primero de ellos fue registrado en 1475 y causó importantes daños a construcciones de ese entonces de igual forma muchos otros eventos han dejado huellas importantes en las construcciones a lo largo del tiempo. Entre los reportes históricos se cuenta con la observación y registro de la actividad sísmica desde tiempos precolombinos, dichos registros se llevaron a cabo por medio de los reportes de la población y de los daños que los eventos dejaban a su paso.

3.1.- REDES DE MONITOREO SÍSMICO.

En la CM se han realizado diferentes esfuerzos por contar con redes de monitoreo sísmico, la primera, el Servicio Sismológico Nacional (SSN), se creó de manera formal el 5 de Septiembre de 1910 contando a la estación Tacubaya como observatorio central de estaciones en seis estados del País. En la actualidad está

formada por 36 estaciones de banda ancha distribuidas principalmente sobre la costa del Pacífico y el ENVM. En el año 1993 el Instituto de Geofísica de la UNAM se dio a la tarea de instalar una red de estaciones sismológicas equipadas con nuevos digitalizadores en diferentes sitios de la Cuenca de México rodeando al Distrito Federal, con el objetivo de mejorar la calidad de los datos y localización de los sismos originados en el Valle de México, y llevó el nombre de Red Sísmica del Valle de México (RSVM).

La RSVM contaba inicialmente con ocho estaciones de periodo corto (1.5 segundos), posteriormente la red se amplió a trece estaciones triaxiales de periodo corto, y a la fecha la red cuenta con más de cuatro estaciones de banda ancha tratando de hacer una mejor cobertura de la Cuenca del Valle de México. En la figura 3.1 se muestran las ubicaciones de las estaciones marcadas con globos azules.

Existen otras redes que monitorean a la CM, SISMEX (sistema de información sismotelemétrica de México) nació en 1973 como complemento de la Red Acelerométrica dentro de la CM, está coordinada por el instituto de Ingeniería de la UNAM y está formada por ocho estaciones con una central en Ciudad Universitaria, CU. El objetivo primordial de esta red es el estudio de los sismos provenientes de la cuenca y sus fronteras con otros estados, dentro de la figura 3.1 se observan las estaciones ubicadas en el mapa y simbolizadas con globos de color rosado.

Otro centro de investigación que cuenta con una red de estaciones sísmicas es el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el cual es dependiente de la Secretaría de Gobernación y fue creado después del sismo de 1985. Tiene por objetivo principal, el apoyar al Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC). Y cuyas actividades principales son las de investigación, capacitación, instrumentación y difusión, acerca de los peligros originados por los fenómenos naturales que pueden generar situaciones de desastre. Es por ello que

el CENAPRED realiza un monitoreo constante de dichos fenómenos por medio de equipo especializado. La ubicación de las estaciones pertenecientes a esta red de monitoreo se encuentran en la figura 3.1 bajo globos de color anaranjado. Se puede observar que uno de los objetivos principales de esta red se ubica al Oriente de la Ciudad y corresponde al volcán Popocatepetl.

El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, CIRES cuenta con redes de monitoreo local, y se encarga del Sistema de Alerta Sísmica (SAS), una de esas redes y que atañe a nuestro interés en el Valle de México, se conoce como: Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM). Esta red comenzó a operar en el año de 1986, las estaciones de esta red registran principalmente sismos de magnitud mayor a 5.0, cuenta con una gran cantidad de estaciones dentro de la Cuenca de México y 6 de ellas se encuentran en el piedemonte de la SC, en la figura 3.2 se muestra un mapa con la ubicación de las estaciones.

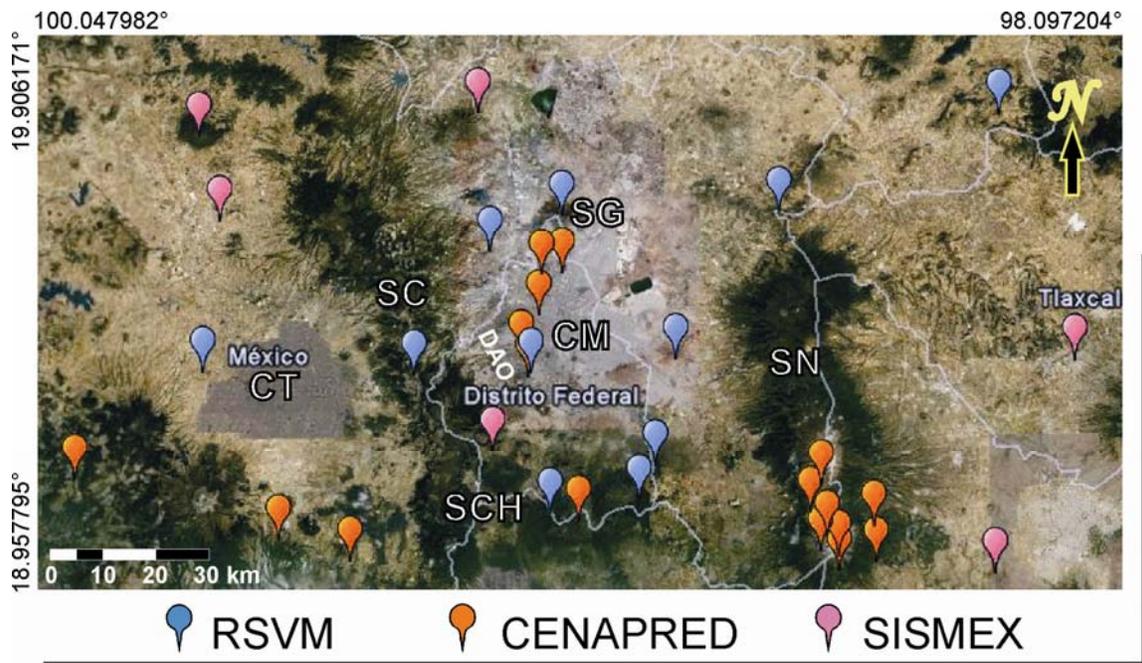


Figura 3.1.- Mapa con la ubicación de las estaciones de tres redes de monitoreo sísmico, globos azules para la Red Sísmica del Valle de México, globos naranjas para el CENAPRED, globos rosas para las estaciones del SISMEX. Se marca la ubicación de los cuerpos morfológicos más relevantes. CT: Cuenca de Toluca, CM: Cuenca de México, SC: Sierra de las Cruces, SCH: Sierra del Chichinautzin, SN: Sierra Nevada, SG: Sierra de Guadalupe. DAO: Delegación Álvaro Obregón.

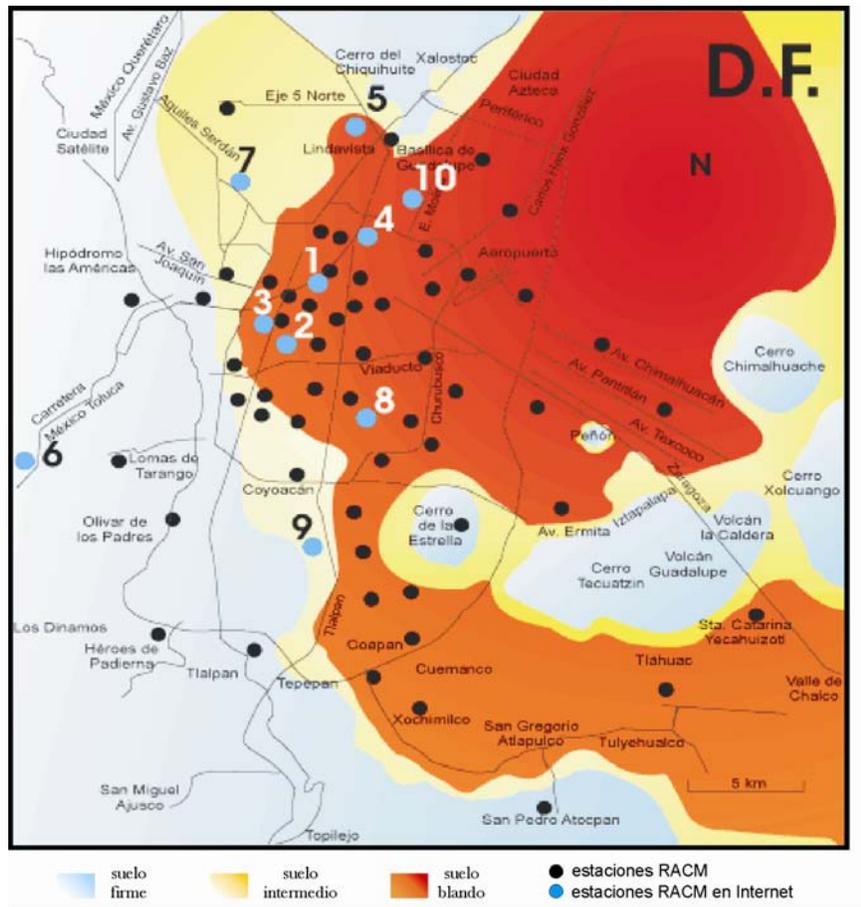


Figura 3.2.- Ubicación de las estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM). Se observa que existen estaciones de monitoreo en zonas de suelo firme. Imagen tomada de la pág. <http://www.cires.org.mx>.

En la figura 3.1 se muestra que en la zona poniente de la CM y en específico al piedemonte oriente de la SC, no se encuentran estaciones de monitoreo sísmico pertenecientes a alguna red, con excepción de la RACM (figura 3.2), pero las características de los equipos en esa red se limitan al registro de sismos mayores a una magnitud de 5, razón por la cual no podría emplearse esa red para un monitoreo de eventos locales o microsismicidad.

3.2.- SISMICIDAD EN LA SC Y PIEDEMONTE.

Con el apoyo de los catálogos históricos de la RSVM y de una recopilación de eventos elaborada por el Dr. R. Mota-Palomino y contenida en Cserna, *et al.*, (1988), de los archivos del Servicio Sismológico Nacional; se encontraron un total de 88 eventos que van del año 1952 al 2005 y cuyos epicentros se ubican en el piedemonte de la ladera oriente de la SC y en zona de transición del lado poniente de la Ciudad de México.

Estos eventos sirven como evidencia de la actividad sísmica de la zona la cual está fuertemente controlada por sistemas de fallas que cubren casi por completo los terrenos de la DAO. En la figura 3.3 se muestran los epicentros ubicados en un mapa de fallas, fracturas y colapsos, a fin de conocer o inferir las fuentes que detonaron la actividad.

Los eventos proporcionados por la RSVM se representan en la figura en forma de círculos color rojo y marcados con números; de manera contraria, para los eventos obtenidos en Cserna, *et al.*, (1988) se muestran en círculos de color azul marcados con letras. Los detalles de todos los eventos se encuentran enlistados en la tabla A1 del Anexo A.

Si bien pueden considerarse algunas fallas como inactivas (o sea que no son fuente generadora de eventos sísmicos), éstas permanecen en zonas ó forman zonas de debilidad cortical que al estar en presencia de esfuerzos tensionales de la CM producto del vulcanismo activo, el hundimiento de la Cuenca de México, o del proceso de subducción presente en el Pacífico, pierden el equilibrio en el que permanecen estables y pueden generar desplazamientos que se derivan en eventos de tipo local, donde la falla puede no ser la fuente del evento sino que una consecuencia directa a causa de la cercanía a zonas sísmicamente muy activas.

La sismicidad reportada en la tabla A1 fue registrada con estaciones pertenecientes a la red de monitoreo de ese momento, por tal motivo, la figura 3.1 no sirve como

referencia para la ubicación de las estaciones que reportan los eventos de la figura 3.3, ya que al paso del tiempo las redes han aumentado su tamaño y zona de cobertura.

Cabe destacar que para los eventos reportados entre los años 1952 al 1958 solo se contaba con 5 estaciones (Tacubaya, CU, Toluca, México y Tepoztlán) por lo que el registro de los eventos dificultó la ubicación precisa de los epicentros, por lo tanto, los epicentros de los eventos en esas fechas están referidos de acuerdo a zonas donde se reportaron los sismos por parte de la población (Cserna. *et al.*, 1988).

En la figura 3.3 se puede observar que existe una zona en la parte central superior entre los colapsos 2 y 4 del Cerro de San Miguel (marcados con números encerrados en círculos) donde se presenta la mayor cantidad de epicentros detectados. En la ubicación de algunos de los eventos se observa que existe una cierta linealidad y coincidencia con el sistema de fallas, colapsos y barrancas de la SC marcadas en la figura.

La alta densidad de epicentros se presenta en la figura 3.4 donde gracias a un acercamiento de la zona se pueden ubicar las coincidencias y cercanía entre eventos. Los eventos que coinciden en ubicación son:

- Eventos 28, 18
- Eventos 22, 6
- Eventos 53, 57
- Eventos 2, 47, u
- Eventos 29, 61, 31
- Eventos 13, 33
- Eventos 55, 27
- Eventos 32, m
- Eventos 19, y

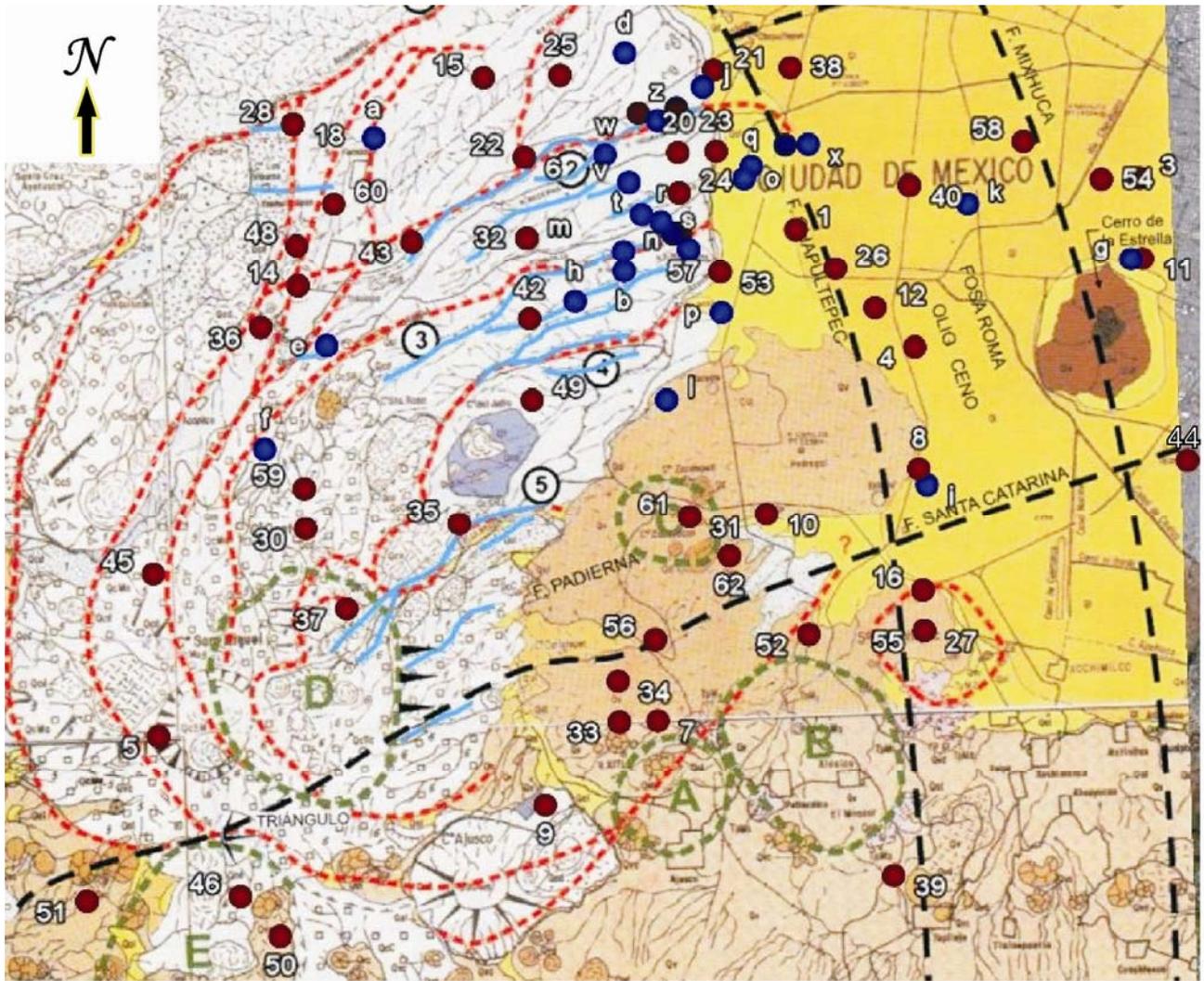


Figura 3.3.- Mapa de epicentros históricos dentro de la zona de piedemonte en la ladera oriente de la SC, los puntos en azul marcados con letras corresponden a la sismicidad recopilada en Cserna, et al., (1988). Los puntos en rojo marcados con números corresponden a la sismicidad reportada por la RSVM, los datos de todos los eventos se muestran en la tabla A1 del Anexo A. Las líneas discontinuas en negro muestran a las grandes fallas presentes en la CM, las líneas discontinuas en rojo muestran los colapsos y barrancos ocasionados por el Cerro San Miguel los números encerrados en círculos indican a que número de colapso se refiere, las líneas continuas azules indican fallas mapeadas por Mooser, et al., (1996).

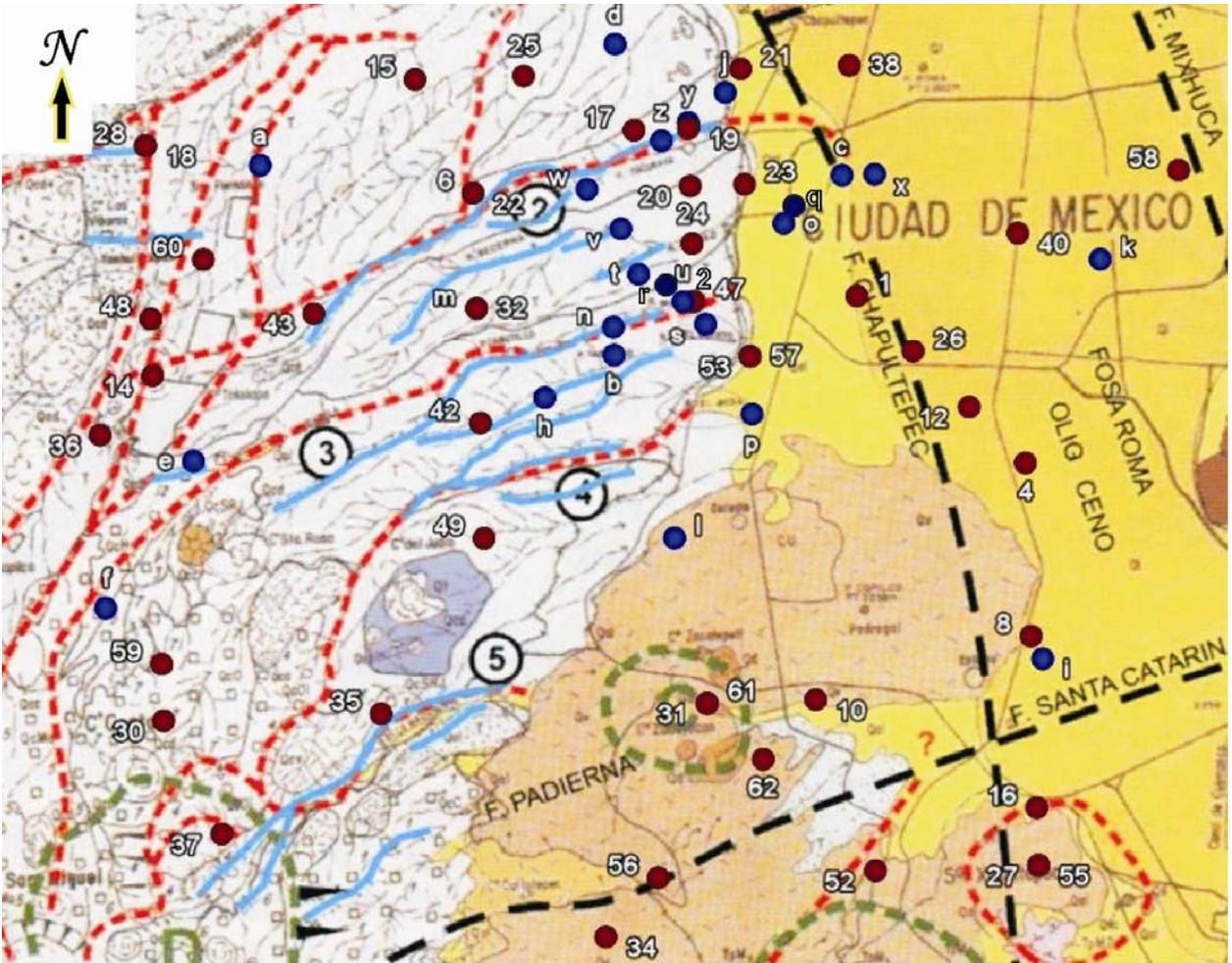


Figura 3.4.- Acercamiento al mapa de epicentros históricos dentro de la zona de piedemonte en la ladera oriente de la SC, los puntos en azul marcados con letras corresponden a la sismicidad recopilada en Cserna, et al., (1988). Los puntos en rojo marcados con números corresponden a la sismicidad reportada por la RSVM, los datos de todos los eventos se muestran en la tabla A1 del Anexo A.

La sismicidad histórica de la CM que ha sido registrada y reportada, produce la inquietud por conocer la respuesta del subsuelo ante los eventos y la fuente que los genera, por ello numerosos autores se han dado a la tarea de obtener localizaciones epicentrales y teorías que ayuden a comprender la dinámica de la corteza en la CM.

En la tabla A1 se puede observar que la gran mayoría de los eventos se presentan en grupos o enjambres y que por lo general están referidos a pequeñas zonas epicentrales, uno de estos enjambres fue analizado por Havskov (1982). Él estudió la sismicidad registrada en febrero de 1981 obteniendo magnitudes de 3.1 a 3.4 con una profundidad promedio de 1.2km y una localización promedio en 19.378° N y 99.196° W, el plano de falla de los eventos lo identifica como normal con el eje tensional cercano a la dirección este-oeste, y pone por escrito la incertidumbre de la activación de fallas antiguas en dirección N-S producto de un régimen tensional en la zona, debido a que la solución al hipocentro calculado sugiere estar localizado en un plano de falla en dirección N-S.

En cuanto al enjambre de eventos de 1981 ambas referencias (círculos rojos y azules) muestran discrepancias significativas en la ubicación, ya que los eventos **20, 21 y 22** proporcionados por la RSVM coinciden en fecha con los eventos **r, s t, u** obtenidos en Cserna *et al.*, (1988), y claramente se puede observar en la figura 3.4 que los epicentros difieren, de tal manera que solo se puede considerar una zona probable epicentral y tomar con reserva los datos.

Producto de la sismicidad registrada en la CM, se hizo evidente la necesidad de un mayor número de estaciones que registrasen los eventos propios de la zona. Es por ello que las redes de monitoreo continuaron creciendo y la UNAM junto con el CENAPRED monitorearon de manera detallada la parte sur de la Sierra Nevada (a las faldas del Popocatepetl), gracias a esta densa red es que el 21 de Enero del 1995 se registró un evento en el poblado de Milpa Alta cuyo mecanismo focal es muy similar al registrado por el evento del 7 de Febrero de 1984 en el poblado de

Juchitepec (UNAM, CENAPRED, 1995) ambos pertenecen a un mecanismo de falla tipo normal con corrimiento lateral, el eje tensional está orientado en dirección N-S y con una profundidad de 12 km para el evento del 1995 y 5 km para el de 1984.

Un trabajo que involucró a la sismicidad en toda la cuenca en un periodo de 1996 al 2000 fue el realizado por Delgadillo (2001) el análisis que llevo a cabo consistió en la caracterización de 220 eventos locales con una S-P=10 s. dividió a la CVM en 6 regiones y obtuvo los mecanismos focales en cada una de las regiones resultando una generalidad de un fracturamiento tipo normal en dirección NW-SE con componente lateral (transtensivo) con el eje tensional en dirección N-S. Para la región II “Distrito Federal” donde se encuentra la sismicidad de la zona poniente de la Ciudad de México (región de interés del presente trabajo) la autora dio las características de: Acimut: 247, Buzamiento: 78.2, Ángulo de deslizamiento: 127.9°

Un estudio más detallado de la CM es el realizado por Huesca-Perez (2008) en su tesis de maestría, donde el objetivo primordial del estudio consistió en la caracterización y ubicación de las fuentes sísmicas y el campo de esfuerzos en el interior de la CM para un periodo de datos de 1996 – 2007, con un total de 350 eventos solo se obtuvieron los mecanismos focales de 22.

De acuerdo a los interés particulares que a este trabajo conciernen y cuya zona de estudio se ubica en la zona poniente de la CM, los resultados obtenidos por Huesca-Perez (2008) muestran 4 zonas epicentrales que son de interés debido a la cercanía a la DAO y a las fallas que las controlan, estas son: Col. Narvarte, Rio Churubusco, Tlalpan, Ajusco 1.

Para Col. Narvarte se registraron dos sismos 15 Oct 2000, 13 Sep 2004, el primero de ellos se encuentra en la posición 58 de la tabla A1. Las profundidades hipocentrales para los dos eventos fueron muy distintas resultando de 15 km para el primero y de 5.1 para el segundo, una M_c promedio de 2.6. Para esta zona

obtuvo resultados de fallamiento normal con rumbo NE-SW con un acimut de $N51^{\circ}E$ y buzamiento al SE, el autor asocia esta falla a la continuación de la Falla Santa Fe (Cserna 1988). De la misma forma el autor asocia esta falla a otra serie de eventos ocurridos en la zona de Río Churubusco donde los mecanismos focales compuestos de los eventos ocurridos el 16 Dic.1999 y 14 Oct. 2000 y correspondientes a los eventos 55, 56 y 57 de la tabla A1. La solución focal asociada es de fallamiento normal con rumbo E-W. Al asociarla con la parte sur de la falla Santa Fe, propone una solución de falla con acimut $S29^{\circ}W$ y buzamiento al NW.

El 16 Oct. 2005 ocurrió un evento en la zona sur de la cuenca con una M_c de 2.9 y una réplica con M_c de 2.7 y una profundidad de 5.1km. El autor asocia el evento a las fallas del sur de la cuenca como lo es Santa Catarina con un rumbo al E-W y buzamientos casi verticales, siguiendo esta premisa es que el plano de falla asociado tiene un rumbo de $S66^{\circ}E$ y movimiento lateral siniestro. Otra zona de interés relacionada con la actividad del piedemonte de la SC está relacionada con eventos cerca de la zona del Ajusco, donde Huesca-Perez (2008) ubicó los epicentros sobre el sistema de fallas Ayotuzco (Cserna 1988), con un resultado de fallamiento tipo normal de rumbo $N63^{\circ}W$ y un buzamiento al SW.

El resultado genérico mostrado por los trabajos antes mencionados para los eventos de la CM muestran un dominio en el fallamiento con rumbo NW-SE y en algunos casos en dirección E-W, estos rumbos de fallas no resultan sorprendidos, ya que como se pudo ver en el capítulo 2, estos son generados en las etapas más tardías de formación de la cuenca, y están fuertemente relacionados con la parte centro y sur de la Sierra de las Cruces tal y como lo propone (Palomo 2008), y la formación de la Sierra del Chichinautzin en el Cuaternario cuya falla dominante (Santa Catarina) atraviesa de Este a Oeste la parte sur de la cuenca (Santoyo-Villa, 2005).

Esta breve reseña de la sismicidad en la CVM muestra que es necesario seguir sumando esfuerzos a fin de conocer el mecanismo por el cual se siguen produciendo sismos. Por ello en el capítulo siguiente nos damos a la tarea de analizar los sismos locales registrados hasta el momento en las estaciones instaladas específicamente en la DAO.

4. CAMPAÑAS DE MONITOREO

Los riesgos geológicos que se presentan en la DAO, han provocado cuantiosos daños a casas habitación y a gran variedad de estructuras. Para poder obtener un conocimiento más específico de la ubicación de aquellas zonas afectadas por los distintos tipos de riesgo, la DAO ha recurrido anteriormente a instancias no gubernamentales y de investigación. Razón de ello, es que a mediados del año 2005 la DAO se acercó a la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional Autónoma de México, para pedir su colaboración en el desarrollo de estudios geofísicos de la zona, que ayudaran a identificar y clasificar los fenómenos geológicos generadores del riesgo, así como su grado de evolución y ubicación exacta.

La Facultad de Ingeniería, a través de la División de Ciencias de la Tierra organizó dos tipos de estudios. Uno de ellos fue la aplicación de métodos eléctricos, que ayudaron a delimitar y caracterizar las minas (cavidades) que fueron desarrolladas por el hombre a principios de siglo en la búsqueda y obtención de materiales de construcción. Dichas extracciones descontroladas dieron origen a minas abandonadas y sin los tratamientos pertinentes para evitar el efecto de “migración de mina”, el cual se ha visto claramente acelerado por la mala y en ocasiones nula presencia de conductos de drenaje, dando lugar a la filtración de agua y agentes erosivos en el subsuelo y en la mina generando efectos de desgaste en las paredes y techos de la misma.

El otro tipo de estudios que ofreció la FI estuvo orientado al monitoreo sísmico. Ello, debido al planteamiento de las autoridades de la DAO quienes indicaron que a principios del año 2005 la población de la zona norte de la DAO había reportado una serie de movimientos de la tierra, que fueron registrados en repetidas ocasiones por afectaciones directas a casas habitación y estructuras en general.

El fundamento y objetivo de este tipo de estudio, fueron las repetidas denuncias de movimientos del subsuelo percibidos por la población del lugar así como la nula instrumentación sísmica en la zona que pudiera dar razón a los movimientos percibidos.

Para dar comienzo a la instalación y ubicación de las estaciones sísmicas, fue necesario detallar las zonas de denuncias de la población y con ayuda del conocimiento urbano de la zona fue posible la ubicación de aquellos lugares donde el problema de riesgo ya era notorio y representaba fuertes problemas a la población. Debido a que no se contemplaba dentro del estudio de monitoreo, la instalación y construcción de casetas sísmicas idóneas, fue necesario instalar las estaciones en lugares que contaran con los requerimientos básicos necesarios para el funcionamiento óptimo del equipo, y que estuvieran dentro de las zonas afectadas.

Los sitios elegidos debían contar con la capacidad de mantener el equipo resguardado de una forma segura, en algunos casos con las tomas de corriente necesarias y con el espacio para tener instalado un equipo de cómputo que algunas estaciones requerían, que estuvieran dentro de la zona de estudio, y procurar mantenerlos alejados de la gran cantidad de ruido cultural que se encontraba a su alrededor. Como es de imaginarse algunos de estos requisitos son difíciles de satisfacer en zonas tan densamente pobladas como la DAO, por lo que, la necesidad de instrumentar la delegación en zonas como estas trae consigo efectos directos en la calidad de los datos.

4.1.- PRIMER CAMPAÑA.

La primer campaña de monitoreo sísmico comenzó con la instalación de una estación sísmica, localizada en las coordenadas Latitud: 19°23'33.34" N y Longitud: 99°12'26.75" W, pertenecientes a la colonia La Conchita y ubicada dentro de la zona que presentaba una mayor cantidad de reportes de movimiento percibidos por la población. En la figura 4.1 se puede observar su ubicación dentro de la Delegación. El nombre que recibió la estación es: COCH.

La estación se instaló en un área de nulo tránsito de personas y lo más aislada posible del ruido cultural dentro de un Centro de Desarrollo Social. Dicho centro fue construido sobre los restos una mina a cielo abierto, donde la explotación de material de construcción tuvo su auge principios del siglo pasado.

El periodo de monitoreo de esta estación fue del 15 de Septiembre al 28 de Octubre del 2005, y durante ese periodo fue la única estación instalada dentro de los terrenos de la DAO. El equipo en la estación consistió de un sismógrafo de banda ancha, el cual tiene las características de registrar los movimientos del suelo en una amplia gama de frecuencias, de un registrador tipo REFTEK, el cual fue programado para registrar el movimiento del suelo a 100 muestras por segundo en forma continua, mediante un sensor de velocidad tipo GURALP, el control del tiempo fue por medio de un GPS, la alimentación eléctrica del equipo se hizo mediante una batería de 12V. Este equipo fue proporcionado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. La figura 4.2 muestra una imagen del equipo utilizado.

Durante este periodo de tiempo la estación COCH registró ocho eventos, los cuales se muestran en la tabla A2 ubicada dentro del Anexo A. Cuatro de los eventos registrados son de tipo Regional y sus epicentros se ubican en las costas de Guerrero y Oaxaca, cuatro eventos clasificados como de tipo local. Uno de

ellos nombrado como evento número 8 fue detectado por otras redes de monitoreo y reportado por el SSN

La localización y cálculo de magnitud de los eventos registrados como regionales y el correspondiente al 16 de Octubre, se obtuvieron del catálogo de sismos registrados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y la Red Sísmica del Valle de México (RSVM).

Haciendo un análisis rápido de los eventos 2 y 6 de la tabla A2 se observa que la diferencia de los arribos de las ondas S y P (S-P) no es mayor a 1.5 segundos, lo que supone se trate de eventos de tipo local, y son candidatos a un análisis más detallado, a fin de ubicar la fuente sismogénica que los genera. En el anexo B se muestran los gráficos de los eventos con sus tres componentes de movimiento y la ubicación de los arribos para las ondas P y S, así como las características del filtro aplicado en cada caso que fue necesario. Para el caso del evento número 7 que en tabla es clasificado como local, no se muestra la ubicación de los arribos de las ondas S y P debido a que la cantidad de ruido presente no permitió la lectura, aún y cuando se aplicaron filtros para tratar de quitar o minimizar la frecuencia del ruido.

El evento numero 8 de la tabla A2, ocurrido el 16 de Octubre del 2005 resulta de importancia significativa debido a que es el último sismo registrado por alguna red sísmica del Valle de México y cuyo epicentro se ubica dentro del Eje Volcánico Central (en el bosque de Tlalpan, para ser específicos), con una magnitud de 3.5. Este evento también fue registrado por la estación COCH, y su imagen se muestra dentro del anexo B, la diferencia S-P leída es de 3.44 s.

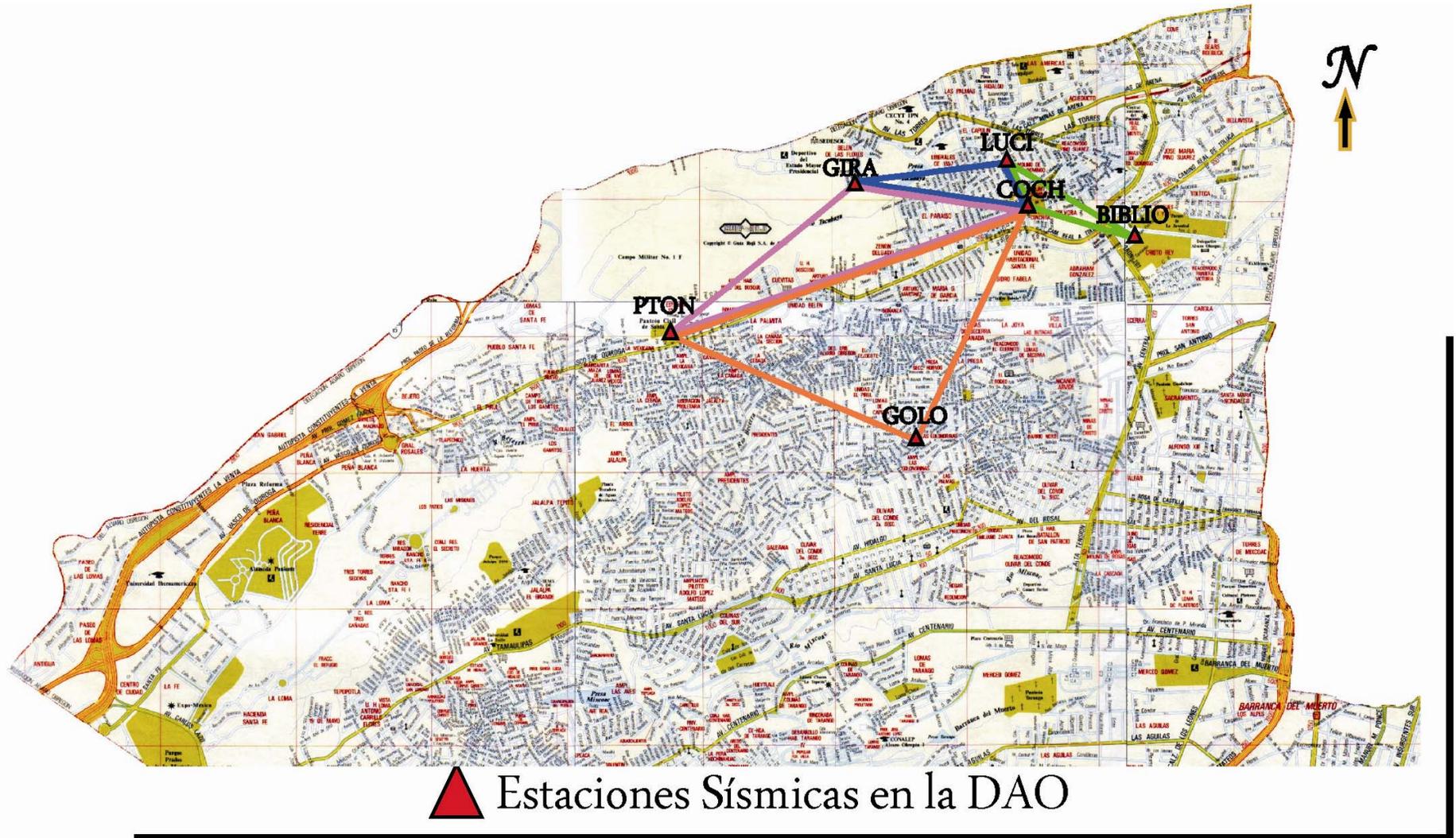


Figura 4.1: Ubicación de estaciones sísmicas, y de los arreglos que formaron en las diferentes campañas. La triangulación verde muestra a las estaciones que forman el arreglo 1; la triangulación azul muestra a las estaciones que conforman el arreglo 2; la triangulación rosa muestra a las estaciones involucradas en el arreglo 3; la triangulación naranja muestra a las estaciones que forman parte del arreglo 4. Los nombres de las estaciones están referidos a las colonias cercanas a ellas.

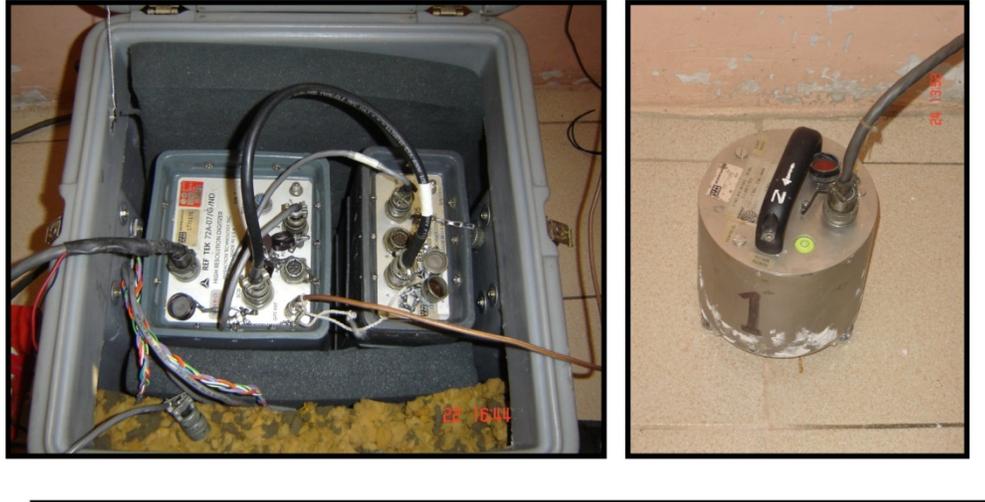


Figura 4.2: Tipo de sismógrafos instalados en las estaciones, registrador (izq.) sensor (der.)

Los eventos registrados por la estación COCH en el periodo del 15 de Septiembre al 28 de Octubre del 2005, destacando el evento del 16 de Octubre, sirvieron como evidencia para demostrar la necesidad de continuar monitoreando la DAO. Razón por la cual se planeo la siguiente etapa de monitoreo. El nuevo diseño consistió en la instalación de un arreglo triangular, que en presencia de sismos locales, estos detectasen el evento de manera simultánea para así poder determinar la localización y carácter sismogénico de los eventos, y al mismo tiempo cubrir una mayor área monitoreada.

Debido a la buena respuesta de la estación COCH ante eventos regionales y locales, la estación continuo formando parte del monitoreo, la siguiente tarea consistió en ubicar las otras dos estaciones necesarias para el arreglo. Pero de igual forma que como se hizo con la estación COCH, hubo que buscar sitios con características especiales, tales como la de estar dentro de la zona de estudio, resguardo seguro del equipo, mínimos efectos de ruido cultural, etc.

Un sitio que cumplió con estas características se ubicó en una bodega de la biblioteca Batallón de San Patricio, con coordenadas Latitud: 19°23'22.67" N

y Longitud: $99^{\circ}12'0.55''$ W. La bodega se encontraba dentro del inmueble de la biblioteca y con el inconveniente que de manera ocasional personal de la biblioteca hacía uso de la misma. La instalación de la estación se llevó a cabo el día 15 de Noviembre del 2005, y permaneció registrando de manera continua hasta el 6 de Diciembre del 2005. El equipo utilizado en esta estación fue el mismo que en la estación COCH y que se puede apreciar en la figura 4.2. El nombre que se dio a la estación es BIBLIO y se puede ubicar en la figura 4.1

Hasta ese momento se contó con dos estaciones registrando en tiempo continuo COCH y BIBLIO, posteriormente se instaló la tercera estación en el Centro Social Santa Lucia con coordenadas latitud: $19^{\circ}23'41.44''$ N, longitud $99^{\circ}12'29.61''$ W (ver figura 4.1), el inconveniente de este sitio radicó en su ubicación, ya que se encontraba cerca del flujo vehicular de la calle, razón por la cual los registros de la estación se ven influenciados por una gran cantidad de ruido cultural. En la figura 4.3 se muestran unas fotografías de la instalación del equipo, se puede observar que el sensor empleado es el mismo que en las estaciones de COCH y BIBLIO. El nombre que recibió la estación fue LUCI, la estación registró de manera continua del 15 de Noviembre al 6 de Diciembre del 2005.

De este modo, quedó conformado el arreglo triangular con las estaciones COCH, BIBLIO y LUCI (que a partir de este momento nombraremos como “**arreglo 1**”) y su periodo de registro en forma continua fue del 15 de Noviembre al 6 de Diciembre del 2005. En la figura 4.1 se muestra el triángulo en color verde formado por este arreglo.

Durante este periodo de registro los eventos detectados por el arreglo consisten de 5 eventos Regionales con epicentros en Oaxaca, Guerrero y el Golfo de Tehuantepec, un evento de tipo Telesísmico, y 2 clasificados como ruido. El evento regional del día 2 de Diciembre del 2005 que corresponde al evento número 13 de la tabla 1 fue registrado por las tres estaciones del arreglo.

Los dos eventos clasificados como ruido, registrados por la estación LUCI resultan complicados de identificar como eventos sísmicos o si son el resultado de la actividad humana de la zona. La dificultad en su clasificación radica en el hecho de que el nivel de ruido de la zona abarca un amplio rango de frecuencias, en las cuales puede ser energético un evento sísmico propio de la zona.



Figura 4.3: estación LUCI, se muestra el equipo instalado, se puede observar que el sensor se encuentra alimentado por baterías de 12 V, el enlace al sensor es por medio de una computadora portátil.

Los resultados obtenidos hasta este momento muestran que la DAO, al igual que el resto de la Cuenca de México, se encuentra expuesta a sismos de diferente naturaleza, los sismos locales que hemos identificado se deben generalmente a fallas que han sido pobremente caracterizadas o monitoreadas.

A fin de caracterizar estos eventos (magnitud, localización y naturaleza del mecanismo que los origina) se sugirió continuar con un monitoreo con instrumentos de alta sensibilidad que conformen una adecuada cobertura mediante una red de estaciones. De esta forma los resultados obtenidos sirven como evidencia de que existe actividad sísmica en la DAO y que además existen

sitios cuya respuesta sísmica ante terremotos puede ser amplificada por las condiciones geológicas del subsuelo, es decir, no es posible considerar los terrenos de la DAO como zona de terreno firme, pues no se conoce con detalle la respuesta de sitio en tan compleja zona.

4.2.- SEGUNDA Y TERCER CAMPAÑA.

Una segunda campaña de monitoreo sísmico se llevó a cabo, en esta ocasión se busco cubrir una mayor área de cobertura con instrumentos de alta sensibilidad que registren en una amplia gama de frecuencias (banda ancha), la instalación del nuevo arreglo comenzó en el mes de Julio del año 2006. En este nuevo arreglo (que llamaremos como “**arreglo 2**”) dos de las estaciones que formaron el arreglo 1 permanecieron por lo que solo se cambio una de ellas, la estación que ya no formó parte del arreglo 2 es BIBLIO. La estación cuyo instrumento se ubicó en la calle Girasoles dentro de la colonia Belén de las Flores, recibió el nombre de GIRA. En la figura 4.1 vemos la ubicación de la estación y la triangulación que forma el arreglo 2 representado por medio del triangulo en color azul.

La primera estación en ser instalada fue COCH, la cual comenzó su registro el día 11 de Julio del 2006 y concluyó en 20 de Octubre del mismo año. El equipo utilizado consta de un sensor modelo CMG-6TD de manufactura Guralp System que contiene un sismómetro digital triaxial de tres sensores que registran el movimiento del suelo simultáneamente en forma ortogonal (vertical, norte-sur, este-oeste). Cada sensor es sensible a vibraciones del suelo en el rango de frecuencia de 0.003 a 50 Hz. El digitizador, que se encuentra integrado, muestrea el movimiento a una razón de 24 bit convirtiendo éste a datos digitales de alta calidad. La Figura 4.4 muestra una imagen de este dispositivo el cual funciona con una alimentación continua de 12 Volts y el registro del movimiento del suelo se

lleva a cabo a 100 muestras por segundo; el tiempo absoluto es proporcionado por un dispositivo GPS.

Para su instalación y puesta en funcionamiento es necesario una computadora portátil que tenga instalado el software Scream4.X® de Guralp System. Los datos son almacenados en formato GCF (formato establecido por el fabricante Guralp System) en una memoria flash de 1.5 Mb integrada al sismómetro.



Figura 4.4: En estas fotos se muestra la instalación de la estación COCH para el arreglo 2, el equipo utilizado es un CMG-6TD, en la parte izquierda se aprecia la puesta en funcionamiento mediante una computadora portátil, también se muestra la batería de 12 V que proporciona la alimentación de corriente. En la parte derecha se muestra el sensor el cual ya está formado por un registrador y un arreglo de tres sensores que registran simultáneamente, el dispositivo GPS que proporciona el tiempo absoluto se coloca en lo alto de la construcción.

La segunda estación fue LUCI, instalada y puesta en funcionamiento el día 12 de Julio del 2006 concluyendo el 9 de Octubre del mismo año. El equipo instalado en esta estación fue un sismómetro fabricado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, contiene un sensor que registra el movimiento del suelo en forma simultánea en las direcciones vertical, norte-sur, este-oeste. La respuesta de este instrumento es confiable para frecuencias mayores de 4 Hz. Para la puesta en

funcionamiento de este equipo es necesario una computadora donde se instale el software Seislog®, el cual configura la adquisición y monitoreo en tiempo real.

Los datos almacenados en la computadora se encuentran en formato Seisan (<http://www.geo.uib.no/Seismologi/SOFTWARE/>). El sismómetro es alimentado a 12V mediante un convertidor de corriente alterna. Este equipo fue programado para registrar el movimiento del suelo en forma continua, por un lado, y por otro mediante un algoritmo (STA/LTA) que permite almacenar solo aquellos eventos significativos. Los registros se encuentran digitizados a 100 muestras por segundo, el control del tiempo absoluto es por medio de un dispositivo GPS que se conecta de manera directa al sensor. La Figura 4.5 muestra la instalación de este equipo en la estación LUCI.

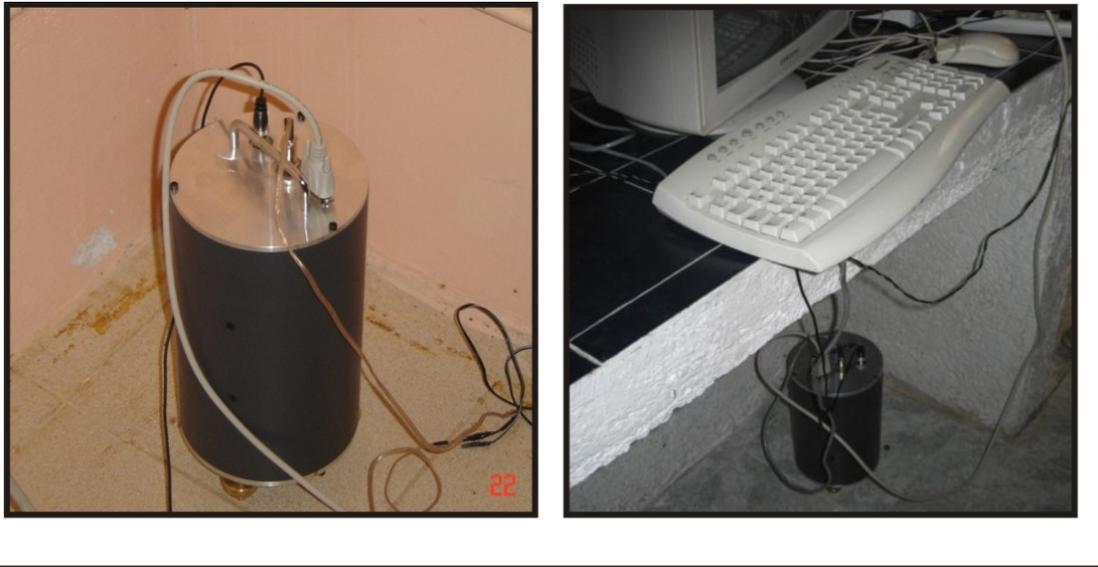


Figura 4.5: Instalación del sismómetro fabricado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en la parte izquierda se muestra al sensor para su funcionamiento es necesario proporcionar alimentación eléctrica por medio de un adaptador de corriente, debe estar conectado a una computadora para el almacenamiento de los datos, cuenta con una antena GPS para el registro de tiempo absoluto. En la parte derecha se muestra al equipo instalado en la estación LUCI.

Hasta el momento las dos estaciones instaladas (COCH y LUCI) en este nuevo arreglo también pertenecían al arreglo 1, solo cambio el equipo instalado. La tercer estación que forma parte de este arreglo es la estación GIRA con coordenadas: Latitud: 19°23'47.76" N, Longitud: 99°13'4.32" W. Ubicada en la calle Girasol de la Colonia Belén de las Flores, fue puesta en funcionamiento el día 18 de Julio del 2006 y retirada el 19 de Septiembre del mismo año. La Figura 4.1 muestra la ubicación exacta de la estación, en ella se puede observar que esta estación se ubica en el lado norte del Río Tacubaya, y que el nuevo triangulo en azul abarca un área más grande en comparación al triangulo del arreglo 1.

La estación GIRA se ubicó en una casa habitación, debido a que fue el sitio más seguro para el resguardo del equipo, sin embargo, esto trajo consigo que los registros obtenidos presentaran un mayor nivel de ruido. Este sitio fue elegido debido a que en la zona se habían presentado problemas de colapso de taludes y reportes de la población ante la sensación de movimientos de suelo, así como la oportunidad de poder ampliar el área de cobertura.

En un inicio la estación estuvo equipada con el equipo desarrollado por el Instituto de Ingeniería, el mismo equipo que estaba en la estación LUCI figura 4.5, pero a partir del 9 de agosto se instaló un sismómetro Guralp CGM40 de 16 bits, el cual es un instrumento analógico de banda ancha (0.025 a 50 Hz) acompañado de un registrador que se encarga de enviar los datos a una computadora. Este equipo fue programado mediante el software Scream para registrar y monitorear el movimiento del suelo a 100 muestras por segundo en formato GCF con un control absoluto del tiempo mediante una antena GPS. Este equipo continuo registrando hasta el 19 de Septiembre del 2006.

El 9 de Octubre el equipo de la estación LUCI cambio de sitio y se ubicó en una bodega dentro del Panteón Civil de Santa Fe, ubicado en la colonia Estrella Santa Fe a un costado de la Av. Camino a Santa Fe, el nombre que recibió la estación fue PTON. En la figura 4.1 se muestra la ubicación de la estación y la triangulación

que formó con las estaciones anteriores generando así al “**arreglo 3**”, representado con él triangulo en color rosa. El periodo de registro de este sitio fue de solo unos días, debido a que el sitio presentaba un alto nivel de ruido y no resultaba beneficioso para el objetivo del proyecto.

De esta manera que quedaron definidos los **arreglos 2 y 3**, conformados por las estaciones COCH, GIRA y LUCI y por las estaciones COCH, GIRA y PTON respectivamente, el periodo de registro para cada estación varía un poco debido a cambios en los equipos o fallas en la alimentación de corriente. En la figura 4.1 se puede observar a las estaciones y la triangulación formada en ambos arreglos.

Los eventos registrados por el arreglo 2 se muestran en la tabla A2 dentro del Anexo A, los eventos se muestran clasificados en Telesísmicos, Regionales, Locales, Ruido y no definido, esta última clasificación se aplica de manera exclusiva al evento 37 detectado por la estación PTON. El total de eventos durante este periodo son 50 de los cuales 31 son regionales y sus características sismogénicas fueron obtenidas de los reportes mensuales del Servicio Sismológico Nacional, la mayoría provienen de las zonas sísmicamente más activas del país, las magnitudes reportadas van de 3.5 a 5.9.

En su mayoría estos eventos fueron registrados por la estación COCH la cual estaba instrumentada con un equipo mucho más sensible en comparación con las demás estaciones. Aunado a esto, la relación señal ruido de la estación es favorable a la sismicidad detectada.

De los 31 sismos regionales, 6 fueron detectados por más de una estación, en concreto, fueron detectados por las estaciones COCH y GIRA, estos eventos fueron el: 33, 35, 38, 39, 40 y 42. El evento del 11 de Agosto, que corresponde al número 33, presentó una réplica que fue registrada por ambas estaciones.

De los 50 eventos registrados 7 fueron de tipo Telesísmico y solo el uno de ellos fue registrado en dos estaciones corresponde al evento número 32 con epicentro

en las costas de Guatemala, las amplitudes en ambas estaciones para este evento, son las mismas.

En la tabla A2 se muestran dos registros obtenidos por la estación LUCI, los registros son catalogados como ruido, los dos registros se muestran en el anexo B a ninguno de ellos se les aplicó algún filtro. En ellos se puede observar que el nivel de ruido de la zona es muy alto y ello puede traer como consecuencia que puedan ser fácilmente confundidos con sismos locales, o bien, que los eventos queden enmascarados por el ruido. Además de los problemas que representa tener una gran cantidad de ruido en los registros, el equipo con el que estaba monitoreando es confiable para frecuencias mayores de 4 Hz.

La respuesta del instrumento y la zona en la estación LUCI, trajo consigo la necesidad de cambiar la estación al Panteón Civil Santa Fe (PTON) el 9 de Agosto del 2006, sin embargo la respuesta obtenida fue la misma que el LUCI, el nivel de ruido de la zona era muy grande, pero en esta ocasión no era generada por el ruido cultural de la zona, sino que se encontraba a muy corta distancia (aprox. 800 m.) del campo militar núm. 1, lugar donde se hacían pruebas de explosivos como parte del entrenamiento militar. El efecto de estas pruebas queda reflejado en el evento número 37 de la tabla A2, el cual fue obtenido en la estación PTON, el registro de este evento se presenta dentro del anexo B.

Recordando que el objetivo principal de este trabajo se sitúa en el registro de eventos locales, tenemos que, de los 50 eventos registrados por el arreglo 2, 7 son considerados como sismos de tipo local, y uno clasificado como “no definido” y corresponde al evento número 37 de la tabla A2 de la estación PTON .

Respecto a los 7 eventos locales, 6 de ellos fueron detectados por la estación COCH y uno de la estación GIRA, estos eventos se muestran en la tabla A2 y cada uno de ellos se muestra en el anexo B. Debido a que los sismos locales son energéticos para frecuencias mayores de 1Hz, y que los niveles de ruido de la zona también, el análisis de los eventos se realizó sin la aplicación de algún filtro,

debido a esto no fue posible detectar los arribos de las ondas P y S en todos los eventos de la tabla A2.

El periodo de registro continuo en las estaciones del arreglo 2 no fue el mismo en las tres estaciones durante todo el periodo, razón de ello fueron los problemas técnicos que se presentaron en cada una de las estaciones, problemas como disminución del voltaje en las baterías, cortes en el suministro eléctrico, en el caso de las estaciones instrumentadas con los equipos diseñados por el Instituto de Ingeniería uno de los problemas más frecuentes se relacionaba con la conectividad del sensor a la computadora la cual debía estar encendida durante todo el periodo de registro debido a que en ella se almacenaba toda la información del sensor.

Los periodos de registro en cada estación para el arreglo 2 son los siguientes:

- COCH. Su registro comienza el 11 de Julio y concluye el 20 de Octubre del 2006
- LUCI. Su registro comienza el 12 de Julio y concluye el 9 de Octubre, dado que el equipo se movió a la estación PTON.
- GIRA. Su registro comienza el día 18 de Julio y concluye el 19 de Septiembre del 2006

4.3.- CUARTA CAMPAÑA.

A principios del mes de Septiembre del 2006, se presentó en la delegación un grave problema de hundimiento por caverna en la Colonia Las Golondrinas que afecto muchas casas habitación y con ello a un sinnúmero de familias. Debido a la gravedad del asunto se decidió mover una de las estaciones para tener monitoreada esa zona de la delegación, la estación que se retiró fue GIRA, y se cambió a una casa habitación en la esquina de Topaza y Lázaro cárdenas, la

estación comenzó a monitorear el día 13 de Octubre del 2006, y recibió el nombre de GOLO.

De tal manera que un nuevo arreglo quedo definido y está formado por las estaciones COCH – PTON – GOLO, y será nombrado como el “**arreglo 4**” en la figura 4.1 se muestra la configuración del arreglo, representado por una triangulación de color anaranjado.

El equipo que se instaló en la estación GOLO consta de un sensor de banda ancha CMG-3T de manufactura GURALP que registra continuamente el movimiento del suelo, para posteriormente ser digitalizado a una razón de 100 muestras por segundo mediante un digitalizador externo DM24. El control del tiempo se lleva a cabo mediante una antena de GPS. Debido a la problemática de la zona, se propuso otro objetivo de estudio el cual consistió en: Evaluar la respuesta sísmica del terreno mediante mediciones de vibración ambiental, para contar con un panorama más amplio de la distribución de los efectos locales del subsuelo en el área de la Col. Las Golondrinas.

Para poder llevar a cabo este nuevo objetivo se hicieron mediciones de vibración ambiental en calles aledañas a la zona de riesgo, el mapa donde se muestran estos puntos se puede encontrar dentro del anexo A, como la figura A1, los nombres de las calles se muestran en la figura.

En la figura A2 se presentan los cocientes espectrales de cada uno de los nueve puntos de medición que se indican en la Figura A1. Se observa que la frecuencia de vibración de las capas de suelo se presenta, prácticamente en todos los puntos de medición, entre 2 y 3.5 Hz con amplificaciones relativas entre 1.5 y 3. Estos resultados indican que existen materiales blandos del subsuelo en los primeros metros de profundidad que son susceptibles de vibrar en la banda de frecuencia mencionada. En el Anexo A se muestran los resultados de la obtención de los cocientes espectrales del punto 1 al 9 dentro de la figura A2.

Así, contrariamente a la propuesta geotécnica de la zona de lomas, donde se asume que los terrenos de la DAO se ubican en terreno firme, este estudio muestra que existen zonas donde la geología superficial del subsuelo juega un papel muy importante en la variabilidad del movimiento del suelo. En este caso se observa que el subsuelo en la Col. Golondrinas es complejo debido a la presencia comprobada de minas y suelos mal compactados.

El monitoreo continuo de este arreglo concluyó el 15 de Diciembre del 2006, y con ello el estudio de monitoreo sísmico y de vibración ambiental en los terrenos de la DAO que formaron parte del convenio de colaboración entre la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y la Delegación.

Los resultados obtenidos durante este estudio arrojan un total de 66 eventos sísmicos detectados en los terrenos de la DAO, de los cuales 11 son definidos como de tipo local, este tipo de eventos son de una relevancia significativa, ya que dejan testimonio de la actividad sísmica dentro una zona considerada geotécnicamente como “zona de lomas”. Dichos eventos serán analizados en el siguiente capítulo.

4.4.- QUINTA CAMPAÑA.

Finalmente a mediados del año 2008 se plantea un segundo convenio de colaboración, donde al igual que el primero, estudios de prospección eléctrica, sísmica y sismología por parte del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ingeniería, tienen como objetivo primordial la caracterización de los eventos geológicos que afectan de manera directa a la población, y que de manera conjunta, generen un dictamen global con el cual las autoridades de la DAO puedan dar soluciones claras y definitivas.

Esta nueva etapa comenzó el día 22 de Octubre del año 2008 con la instalación de la estación sísmica nombrada como AOTY, la cual se ubica en la estación sísmica Tacubaya perteneciente a la red de estaciones del Servicio Sismológico Nacional, esta estación no se ubica precisamente dentro de los terrenos de la DAO, pero su cercanía y sus características de construcción idóneas para el monitoreo sísmico, como la construcción de pilares que llegan al basamento y aislamiento del ruido cultural, hicieron de ella el primer sitio donde se comenzó el monitoreo sísmico de esta segunda etapa.

El instrumento instalado en la estación consta de un sensor de manufactura Guralp Systems modelo CMG-6TD, corresponde a un sensor de banda ancha ya que trabaja en un amplio rango de frecuencias, consta de tres sensores ortogonales que registran el movimiento del suelo en forma continua, cuenta con un digitalizador de 24 bits, el control del tiempo es por medio de un dispositivo GPS, y necesita una alimentación constante de 12V.

La instalación de la segunda estación se llevó a cabo el 21 de Noviembre del 2008 en los terrenos del Centro de Desarrollo Social “La Conchita” dentro de la colonia que lleva el mismo nombre. Esta estación ya había sido utilizada durante toda la etapa 1, y debido a su buena relación señal ruido y resultados obtenidos anteriormente, se determinó que sería conveniente contar con esta estación para el monitoreo de la segunda etapa. El nombre que recibió la estación es AOCH, que a diferencia de su antiguo nombre se decidió cambiar para hacer distinción entre ambas etapas. El equipo instalado en la estación es el mismo con el que se instrumentó la estación AOTY.

Cabe destacar que una de las distinciones más importantes de este nueva etapa, es que los equipos empleados en el monitoreo fueron los mismos en todas las estaciones y consistieron de equipos de banda ancha de alta sensibilidad.

Así el día 23 de Noviembre del año 2008, se detectaron en ambas estaciones, dos eventos, cuya diferencia S-P indican que se trata de un evento intraplaca y dentro

de la Cuenca de México. La diferencia en tiempo entre ambos eventos es de 8 minutos. La diferencia S-P para ambas estaciones y ambos eventos no pasa de los 2 segundos, por esta razón es que ambos eventos son catalogados como de tipo Local. Las imágenes de las formas de onda para cada evento y estación se encuentran dentro del Anexo B, cada uno de los eventos se presenta de dos formas, con la aplicación de un filtro, y sin la aplicación de filtro, las indicaciones se señalan debajo de cada una de las imágenes. El análisis de estos eventos, junto con los registrados en las campañas anteriores se presentan en el capítulo siguiente.

4.5.- MEDICIONES DE RUIDO AMBIENTAL.

Con el fin de conocer y evaluar las características de vibración del subsuelo y la respuesta sísmica de los terrenos en donde se instalaron las estaciones, se llevó a cabo un análisis de efectos de sitio para cada estación, con ayuda del método de cocientes espectrales (Lermo y Chávez-García, 1993), el cual consiste en llevar a cabo la razón espectral de los componentes horizontales entre la componente vertical. Con esto se puede conocer la frecuencia o el rango de frecuencias, para los cuales el terreno presenta amplificaciones significativas.

Para llevar a cabo este procedimiento se tomaron datos de 1 hora de ruido a las 03:00 horas de la madrugada en las estaciones que participaron en el monitoreo constante de la DAO, con ventanas de 60 segundos y un traslape del 30 por ciento, y con ayuda del software Geopsy.

Para el caso de la estación en COCH los cocientes espectrales muestran que la frecuencia de vibración de las capas del suelo se presenta para frecuencias menores a 3 Hz con amplificaciones relativas entre 2 y 2.5, la mayor amplificación de 2.5 se encuentra a una frecuencia de 2.3 Hz, en la figura A3 dentro del anexo A

se muestran los cocientes espectrales de cada componente horizontal con el vertical, y el promedio de ambos resultados.

Los cocientes espectrales de la estación LUCI muestran que las capas de vibrar de la estación están en un rango de frecuencias de 3 a 5 Hz con amplificaciones relativas de 2 y 2.5. Alrededor de 4.2 Hz se presenta la mayor amplificación de 2.5. La figura A4 muestra estos resultados.

Para el caso de la estación BIBLIO, las razones espectrales de la zona muestran que para las frecuencias entre 1 y 1.5 Hz. se presentan las mayores amplitudes que van de 2 a 2.4, dentro de este rango es a 1.2 Hz que la amplitud máxima de 2.4 se presenta. En la figura A5 se encuentran las trazas de los cocientes espectrales y el promedio resultante.

La estación GIRA se puede ubicar como la estación más al norte de la DAO, y la única de las estaciones que se encuentra en el lado contrario al río Tacubaya, en los resultados del cociente espectral mostrados en la figura A6, destaca una amplitud relativa de hasta 2 para una frecuencia de 2.1 Hz, esta característica destaca para el cociente de la componente Norte con la vertical.

Para la estación nombrada como AOTY, ubicada en la estación sísmológica de Tacubaya los resultados del cociente espectral obtenidos se muestran en la figura A7, para esta estación las características de vibrar del suelo generan amplificaciones máximas de entre 2.1 y 2.5 para frecuencias muy cercanas entre 2 y 2.5 Hz obteniendo la máxima amplitud para 2.2 Hz

Los cocientes espectrales de todas las estaciones son una evidencia de los efectos que se producen cuando se está en presencia de material no consolidado, cuya respuesta ante un evento sísmico puede traer serias repercusiones en el lugar o zona donde las características litológicas sean claramente evidentes.

En las figuras 2.11 y 2.12 del capítulo 2, se aborda el tema de la litología en algunas partes de la DAO por medio del estudio de columnas litológicas, al observar la figura 4.1 y la ubicación de las estaciones dentro de los terrenos de la DAO, a la estación GIRA se le puede relacionar directamente con la columna litológica número 2, para las estaciones LUCI, COCH y BIBLIO se les relaciona con la columna 1, la estación PTON con la columna 4 y para GOLO con la columna 3 y 5. En todas las columnas la presencia de material volcánico mal consolidado es evidente, con profundidades que van de 15 a 30 m las secuencias litológicas son muy similares entre ellas. Las columnas 3 y 4 destacan de la mayoría de columnas de la figura 2.12, debido a que en ellas se mapea un contacto discordante entre ceniza volcánica y depósitos de derrames piroclástico.

5.- ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS LOCALES

Durante las campañas de monitoreo sísmico en los terrenos de la DAO, se registraron un total de 11 eventos enlistados en la tabla 5.1, que por su diferencia en tiempo S-P dentro de un rango de 1 a 3 segundos fueron clasificados como de tipo Local, y uno, que producto complejidad de lectura y el hecho de que muy cerca de la estación de registro (PTON) se encontraba una fuente de mucho ruido, fue clasificado como de tipo No definido. En la tabla A2 dentro del anexo A se enlistan todos los eventos divididos por la campaña y estación en que se registraron, los eventos locales corresponden a los números: 2, 6, 7, 8, 18, 26, 31, 43, 45, 54, 57. De todos los eventos locales, solo uno de ellos (evento 43) se registro en la estación GIRA y los restantes por la estación COCH.

Debido a que estos eventos solo fueron registrados por una sola estación, la ubicación del epicentro no se puede llevar a cabo por los métodos gráficos convencionales. Por ello es que el primer análisis que se hace a este tipo de eventos es la ubicación en tiempo de los arribos de las ondas P y S, los cuales son mostrados en las trazas de estos eventos contenidas en el anexo B, para algunos casos fue necesaria la aplicación de un filtro que disminuyera la cantidad de ruido del registro, las características de los filtros aplicados se indican a pie de página en cada una de las trazas donde se aplicó. En la tabla 5.1 se enlistan las diferencias en tiempo de arribo de S-P para los eventos locales en donde se pudo identificar el tiempo de arribo de cada onda, así como la estación que registró el evento y el numero que le corresponde en la tabla A2 del anexo A.

Se ha aplicado un análisis de polarización a aquellos registros donde la fase de la onda P es dominante con respecto al nivel de ruido. Utilizando los componentes horizontales, mediante este análisis, se espera que se pueda determinar una dirección preferencial de la zona epicentral a cada una de las estaciones, sin

embargo existe una ambigüedad en la polarización de los registros el cual consiste en un cambio de signo, lo que produce incertidumbres en los resultados obtenidos. Aunado a lo anterior, el nivel de ruido en la mayoría de las estaciones genera errores en los valores de ángulos asignados a los impulsos de la onda P, ya que en ocasiones esta se encuentra inmersa en una gran cantidad de ruido.

La ocurrencia de eventos en esta zona registrados por los equipos instalados en los terrenos de la DAO, así como, los reportados por la RSVM y los recopilados en Cserna, *et al.*, (1988) indican que existe una actividad sísmica que amerita ser caracterizada.

Evento No.	Nombre de la estación	S-P s.
2	COCH	1.262
6	COCH	0.918
7	COCH	----
8	COCH	3.32
18	COCH	----
26	COCH	1.508
31	COCH	2.984
43	GIRA	----
45	COCH	----
54	COCH	2.979
57	COCH	----

Tabla 5.1.- Tabla con los eventos Locales registrados durante las campañas de monitoreo sísmico en la DAO, la diferencia en tiempo de los arribos de S-P se indican para aquellos eventos en los que fue posible identificarlas. Las trazas de los eventos se encuentran en el Anexo B

Debido a que solo se cuenta con un número reducido de eventos, y estos fueron registrados por una sola estación (en especial COCH), se hizo un intento por conocer la distancia al epicentro en cada uno de los eventos por medio del apoyo de una configuración geométrica de la propagación en un medio estratificado y plano.

Mediante la inversión del tiempo de viaje a lo largo de la trayectoria que siguen las ondas P, una vez que éstas son producidas por la fuente sísmica. El procedimiento requiere un modelo de velocidades que especifique espesor y la velocidad de las ondas P y S en cada uno de los estratos que conforman el modelo. Para este análisis se utilizaron dos tipos de modelos diferentes el primero de ellos se muestra en la tabla A3 del anexo A, obtenido de Huesca-Pérez (2008), y que corresponde a una modificación del modelo de Havskov y Singh. El segundo modelo se muestra en la tabla A4 del anexo A, obtenido de (Cárdenas, 2007) y corresponde a un modelo compuesto, en la parte más superficial se tiene un modelo de velocidad para la zona de Chapultepec.

El procedimiento de inversión utiliza la Ley de Snell, la cual es una relación entre las velocidades de onda P de dos estratos y los ángulos de incidencia en la frontera que divide ambos medios

$$\frac{\alpha_1}{\text{sen } i_1} = \frac{\alpha_2}{\text{sen } i_2} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

Donde α es la velocidad de la onda P y la letra i denota el ángulo de incidencia en la frontera que divide dos medios. Los subíndices 1 y 2 se refieren a los medios con distintas propiedades. Mediante esta relación fue posible obtener los ángulos de incidencia de las ondas transmitidas en las interfaces.

El ángulo de incidencia en la superficie es el valor del ángulo transmitido en la frontera entre los dos primeros medios. Este ángulo es obtenido mediante los valores de las amplitudes de la onda P en los tres componentes del movimiento.

Con esto, se obtiene una estimación de los subsecuentes ángulos de incidencia a diferentes profundidades. Cuando la velocidad de la capa inferior es mucho mayor que la de la capa superior, obtenemos nuestra profundidad límite, la cual está condicionada por el valor inicial de ángulo de incidencia y el modelo propuesto.

Una forma de estimar la distancia epicentral utilizando los ángulos de incidencia en cada capa es evaluando, en primera instancia, los tiempos de recorrido por capa. Esto se lleva a cabo utilizando la siguiente relación que nos proporciona los tiempos de recorrido, en la n-ésima capa, de un rayo incidiendo en una interface con un ángulo i

$$t_n = \frac{h_n}{\alpha_n \cos i_n} \dots\dots\dots (5.2)$$

Donde h_n denota el espesor de la capa. Posteriormente, evaluamos la proyección del rayo en la dirección horizontal de cada capa mediante:

$$d_n = |A_n| \operatorname{sen} i_n \dots\dots\dots (5.3)$$

$$D_{total} = \sum d_n \dots\dots\dots (5.4)$$

Donde A_n es el módulo del vector del rayo en cada capa, y D_{total} la suma de todas esas proyecciones, que nos da la distancia al epicentro.

Los resultados obtenidos para este procedimiento con ambos modelos de velocidad generan resultados muy diferentes entre sí, por lo que no resulta conveniente utilizar este método para la solución del presente problema.

5.1.- EVENTOS DEL 23 DE NOVIEMBRE DEL 2008.

El análisis de eventos que se muestra a continuación corresponde a la serie de eventos ocurridos el 23 de Noviembre del 2008 a las 04:03:26 hrs. y con una réplica a las 04:11:57, el registro de este evento se obtuvo en las estaciones AOCH y AOTY (expuestas en el capítulo anterior) con una diferencia S-P menor a 2.00 s. lo que indica que estamos en presencia de un evento cuyo epicentro se ubica dentro de la cuenca.

El primer análisis de los eventos consiste en conocer la distancia al epicentro y por ende la ubicación espacial de éste en cada uno de los eventos, para ello, se tomó la diferencia en tiempo de los arribos de las ondas P y S en cada uno de los registros y usando un criterio de sólido Poissoniano ($\alpha = \sqrt{3}\beta$) se obtiene la distancia en función de la velocidad de ondas P y S-P, tal y como se muestra a continuación:

$$T_S - T_P = \frac{x}{V_S} - \frac{x}{V_P}$$

$$T_S - T_P = \frac{x(V_P - V_S)}{V_S V_P}$$

$$T_S - T_P = \frac{x(V_P/V_S - 1)}{V_P}$$

$$\text{por Poisson: } \frac{V_P}{V_S} = \sqrt{3}$$

$$T_S - T_P = \frac{x(\sqrt{3} - 1)}{V_P}$$

$$V_P \left(\frac{T_S - T_P}{\sqrt{3} - 1} \right) = x$$

Resultando:

$$\frac{V_P}{\sqrt{3} - 1} (T_S - T_P) = x \dots\dots(5.5)$$

La obtención del valor de la distancia epicentral con esta fórmula expone la necesidad de utilizar un valor de velocidad de onda P adecuado para las características del evento así como de cada una de las estaciones que registraron, es importante tomar en consideración las características del subsuelo en cada una de las estaciones. Para poder hacer una distinción de sobre cuál sería el valor de velocidad de onda P más apropiado para estos eventos, se obtuvieron valores de distancia epicentral con 4 diferentes valores de velocidad.

Tomando en cuenta la sismicidad histórica de la Cuenca de México, que se muestra en la tabla A1 del Anexo A se puede ver que la profundidad promedio de los epicentros oscila entre 1 – 14 km, con algunas excepciones a profundidades mayores. Por ello las velocidades de onda P que se utilizaron se presentan para profundidades promedio de 10 - 12 km.

La primer velocidad de onda P utilizada, corresponde a un modelo de velocidades compuesto por (Cárdenas 2007), este modelo se muestra en la tabla A4 dentro del anexo A, la velocidad utilizada corresponde a la obtenida para una profundidad de 12 km (por lo ya mencionado arriba), resultando 2.6 km/s.

El segundo valor empleado corresponde al obtenido para una roca sedimentaria tipo arenisca con un valor de 4.3 km/s, el tercer valor corresponde a la velocidad de onda para una roca volcánica tipo basalto con una velocidad de 6.4 km/s.

La cuarta velocidad de onda P empleada es obtenida del trabajo de tesis de Huesca-Perez (2008), este modelo de velocidades es empleado como modelo del

Valle de México y corresponde a una modificación hecha por Z. Jiménez en los 70^{os} a modelos obtenidos por Havskov y Singh.

La tabla del modelo se muestra como tabla A3 dentro del Anexo A. la velocidad empleada para la búsqueda de distancias epicentrales es la correspondiente a una profundidad de 11 km resultando de 6.8 km/s.

En la tabla 5.2, se muestran los resultados de distancia obtenidos para diferentes valores de V_p en las dos estaciones y para los dos eventos.

EVENTO 1 (23/Nov/2008)									
Est.	S-P (s)	V_{p1} (km/s)	Dist. (km)	V_{p2} (km/s)	Dist. (km)	V_{p3} (km/s)	Dist. (km)	V_{p4} (km/s)	Dist. (km)
AOCH	1.913	2.6	6.79	4.3	11.24	6.4	16.72	6.8	17.77
AOTY	2.00	2.6	7.10	4.3	11.75	6.4	17.49	6.8	18.58
EVENTO 2 (23/Nov/2008)									
Est.	S-P (s)	V_{p1} (km/s)	Dist. (km)	V_{p2} (km/s)	Dist. (km)	V_{p3} (km/s)	Dist. (km)	V_{p4} (km/s)	Dist. (km)
AOCH	1.95	2.6	6.93	4.3	11.45	6.4	17.05	6.8	18.11
AOTY	2.038	2.6	7.24	4.3	11.97	6.4	17.82	6.8	18.93

Tabla 5.2 Tabla con la distancia al epicentro para cada una de las estaciones en ambos eventos, para la obtención de estos valores se utilizó la ecuación 5.5, para cuatro valores diferentes de velocidad de onda P, también se muestran las diferencias en tiempo de las ondas S-P, las distancias al epicentro caen dentro de la Cuenca de México.

El método empleado para obtener el epicentro de un evento de forma gráfica, se basa en la intersección de tres circunferencias con centro en la estación (lo que significaría, se debe tener por lo menos 3 estaciones que hayan registrado el evento) y con radio igual a la distancia epicentral de la ecuación 5.5, pero dado que nuestro arreglo solo consta de 2 estaciones se tienen dos puntos de intersección entre ambas circunferencias, generando así dos posibles epicentros.

Basados en los resultados obtenidos en la tabla 5.2 se obtuvieron cuatro pares de resultados. Generando así una incertidumbre en la ubicación del epicentro.

Los registros de las estaciones fueron convertidos a datos de velocidad por medio de la multiplicación de cada componente con el valor de la respuesta del instrumento en esa componente, el tener los registros como datos de velocidad permite conocer el backacimut (ángulo formado del epicentro a la estación de registro) de cada evento por medio de las amplitudes de los primeros arribos en las componentes horizontales y de esta forma conocer la dirección del epicentro con respecto a cada estación. En la tabla 5.3 se despliegan los valores de duración del evento, amplitud por componente y el backacimut para los dos eventos en las dos estaciones pertenecientes al arreglo de la DAO.

EVENTO 1 (23/Nov/2008)			
Estación	Duración (seg)	Amplitud	Backacimut (°)
AOCH	17.7 seg.	Z= 4.71926×10^{-6}	269°
		N= -8.44788×10^{-6}	
		E= -1.65124×10^{-5}	
AOTY	13.2 seg.	Z= 9.59276×10^{-6}	258.7°
		N= -1.14486×10^{-5}	
		E= -2.00914×10^{-5}	
EVENTO 2 (23/Nov/2008)			
Estación	Duración	Amplitud	Backacimut (°)
AOCH	35.15 seg.	Z= 4.58613×10^{-6}	265.8°
		N= -1.27457×10^{-5}	
		E= -2.15210×10^{-5}	
AOTY	18.879 seg.	Z= 1.30459×10^{-5}	255.9°
		N= -1.11264×10^{-5}	
		E= -2.84336×10^{-5}	

Tabla 5.3: Tabla de duración, amplitud y backacimut de los eventos.

Debido a la incertidumbre formada por no contar con toda la información necesaria para poder determinar donde se encontraba exactamente el epicentro de los eventos, nos pusimos en contacto con otra red de monitoreo sísmico que pudiese haber registrado con sus equipos a los eventos, razón por la cual nos acercamos a la Red Sísmica del Valle de México, donde en cinco de sus estaciones de banda ancha registraron los eventos, por tal motivo nos proporcionaron sus datos para poder analizarlos y complementar la información a fin de poder determinar la ubicación epicentral de los eventos.

Las cinco estaciones de la RSVM están ubicadas en un área muy extensa dentro de la Cuenca y por ende, en distintas zonas geotécnicas (véase el capítulo 2) tal y como se puede constatar en la figura 5.1, el nombre que recibe cada una de las estaciones por parte de la Red Sísmica del Valle de México son: MZVM, PBVM, PTVM, ORVM y SZVM.

Al momento de analizar los datos de las estaciones de la RSVM, nos percatamos de que en la estación MZVM se registraron 4 eventos en el lapso de una hora, en tres de los cuales el ruido de la estación no presentaba repercusiones directas en la lectura de las trazas, para el caso del cuarto evento el nivel del ruido de la estación es tal que dificulta la lectura.

Otra de las estaciones que registró más de dos eventos es SZVM. En esta estación la relación señal ruido no presentó problemas para la lectura de las trazas correspondientes a los dos primeros eventos, sin embargo, para el tercero se tuvo que aplicar un filtro pasabandas tipo Butterworth en un rango de frecuencias de 1 a 8 Hz. para poder identificar el arribo de las trazas, el cuarto evento no se registró en la estación. Las estaciones MZVM y SZVM se ubican sobre cuerpos duros como lo son la Sierra de las Cruces y la Sierra del Chichinautzin.

Las estaciones restantes de la RSVM solo cuentan con el registro de los dos primeros eventos, cabe destacar, que para la lectura de las trazas en todas las estaciones restantes, fue necesaria la aplicación de un filtro (cuyas características

están descritas al pie de figura en cada una de las trazas del Anexo B) con el fin de quitar los efectos del ruido.

Haciendo una inspección visual de los registros en todas las estaciones se puede observar que las formas de ondas de los arribos de P y S son iguales para todas las estaciones y en todos los eventos, lo que sugiere que se trate de pequeños eventos ocurridos a manera de enjambre y de forma continua en el lapso de una hora generados por la misma fuente.

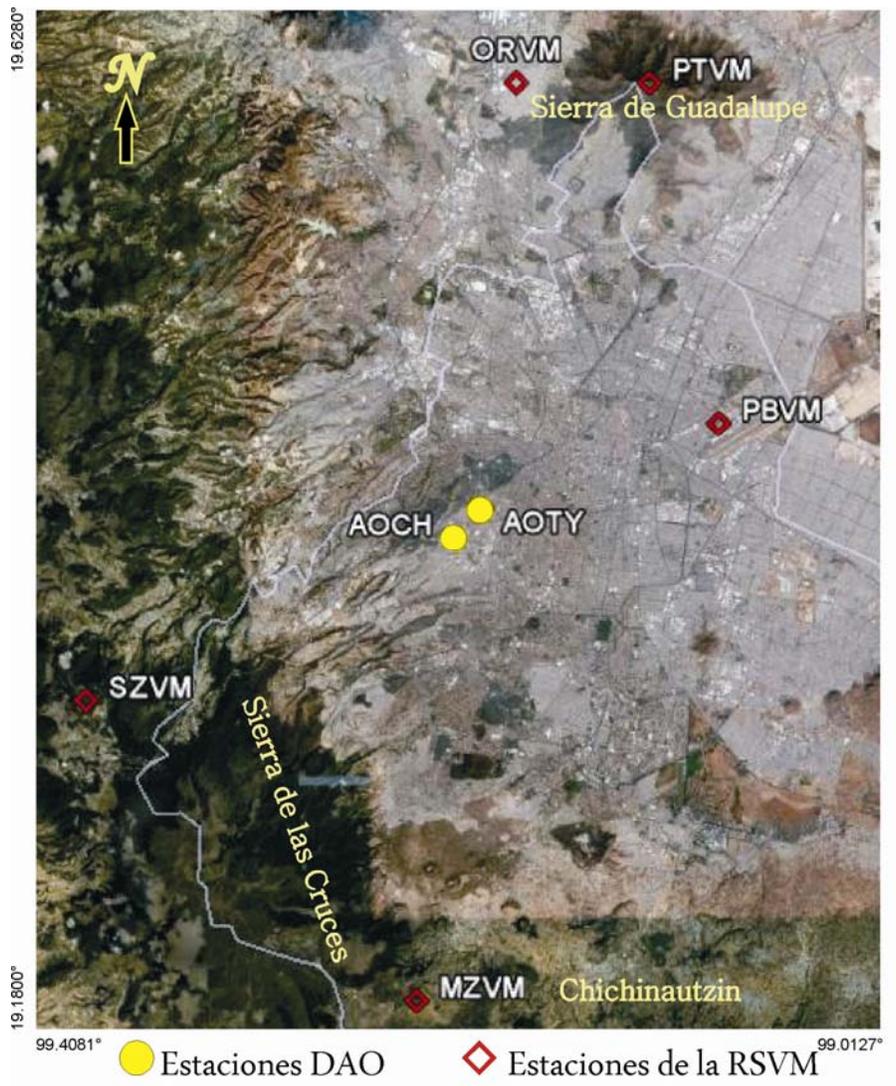


Figura 5.1: Ubicación de las estaciones de la Delegación Álvaro Obregón (DAO) en círculos amarillos y de la Red Sísmica del Valle de México (RSVM) en rombos rojos. Todas las estaciones registraron los eventos del 23 Nov. 2008.

Debido a que ya se cuenta con más estaciones que registraron los eventos, se puede iniciar la búsqueda del epicentro o epicentros por medio de la intersección de circunferencias. Tomando en cuenta que se está buscando una mejor precisión de la ubicación, es que se toman cuatro valores distintos de velocidad de onda P (V_p), dichos valores serán utilizados para conocer la distancia al epicentro en las estaciones de la RSVM. La tabla 5.4 está dividida por evento, donde en cada uno de ellos se enlistan las estaciones que lo registraron, su orden está en función del tiempo de registro del arribo de la onda P, de esta forma se podrá saber que estación registró primero los eventos y así conocer cuál es la estación más cercana al epicentro. Las formas de onda de todos los eventos de la tabla 5.4 se encuentran dentro del anexo B.

También se exponen los datos de duración de los eventos para cada una de las estaciones, la duración del evento se consideró a partir del tiempo de arribo de la onda P a la coda de los eventos, para los casos en la tabla en los que no se muestra este dato, se debe a que la lectura de la coda del evento se dificultaba por la cantidad de ruido de la estación.

Se graficaron todas las circunferencias para cada una de las distancias (enlistadas en la tabla 5.4) con el fin de conocer el epicentro por medio del cruce de al menos tres de ellas. Resulta importante señalar que todas las estaciones se encuentran en sitios geológicamente muy distintos, por ejemplo, la estación PBVM se encuentra en una zona de lago a un costado del Aeropuerto “Benito Juárez”, donde la estructura del suelo se encuentra formado por capas de arcillas y arenas del antiguo lago. Las estaciones del arreglo de la DAO (AOCH y AOTY), se ubican una zona de transición donde la estructura del suelo está formada por capas cruzadas de areniscas y lutitas producto del contacto con los lagos, y material vulcano-sedimentario producto de la actividad volcánica y erosión de la Sierra. Y las estaciones MZVM, SZVM, PTVM se ubican en zonas de suelos duros o rígidos como la Sierra de las Cruces, el Chichinautzin y la Sierra de Guadalupe.

EVENTO 1										
Estación	S-P (s)	Vp ₁ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₂ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₃ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₄ (km/s)	Dist. (km)	Duración
AOCH	1.913	2.6	6.79	4.3	11.24	6.4	16.72	6.8	17.77	17.722
AOTY	2.0	2.6	7.10	4.3	11.75	6.4	17.49	6.8	18.58	13.214
SZVM	3.04	2.6	10.80	4.3	17.86	6.4	26.58	6.8	28.24	16.222
PBVM	3.15	2.6	11.19	4.3	18.50	6.4	27.54	6.8	29.26	20.038
MZVM	3.43	2.6	12.18	4.3	20.15	6.4	29.99	6.8	31.86	19.686
PTVM	4.0	2.6	14.20	4.3	23.49	6.4	34.97	6.8	37.15	19.741
EVENTO 2										
Estación	S-P (s)	Vp ₁ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₂ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₃ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₄ (km/s)	Dist. (km)	Duración
AOCH	1.95	2.6	6.93	4.3	11.45	6.4	17.05	6.8	18.11	35.15
AOTY	2.038	2.6	7.24	4.3	11.97	6.4	17.82	6.8	18.93	18.879
PBVM	3.02	2.6	10.73	4.3	17.74	6.4	26.40	6.8	28.05	17.956
SZVM	3.04	2.6	10.80	4.3	17.86	6.4	26.58	6.8	28.24	14.898
MZVM	3.49	2.6	12.40	4.3	20.50	6.4	30.51	6.8	32.42	22.778
PTVM	4.52	2.6	16.05	4.3	26.55	6.4	39.52	6.8	41.99	
ORVM	8.17	2.6	29.02	4.3	47.99	6.4	71.43	6.8	75.89	
EVENTO 3										
Estación	S-P (s)	Vp ₁ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₂ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₃ (km/s)	Dist. (km)	Vp ₄ (km/s)	Dist. (km)	Duración
SZVM	3.02	2.6	10.73	4.3	17.74	6.4	26.40	6.8	28.05	34.158
MZVM	3.38	2.6	12	4.3	19.85	6.4	29.55	6.8	31.40	19.634

Tabla 5.4: Tabla con distancias obtenidas a partir de diferentes velocidades de onda P, los datos de duración del evento y polarización se incluyen en la tabla.

Las propiedades de los suelos en cada una de las estaciones, trae consigo implicaciones directas en la forma de propagación de las ondas sísmicas, como lo es, la velocidad de ondas P y S, incrementándose en zonas de roca dura y disminuyendo en zonas de sedimentos mal compactados. Siguiendo este criterio es que se observa que el mismo evento, registrado en todas las estaciones presenta diferencias en el tiempo de arribo de las ondas P y S, lo que se puede observar gráficamente en el tamaño de las circunferencias de cada una de las estaciones por lo que se puede concluir, que los efectos del sitio en todas las estaciones afectan en tiempo a todos los registros, dificultando de manera significativa la obtención del epicentro.

Razón de lo anterior es que al buscar el epicentro de los eventos las complicaciones producidas por la diferencias de subsuelo en cada una de las estaciones se hacen muy notorias, como ejemplo de ello, en la figura 5.2 se muestran las circunferencias obtenidas para el evento 1, utilizando una velocidad de onda P obtenida del modelo de velocidades modificado por Cárdenas (2007) (correspondiente al V_{p1} de la tabla 5.4), en ella se puede observar que las distancias obtenidas de las estaciones de la RSVM (representadas por el círculo azul) no se encuentran ni cerca de coincidir con las obtenidas por las estaciones de la DAO. Estas discrepancias son evidencia de la importancia de conocer los modelos de velocidades de los sitios donde se ponen las estaciones.

Las distancias de la tabla 5.4 fueron calculadas para los eventos, y las velocidades que presentaron mejores resultados que corresponden a V_{p3} y V_{p4} velocidad en Basaltos y velocidad del modelo para la CVM, respectivamente. En las figuras 5.3 y 5.4 se muestran los resultados obtenidos para ambas velocidades para el evento 1.

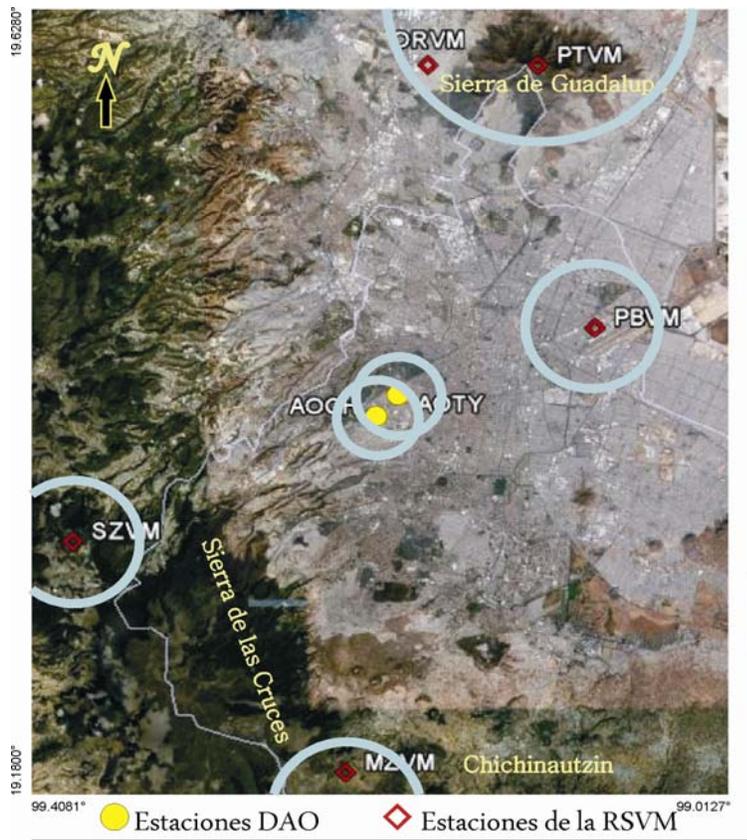


Figura 5.2: Búsqueda del epicentro del evento 1, con velocidades de obtenidas de Cárdenas (2007). Valor de V_{p1} en la tabla 5.4.

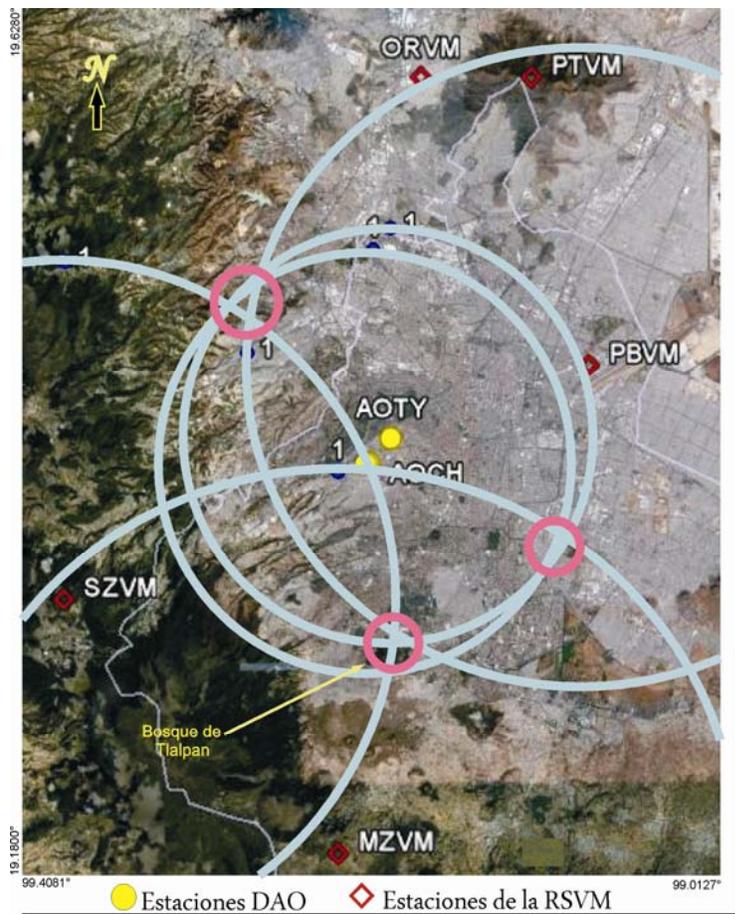


Figura 5.3: Epicentro del evento 1 para una velocidad de Basalto (Valor de V_{p3} en la tabla 5.4).

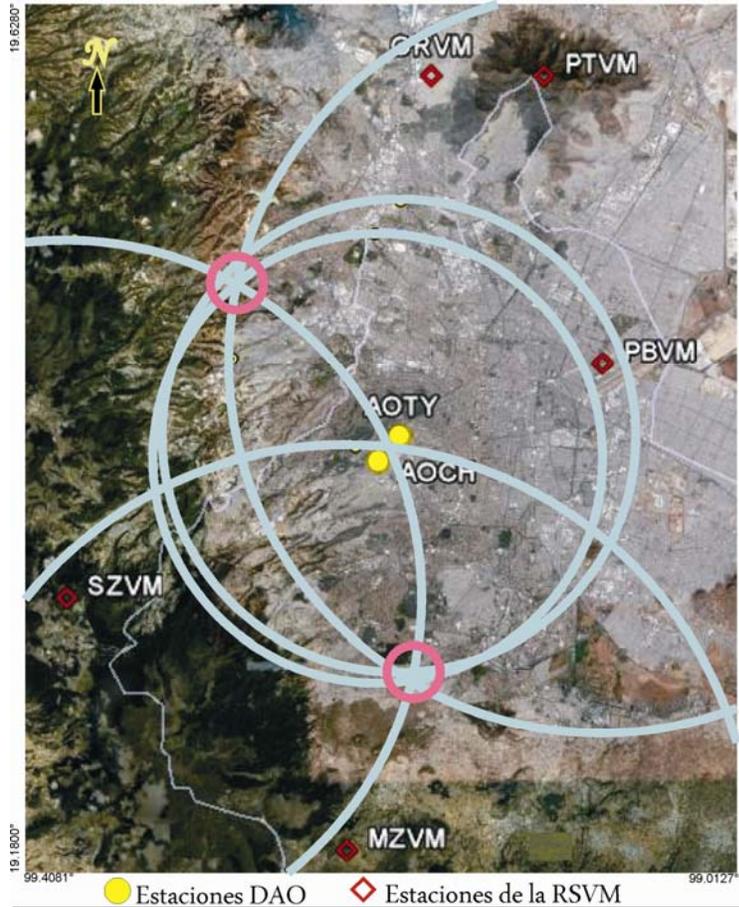


Figura 5.4: Epicentro para el evento 1 con una velocidad obtenida del modelo para la CVM (Huesca-Perez, 2008), valor de V_{p4} en la tabla 5.4.

La figura 5.3 corresponde a los resultados obtenidos del evento 1 con una velocidad de basaltos ($V_{p3} = 6.4$ km/s), en ella se puede observar que se generan tres posibles soluciones epicentrales, la primera se ubica en el sur de la ciudad, específicamente en el Bosque de Tlalpan, la segunda dentro de la delegación Iztapalapa muy cerca del cerro de la Estrella, y la tercera al norponiente en las afueras de la Ciudad de México.

Debido a las tres posibles soluciones es que no se puede definir una de ellas como el epicentro del evento, por ello es bueno hacer una comparación con el resultado obtenido en la figura 5.4.

En la solución obtenida con la V_{p4} , correspondiente al modelo de velocidades de la CVM, que se muestra en la figura 5.4 para el evento 1, se observa claramente que se producen dos posibles soluciones, que resultan muy similares a dos de las obtenidas en la figura 5.3. Una de ellas a solo 2 km al SE del epicentro de Tlalpan mostrado en la figura anterior, y la otra posible solución se ubica a 12.7 km al NW de la estación AOCH

Cabe destacar que para esta velocidad la posible ubicación epicentral dentro de la delegación Iztapalapa queda descartada casi por completo y se refuerzan las dos restantes

Los resultados obtenidos y mostrados en las figuras 5.3 y 5.4 definen dos posibles epicentros: al Norponiente de la DAO, y en los alrededores al Bosque de Tlalpan. Para poder definir cuál de estos resultados corresponde a la ubicación correcta de los eventos, conviene apoyarse en la tectónica y sismicidad histórica en cada una de las zonas.

Para el caso al Norponiente de la DAO, el epicentro se ubica en los límites de la zona centro y zona norte de la SC muy cerca de la Falla Otomí, falla que pertenece al aparato volcánico El Rehilete quien en su falda oriente está controlado por un sistema de fallas tipo normal (Mooser, F, *et al.*, 1996), esta falla se encuentra mapeada por García-Palomo, 2008 en la figura 2.8. La sismicidad histórica de la Cuenca no muestra que esta zona sea de una notoria actividad sísmica.

El caso del epicentro en el Sur de la Cuenca de México (Bosque de Tlalpan), es aún más probable que el anterior, debido a que la zona cuenta con una actividad sísmica reportada más densa, además de que la Geología y tectónica del lugar es más compleja y activa.

El bosque de Tlalpan pertenece a una zona producto de los derrames del Xitle, que sobreyacen a las tobas del Cerro de San Miguel y a la formación Tarango, se

puede encontrar en la figura 2.9 dentro del capítulo 2 con la referencia de la caldera del Zacatepetl (letra C), dentro de la misma figura se observa que muy ceca a la zona, se ubica una de las fallas más grandes y representativas de la formación de la Cuenca endorreica de México por la presencia de la Sierra del Chichinautzin, me refiero a la Falla Santa Catarina.

La actividad y profundidad de esta falla en la parte sur de la cuenca, ha propiciado cuerpos volcánicos que han generado rasgos geomorfológicos muy importantes que han cambiando por completo la forma de la cuenca, tal es el caso del Cerro de San Miguel, Sierra de Santa Catarina y las lavas del Pedregal. En relación a la sismicidad histórica de la falla, con ayuda de la figura 3.3 queda claro que existe una gran cantidad de eventos sobre o muy cerca a ella que debido a la gran longitud de la falla (140 km) cubre una importante área al sur de la ciudad.

Debido a que los resultados obtenidos hasta el momento no son por completo satisfactorios, resulta conveniente apoyarse de otro método que ayude a definir claramente la ubicación epicentral de los eventos. Para ello se calculó el epicentro por medio del programa Hypo. Los resultados que mostró el programa se grafican en la figura 5.5.

Los epicentros de los tres eventos obtenidos por medio del programa HYPO son:

- Evento 1: 19°23.50' N , 99°15.9' W
- Evento 2: 19°23.32' N , 99°15.7' W
- Evento 3: 19°23.06' N , 99°15.4' W

Los tres eventos se presentan alineados en dirección NW tal y como se puede apreciar en la figura 5.5. Su relación con la tectónica se describe en el recuadro, donde los epicentros se encuentran referenciados entre los colapsos 1 y 2 del cerro de San Miguel (líneas rojas discontinuas), el sistema de fallas más cercano a ellos es el que domina la trayectoria del río Tacubaya (línea en azul en el colapso numero 2).

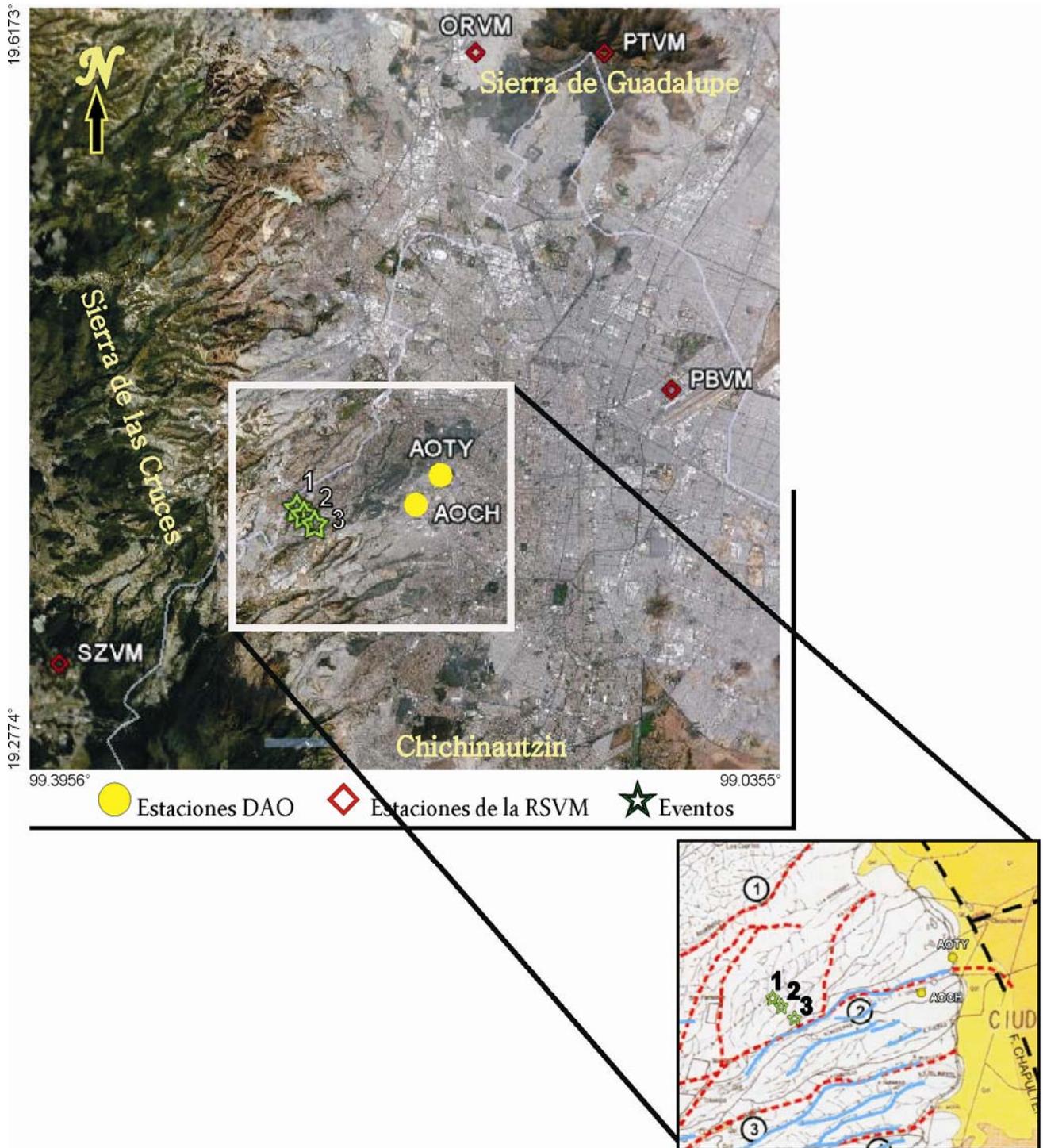


Figura 5.5: Ubicación epicentral de los tres eventos del 23 de Nov. 2008. En círculos amarillos se marcan las estaciones de la DAO, en rombos rojos las estaciones de la RSVM, en estrellas verdes los epicentros de los tres eventos. En el recuadro se muestra la ubicación de las fallas (azul) y colapsos (rojo) y su posible relación con la ubicación epicentral.

La sismicidad histórica en la zona cercana a los epicentros, muestra una gran actividad. Como muestra de ello, se presenta en la figura 5.6 la sismicidad reportada en el capítulo 3 y los epicentros obtenidos de los tres eventos.

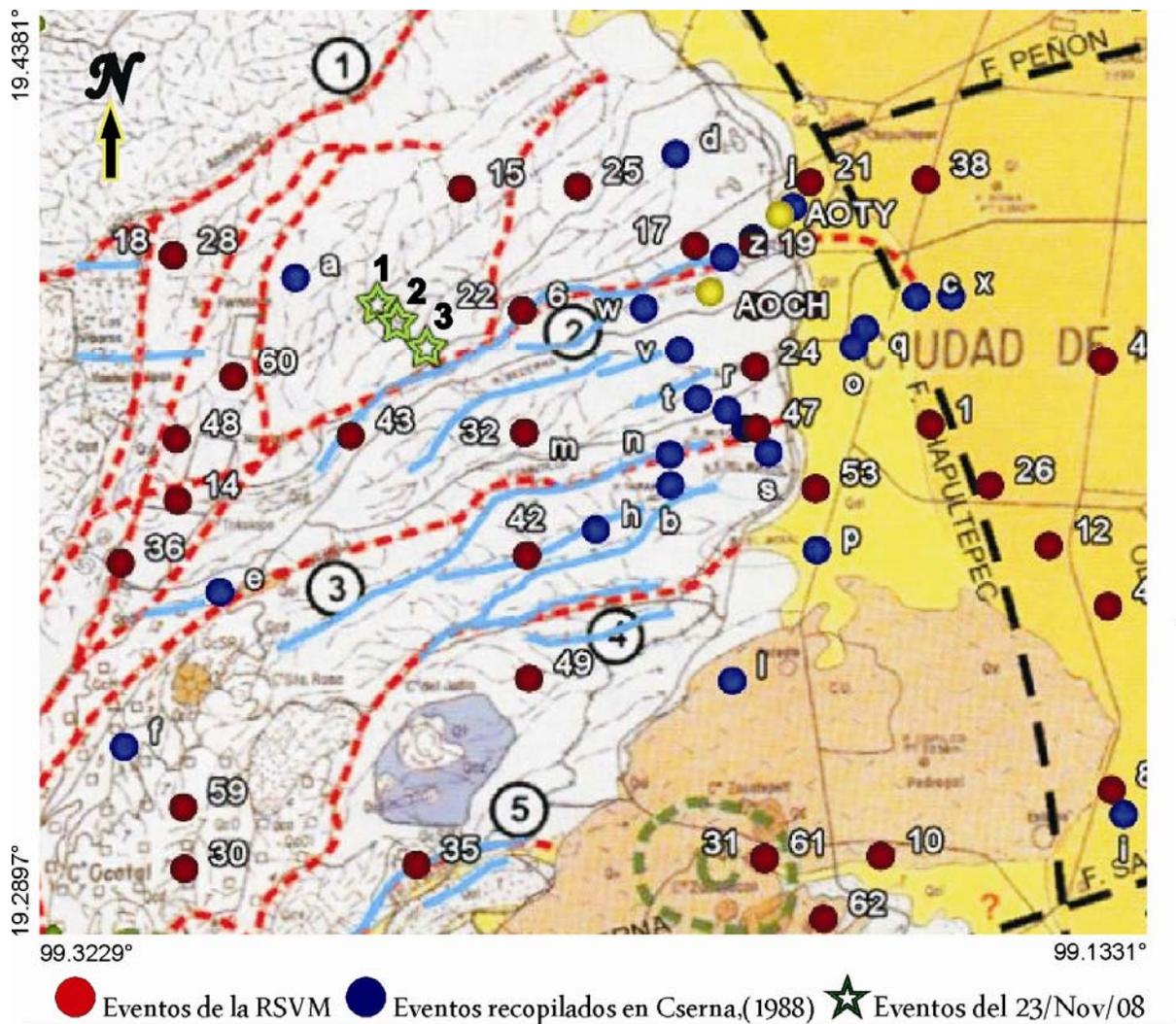


Figura 5.6: Relación de la sismicidad histórica proporcionada por la RSVM (círculos rojos) y en círculos azules la sismicidad recopilada por Dr. Mota-Palomino (Cserna, et al., 1988), las estrellas verdes indican los epicentros de los eventos del 23 de Nov. 2008, obtenidos con el programa Hypo.

Debido a los resultados obtenidos para los tres eventos con ayuda del programa Hypo, a la gran actividad sísmica reportada, su relación con las fallas y colapsos del poniente de la Ciudad de México, así como de los valores de los Backacimut de las estaciones de la DAO, se concluye que la ubicación más probable de los eventos es la mostrada en la figura 5.5.

Una característica importante a conocer en zonas sísmicamente activas, es la respuesta del terreno ante eventos sísmicos, este análisis se lleva a cabo por medio del registro de los eventos en la zona de interés (que para este caso corresponde a los terrenos de la DAO), con el objetivo de conocer el valor pico de la aceleración en cada componente medido en gales, debido a que los datos de las estaciones de la red de la DAO son datos de velocidad del terreno, es necesario obtener la diferencia del registro en el dominio de la frecuencia al multiplicar por la frecuencia angular.

La escala de intensidad de un evento se logra por medio de este procedimiento y corresponde justamente a conocer los niveles de aceleración del terreno registrado por las estaciones, es por esta razón que se aplicará este procedimiento a los eventos registrados en las estaciones AOCH y AOTY en cada una de sus componentes. Actualmente existen dos tipos de escalas aceptadas internacionalmente ellas son: la Escala de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA), y la Escala de Mercalli Modificada (MM) (Ishiyama, 1989). Ambas escalas se encuentran dentro del Anexo A como tabla A5 y A6 respectivamente. En la tabla de la tabla 5.5 se muestran los resultados para ambas escalas.

EVENTO 1					
Estación	Norte (gal)	Este (gal)	Vertical (gal)	Escalas	
				JMA	MM
AOCH	0.289	0.301	0.312	0	1
AOTY	0.234	0.169	0.1	0	1
EVENTO 2					
Estación	Norte (gal)	Este (gal)	Vertical (gal)	Escalas	
				JMA	MM
AOCH	0.488	0.311	0.553	0	1
AOTY	0.338	0.210	0.143	0	1

Tabla 5.5: Tabla con los valores picos de amplificación medidos en gales para cada componente de las estaciones que registraron el evento, el valor de la intensidad en las dos escalas se indica en el extremo de la tabla.

La tabla 5.5 muestra que los valores de intensidad para ambos eventos es el mismo según la escala empleada, en ambas escalas el valor resultante implica un evento que no fue perceptible por humanos pero si por instrumentos de alta sensibilidad como los sensores que forman las estaciones de este trabajo. Es por ello que no resulta difícil concluir que no se tengan denuncias ciudadanas de los eventos.

Sin embargo cabe destacar que el hecho de que la población no se haya percatado del movimiento, no implica que los eventos carezcan de interés ingenieril o científico.

Para el cálculo de la magnitud del sismo, la magnitud de longitud de coda tomada de Havskov, J. (1983) se empleo para estos eventos, a partir de la relación obtenida por el autor como resultado de una regresión de mínimos cuadrados

entre la magnitud de ondas de cuerpo y la duración de la coda en segundos se obtiene la siguiente relación promedio:

$$M_c = -1.59 + 2.40(\log_{10} T) + 0.00046(D)$$

Donde: **T** = duración de la coda en segundos, **D** = la distancia epicentral en Km.

El valor de la magnitud de longitud coda promedio para cada evento es de: $M_c = 1.4$, para el segundo evento resulta de: $M_c = 1.6$ y el tercer evento que solo fue registrado en dos estaciones (ver tabla 5.4) resulta de $M_c = 1.8$.

A modo de corroboración se obtuvieron los valores de magnitud para los tres eventos, pero con una relación de Lee (1972), que es empleada en el trabajo de tesis de Chavacan, Marcos (2003) por ser la que mejores resultados genera según la red de monitoreo de SISMEEX, se tiene la siguiente relación:

$$M_c = -0.87 + 2 \log T + 0.0035 D$$

Donde: **T** = duración de la coda en segundos, **D** = la distancia epicentral en Km.

Los valores de magnitud coda obtenidos resultan de $M_c = 1.68$, $M_c = 1.82$ y $M_c = 2.00$, para el primer, segundo y tercer evento respectivamente. Se puede observar que los valores de magnitud no varían considerablemente y ambos se presentan como dos posibles resultados.

Recapitulando acerca de los eventos ocurridos el 23 de Noviembre del 2008, la obtención del epicentro se obtuvo por medio de una inspección y comparación de resultados de distancias epicentrales producto de diferentes valores de velocidad de propagación de onda P, resultando de ello dos posibles soluciones que no definían claramente la ubicación correcta.

Debido a ello se aplicó otro método de inspección, el cuál consistía en la aplicación del programa Hypo. Los resultados obtenidos mostraron que los tres

eventos se ubican en forma continua y dentro de una zona que ha presentado una importante actividad sísmica.

El valor de la intensidad en dos tipos de escalas se ubica en el primer valor de cada una de ellas (tabla 5.5), y el valor de la magnitud obtenida no sobrepasa el valor de 2 para todos los eventos.

A pesar de la baja magnitud de los sismos, su importancia radica en el hecho de que fueron percibidos por la red de monitoreo de la DAO y por una gran cantidad de estaciones pertenecientes a la RSVM distribuidos en distintas zonas de la Cuenca de México, los cuales están caracterizados y dominados por muy diversos comportamientos de suelos y estructuras.

No solo fueron tres los eventos ocurridos, sino que en estaciones de suelo firme se registraron hasta 4 eventos que ocurrieron en el corto lapso de 1 hora. Este hecho provoca reflexionar sobre la constante actividad en que se encuentra inmersa la cuenca, y el impacto que pueden sufrir estructuras y viviendas, o bien, que actúen como detonador de colapsos, derrumbes o fracturas que pongan en un riesgo latente a la población.

6. CONCLUSIONES.

En este estudio hemos presentado los resultados del monitoreo de la sismicidad en las faldas de la Sierra de las Cruces y en especial en la zona norte de la Delegación Álvaro Obregón (DAO), en un periodo de cinco años (2005-2009). En su mayoría, el monitoreo se llevó a cabo con instrumentos traxiales de banda ancha, que en diversas etapas conformaron arreglos triangulares.

Los resultados obtenidos para este trabajo dan un total de 15 eventos de tipo local, de los cuales 11 fueron registrados por una sola estación, 10 por la estación COCH y 1 por la estación GIRA (ver la tabla 5.1). Debido al nivel de ruido presente en las estaciones, los arribos de las ondas P y S no fueron definidas para cinco eventos, para los seis eventos restantes la diferencia S-P se encuentra en el rango de 1 a 3 s.

En la parte final del monitoreo, se registraron cuatro eventos locales en un lapso de 1 hora. El enlace de datos de la red de la DAO y de la RSVM permitió hacer un análisis más detallado del enjambre de eventos, estimando que el epicentro ocurrió en el norponiente de la Ciudad de México, entre los colapsos 1 y 2 del cerro de San Miguel cerca de un sistema de fallas que controla al río Tacubaya.

La obtención de los epicentros de los eventos del 23 de noviembre del 2008 presentó incertidumbres, como resultado de la falta de estudios en la llamada zona de lomas de la Cuenca de México; con ello me refiero a la falta de modelos de velocidad dentro de los terrenos de la DAO, la cual se asienta en la zona de piedemonte de la SC.

El análisis de la sismicidad histórica de la zona poniente de la Ciudad de México muestra una gran actividad sísmica, asociada posiblemente a los sistemas de fallas que han modelado a la ciudad. Las fallas que se presentan en su mayoría

dentro de los terrenos de la DAO se ubican en la parte centro de la Sierra de las Cruces (SC), donde el rumbo que las domina es NW-SE.

Los resultados de este estudio muestran que es necesario seguir sumando esfuerzos para mantener instrumentada la ciudad de México. Realizar estudios más a fondo que mejoren nuestra comprensión de la estructura de la cuenca y se lleven a cabo estimaciones cualitativas de cual sería el escenario para futuros sismos en zonas vulnerables de ciudad.

La lectura de todos los registros de los eventos locales detectados por las estaciones de la DAO, presentaron varias complicaciones que son generadas de manera directa por las condiciones de instalación de las estaciones, con ello se hace referencia a los niveles de ruido presente en los registros, en la mayoría de las ocasiones el ruido cultural era tal alto, que no permitía ubicar los arribos de las ondas P y S, además de que el ruido se encontraba en el rango de frecuencias para eventos someros de tipo local, por lo que no se podía aplicar filtros a los registros.

Otra característica que dificultó el monitoreo sísmico, radica en el hecho que durante varias etapas los equipos utilizados presentaban fallas técnicas o bien que requerían de condiciones especiales para su óptimo funcionamiento. Por ello, es recomendable que el monitoreo continuo en la DAO se lleve a cabo con equipos altamente sensibles que registren en una amplia gama de frecuencias, que cuenten con características y requerimientos técnicos similares, así como de la construcción de casetas o pozos que ayuden a mitigar la gran cantidad de ruido cultural en las estaciones, producido por una de las zonas más pobladas de la Ciudad de México.

El resultado del constante monitoreo podrá definir a las fuentes que generan los sismos y así poder evaluar zonas que presenten un peligro sísmico latente.

TABLA A.1 Sismicidad Histórica

EVENTOS DE LA RSVM					
NUM	FECHA	LATITU D	LONGITU D	PROF.(Km)	MAG.
1	7 JUL 1974	19.37 N	99.17 W	5	
2	12 JUL1974	19.37 N	99.20 W	5	
3	12 JUL1974	19.38 N	99.08 W	5	
4	14 JUL 1974	19.34 N	99.14 W	5	
5	21 ABRIL 1976	19.25 N	99.34 W	4	
6	7 JUN1976	19.39 N	99.24 W	15	
7	7 JUN1976	19.25 N	99.21 W	4	
8	5 DIC 1976	19.31 N	99.14 W	0	
9	5 ENE 1977	19.23 N	99.24 W	16	
10	26 ENE1977	19.30 N	99.18 W	1	
11	9 ABRIL 1977	19.36 N	99.08 W	5	
12	7 JUL 1979	19.35 N	99.15 W	5	
13	30 JUL 1979	19.25 N	99.22 W	5	
14	15 AGO 1979	19.36 N	99.30 W	5	
15	16 ENE 1980	19.41 N	99.25 W	0	
16	15 FEB 1980	19.28 N	99.14 W	0	
17	20 FEB1980	19.40 N	99.21 W	1	3.5
18	14 MAY 1980	19.40 N	99.30 W	5	
19	6 JUN 1980	19.40 N	99.20 W	11	
20	4 FEB 1981	19.39 N	99.20 W	2	3.5
21	5 FEB 1981	19.41 N	99.19 W	4	
22	7 FEB 1981	19.39 N	99.24 W	4	3.4
23	9 FEB1981	19.39 N	99.19 W	4	3.1
24	9 FEB1981	19.38 N	99.20 W	5	3.3
25	10 FEB 1981	19.41 N	99.23 W	5	
26	8 MAR 1981	19.36 N	99.16 W	3	

27	21 MAY 1981	19.27 N	99.14 W	9	
28	22 AGO 1981	19.40 N	99.30 W	3	4.2
29	26 DIC 1981	19.30 N	99.20 W	5	1.6
30	10 JUN 1982	19.30 N	99.30 W	4	2.4
31	26 JUN 1982	19.30 N	99.20 W	5	
32	30 ENE 1983	19.37 N	99.24 W	9	
33	29 NOV 1983	19.25 N	99.22 W	5	
34	4 DIC 1983	19.26 N	99.22 W	4	
35	23 DIC 1983	19.30 N	99.26 W	4	
36	16 OCT 1985	19.35 N	99.31 W	4	
37	19 OCT 1985	19.28 N	99.29 W	4	
38	25 OCT 1985	19.41 N	99.17 W	10	
39	30 OCT 1985	19.21 N	99.15 W	4	
40	28 NOV 1985	19.38 N	99.14 W	1	
41	5 ENE 1986	19.05 N	99.15 W	1	2.5
42	13 JUN 1986	19.35 N	99.24 W	1	
43	25 FEB 1987	19.37 N	99.27 W	5	
44	12 MAR 1987	19.31 N	99.07 W	5	
45	28 NOV 1988	19.29 N	99.34 W	28	3.7
46	29 DIC 1988	19.21 N	99.32 W	20	3.5
47	12 FEB 1990	19.37 N	99.20 W	4	3.5
48	22 ABRIL 1990	19.37 N	99.30 W	6	3.3
49	18 AGO 1991	19.33 N	99.24 W	1	3.8
50	18 ENE 1992	19.20 N	99.31 W	5	
51	6 SEP 1996	19.21 N	99.36 W	5	4.0
52	20 SEP 1997	19.27 N	99.17 W	7	3.4

53	9 FEB 1998	19.36 N	99.19 W	11	2.6
54	6 ABRIL 1999	19.38 N	99.09 W	13	2.8
55	16 DIC 1999	19.27 N	99.14 W	36	3.0
56	16 DIC 1999	19.27 N	99.21 W	9	2.4
57	14 OCT 2000	19.36 N	99.19 W	12	2.6
58	15 OCT 2000	19.39 N	99.11 W	15	2.7
59	14 SEP 2001	19.31 N	99.30 W	14	2.9
60	11 DIC 2004	19.38 N	99.29 W	2	3.2
61	16 OCT 2005	19.30 N	99.20 W	5.1	2.7
62	16 OCT 2005	19.29 N	99.19 W	5.1	2.9
EVENTOS RECOPIRADOS POR EL Dr. MOTA-PALOMINO					
NUM	FECHA	LATITU D	LONGITU D	PROF.(Km)	MAG.
a	6 JUL 1952	19.396	99.279		
b	21 SEP 1956	19.361	99.215		
c	28 ENE 1959	19.391	99.172		
d	03 NOV 1959	19.415	99.213		
e	06 ENE 1960	19.345	99.293		
f	25 MAR 1961	19.320	99.310		
g	15 JUN 1964	19.360	99.083		
h	13 MAY 1967	19.354	99.228		
i	14 JUN 1968	19.306	99.138		
j	10 ABR 1967	19.406	99.193		
k	10 DIC 1961	19.375	99.125		
l	22 MAR 1977	19.329	99.205		
m	22 FEB 1979	19.370	99.240		
n	19 FEB 1980	19.366	99.215		

o	21 FEB 1980	19.383	99.183		
p	20 ABR 1980	19.350	99.190		
q	20 JUN 1980	19.386	99.181		
r	04 FEB 1981	19.373	99.205	1.2	3.5
s	05 FEB 1981	19.366	99.198	0.65	
t	07 FEB 1981	19.375	99.210	0.8	
u	07 FEB 1981	19.370	99.202	1.67	
v	08 FEB 1981	19.383	99.213	1.4	
w	08 FEB 1981	19.390	99.219	0.32	
x	03 AGO 1981	19.391	99.166	5	
y	19 OCT 1985	19.401	99.200		
z	29 OCT 1985	19.398	99.205		

Tabla A1.- tabla de la sismicidad histórica dentro del a zona poniente de la CM, los eventos marcados con números corresponden a información proporcionada por la RSVM. La segunda parte de la tabla con los eventos marcados en letras, corresponde a una recopilación de sismicidad realizada por el Dr. R. Mota-Palomino (Cserna, et al., 1988).

TABLA A.2 Sismicidad registrada por estaciones de la DAO

Evento No.	Fecha (d/m/05) y hora	Estación (15/sep – 28/oct)			Tipo de evento	Reportado	Características				
		Conchita (COCH)					Lat.	Long.	Prof. (Km)	Mag.	Localidad
1	28/09 04:53	X			Regional	Si	17.11	-99.57	33	4.1	Guerrero
2	01/10 21:33	X			Local						
3	10/10 23:28	X			Regional	Si	16.01	-98.34	10	4.3	Costas de Guerrero y Oaxaca
4	10/10 23:33	X			Regional	Si	16.11	-98.29	5	4.1	Costas de Guerrero y Oaxaca
5	11/10 00:05	X			Regional	Si	15.32	-98.18	15	4.2	Costas de Oaxaca
6	11/10 21:18	X			Local						
7	11/10 22:48	X			Local						
8	16/10 09:12	X			Local	Si	19.29	-99.19	10	3.5	Eje Volcánico Central
		Estaciones (arreglo 1)			Características						
	Fecha (d/m/05) y hora	COCH	BIBLI O	LUCI	Tipo de evento	Reportado	Lat.	Long.	Prof. (km)	Mag	Localidad
9	20/11 19:25	X			Regional	Si	16.11	-97.43	8	4.4	Oaxaca
10	21/11 02:15	X			Telesismo	Si	14.9	-91.67	163	4.4	Guatemala
11	29/11			X	Ruido						

	04:30										
12	01/12 04:30			X	Ruido						
13	02/12 11:58	X	X	X	Regional	Si	16.23	-98.52	15	4.8	Costa de Guerrero – Oaxaca
14	05/12 11:27	X			Regional	Si	15.94	-98.94	16	4.4	Costa de Oaxaca
15	05/12 23:29	X			Regional	Si	16.94	-100.52	3	4.1	Costa de Guerrero
16	06/12 02:46	X			Regional	Si	15.7	-95.99	16	4.7	Golfo de Tehuantepec
		Estaciones (arreglo 2)					Características				
	Fecha (d/m/06) y hora	COCH	GIRA	LUCI	Tipo de evento	Reportado	Lat.	Long.	Prof. (km)	Mag	Localidad
17	12/07 23:40			X	Ruido						/
18	14/07 00:15	X			Local						/
19	16/07 03:15	X			Regional	Si	15.95	-98.18	9	4.2	Pinotepa Nacional, Oax.
20	17/07 01:56			X	Ruido						/
21	18/07 4:45	X			Regional	Si	16.86	-99.41	36	4.1	San Marcos, Guerrero
22	19/07 13:00	X			Regional	Si	15.46	-98.40	19	4.5	Pinotepa Nacional, Oax
23	19/07 13:11		X		Ruido						/
24	19/07 13:45	X			Regional	Si	15.81	-98.31	21	4.1	Pinotepa Nacional, Oax

25	24/07 14:30	X			Regional	Si	17.53	-97.98	63	4.2	Huajuapán de León, Oax
26	25/07 16:15	X			Local						/
27	25/07 20:45	X			Regional	Si	17.35	-100.49	25	4.0	Atoyac de Álvarez, Gro
28	31/07 13:15	X			Regional	Si	18.58	-103.84	10	5.4	Costa de Michoacán
29	05/08 02:05		X		Ruido						/
30	06/08 19:30	X			Regional	Si	16.88	-99.22	16	4.0	San Marcos, Guerrero
31	07/08 01:15	X			Local						/
32	10/08 02:00	X	X		Telesismo	Si	13.66	-90.52	77	5.2	Costa de Guatemala
33	11/08 09:30	X	X		Regional	Si	18.32	-101.27	51	5.9	Huetamo, Mich
34	11/08 11:45	X			Regional	Si	18.39	-101.25	50	4.6	Huetamo, Mich
35	13/08 10:15	X	X		Regional	Si	18.23	-103.62	13	5.1	Coalcomán, Michoacán
36	15/08 03:00	X			Regional	Si	15.39	-98.31	17	4.4	Pinotepa Nacional, Oax.
37	16/08 03:13			PTON X	No definido						/
38	16/08 18:45	X	X		Regional	Si	15.67	-98.27	5	4.6	Pinoteca Pacional, Oax
39	19/08 00:30	X	X		Regional	Si	15.91	-97.30	52	5.5	Rio Grande, Oax
40	19/08 18:15	X	X		Regional	Si	16.84	-100.00	29	4.2	Acapulco, Gro.

41	19/08 23:00	X			Telesismo	Si	-61.02	-34.38	10	7.1	Placa de Scotia, Antartico
42	22/08 10:30	X	X		Regional	Si	17.67	-99.93	40	4.2	Zumpango del Rio, Gro.
43	01/09 11:45		X		Local						/
44	01/09 16:15	X			Regional	Si	17.89	-99.25	63	3.9	Chilapa de Álvarez, Gro
45	07/09 06:00	X			Local						/
46	08/09 04:30	X			Regional	Si	16.86	- 100.48	5	3.5	Atoyac de Álvarez, Gro
47	08/09 04:45	X			Regional	Si	16.96	- 100.47	5	4.1	Atoyac de Álvarez, Gro
48	09/09 12:00	X			Regional	Si	16.67	- 100.37	5	4.2	Coyuca de Benitez, Gro.
49	20/09 03:30	X			Regional	Si	15.96	-97.73	13	3.7	Rio Grande, Oax.
50	27/09 17:45	X			Regional						/
51	27/09 18:15	X			Regional	Si	16.47	-99.35	20	4.4	San Marcos, Gro.
52	28/09 01:30	X			Telesismo	Si	-16.57	- 172.04	39	6.7	Region Islas Samora
53	29/09 06:00	X			Regional	Si	17.17	- 100.66	23	4.2	Tecpan, Gro
54	29/09 22:15	X			Local						/
55	01/10 02:00	X			Regional	Si	16.11	-94.55	60	4.8	Union Hidalgo, Oax
56	01/10 04:15	X			Telesismo	Si	46.55	153.17	10	6.2	Islas Kuril

57	01/10 21:15	X			Local						/
58	05/10 22:15	X			Regional	Si	16.91	- 100.01	41	4.0	Acapulco, Gro
59	05/10 23:45	X			Regional	Si	15.92	-98.38	5	4.3	Pinotepa Nacional, Oax
60	08/10 00:15	X			Regional	Si	16.76	- 100.76	11	4.4	Coyuca de Benitez, Gro
61	11/10 01:00	X			Telesismo	Si	8.52	- 103.14	10	5.2	Dorsal Este Pacifico Septentrional
62	12/10 13:45	X			Regional	Si	16.63	- 100.55	20	4.6	Coyuca de Benitez, Gro
63	15/10 12:15	X			Telesismo	Si	19.88	- 155.94	39	6.6	Hawaii
64	19/10 03:45	X			Regional	Si	15.37	-95.72	20	4.6	Crucecita, Oax
65	20/10 01:15	X			Regional	Si	15.66	-97.28	12	4.7	Puerto Escondido, Oax
66	20/10 05:45	X			Telesismo	Si	-13.43	-76.57	33	6.5	Costa de Perú

Tabla A2.- Tabla de eventos sísmicos registrados en estaciones de la DAO, los datos de latitud, longitud, profundidad, magnitud y localidad; se obtuvieron de los catálogos de sismicidad del SSN.

LAS GOLONDRINAS



Figura A1: Mapa de ubicación de los puntos de vibración ambiental en la colonia Las Golondrinas, la estrella marca el punto donde se ubicaba la estación GOLO.

Cocientes Espectrales Col. Golondrinas

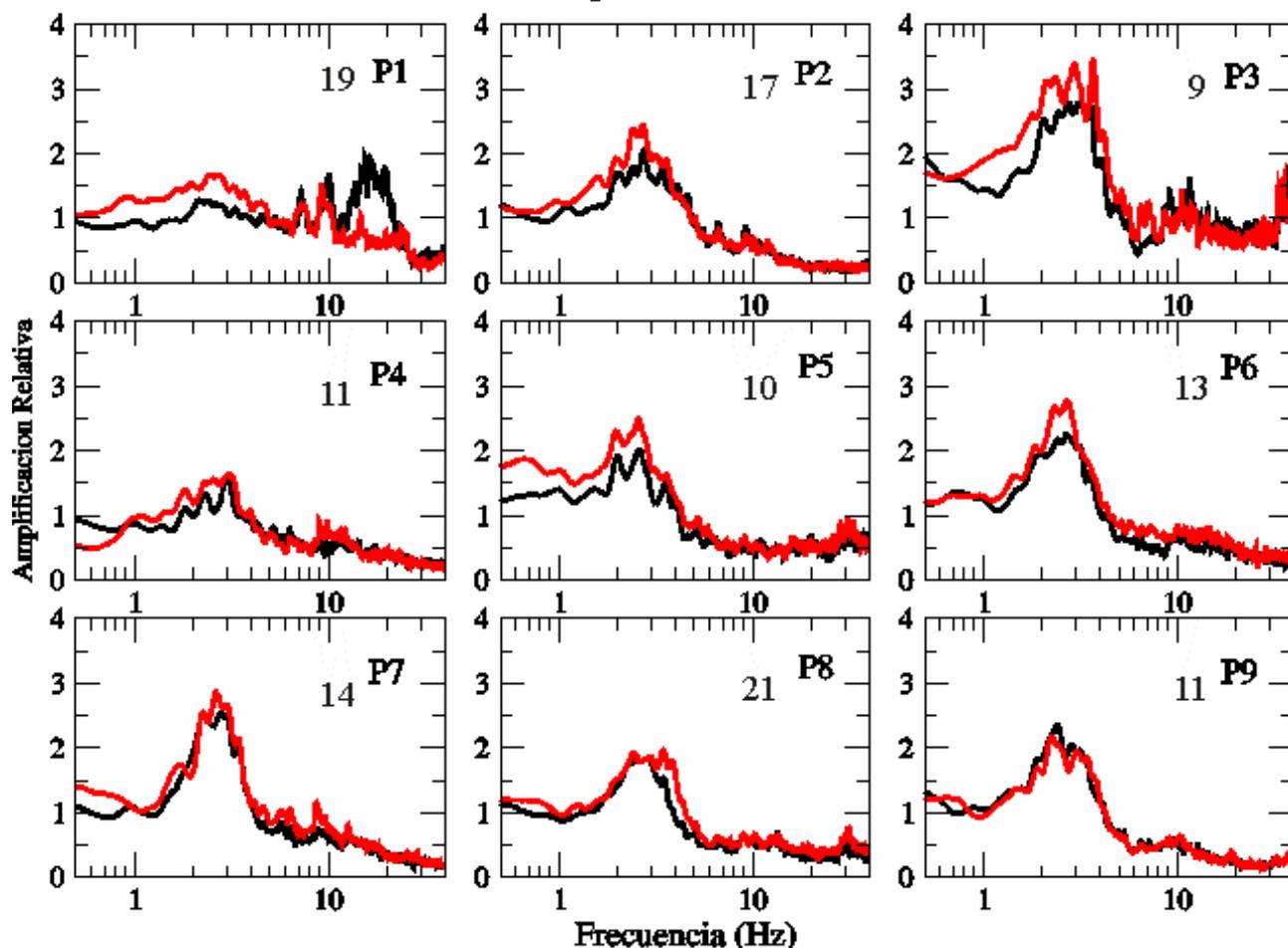


Figura A2 : Cocientes espectrales de los 9 puntos de medición de vibración ambiental en la colonia Las Golondrinas, los puntos a los cuales pertenecen las mediciones se pueden observar en la figura A1. En línea negra se muestra el cociente NS/Z y en línea roja el EW/Z.

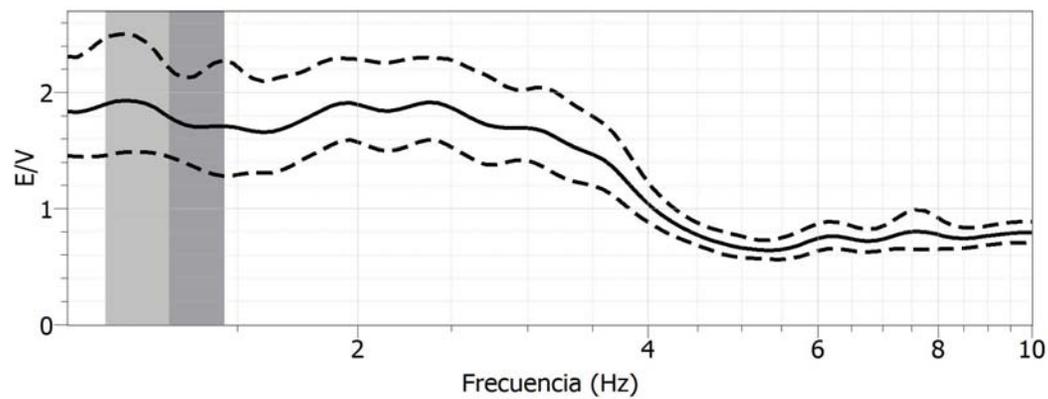
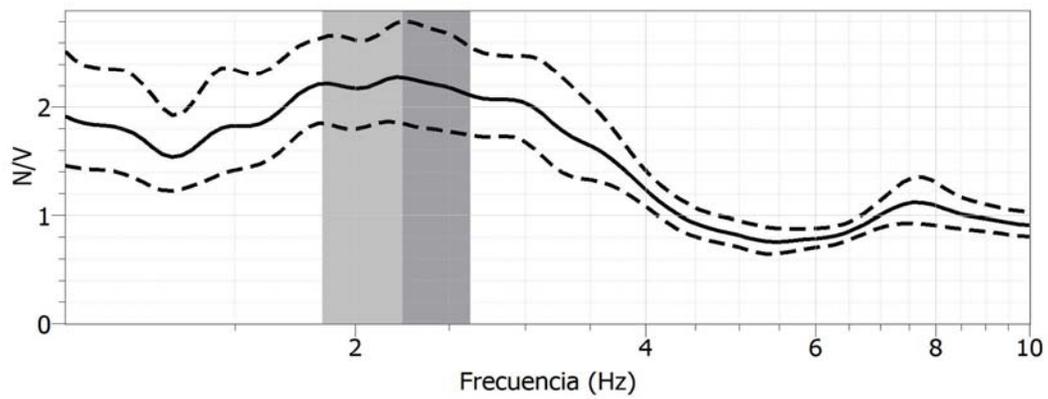
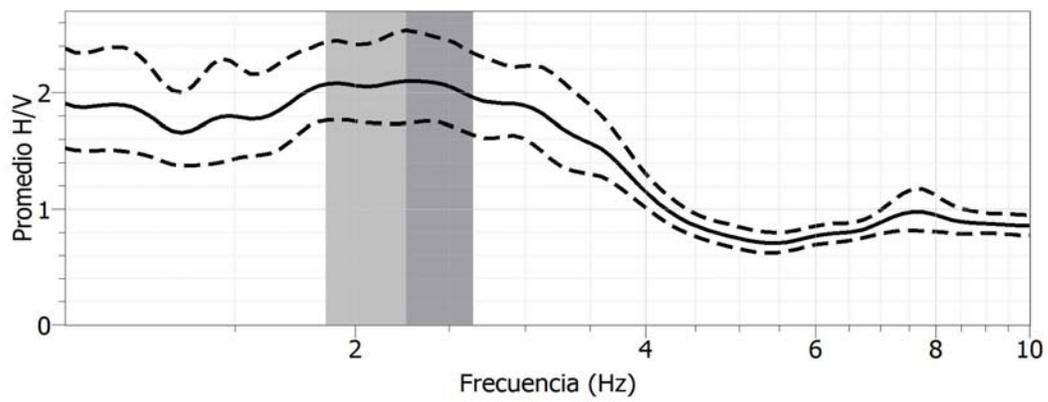


Figura A3.- Cocientes espectrales para la estación COCH.

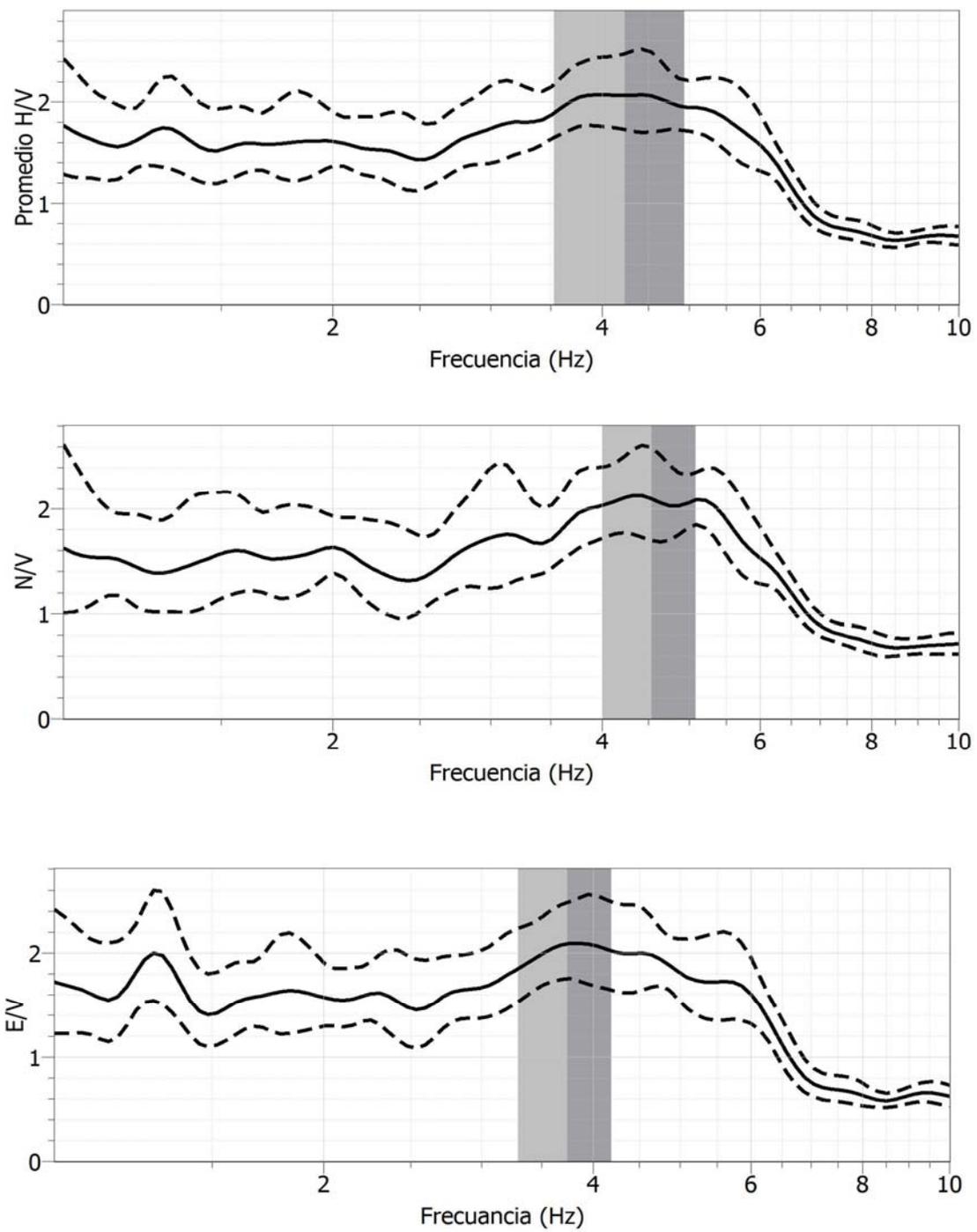


Figura A4.- Cocientes espectrales para la estación LUCI.

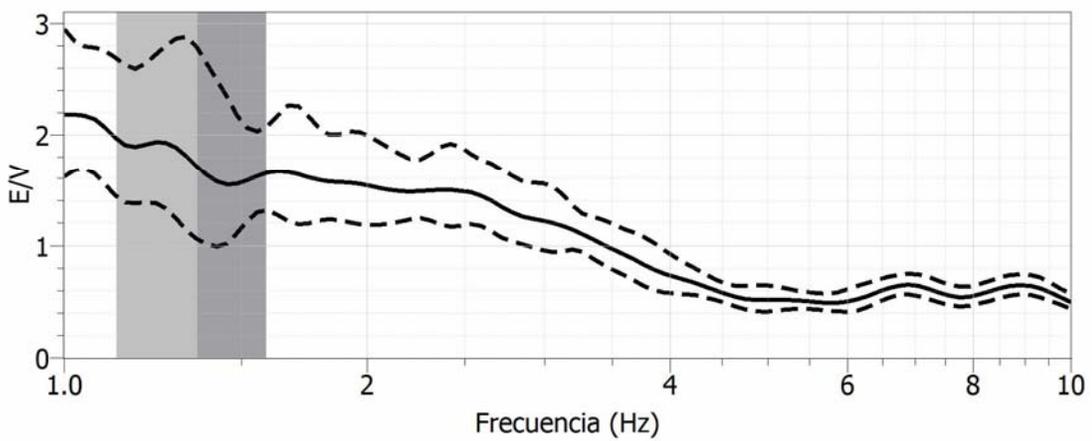
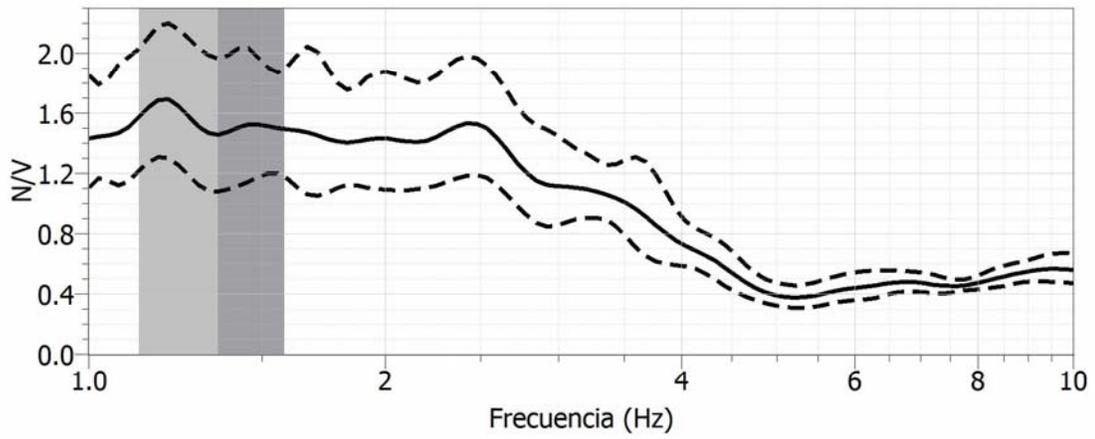
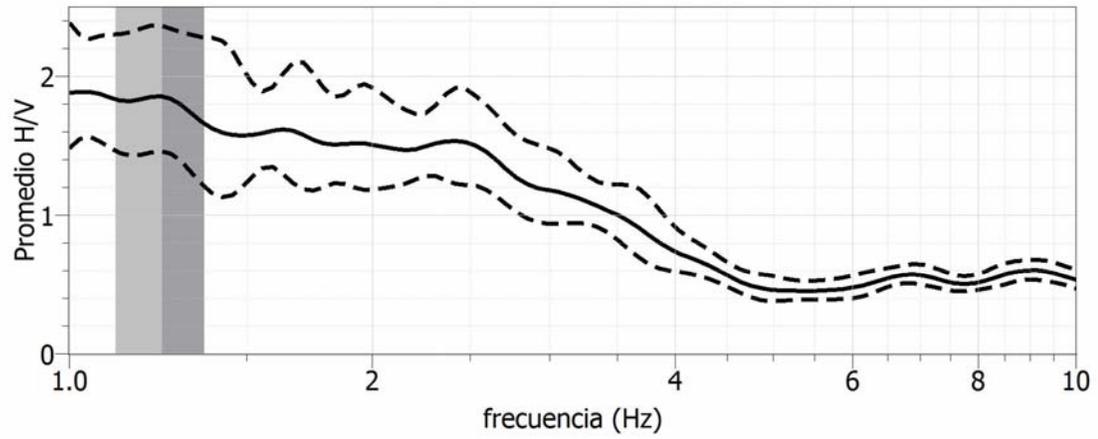


Figura A5.- Cocientes espectrales para la estación BIBLIO.

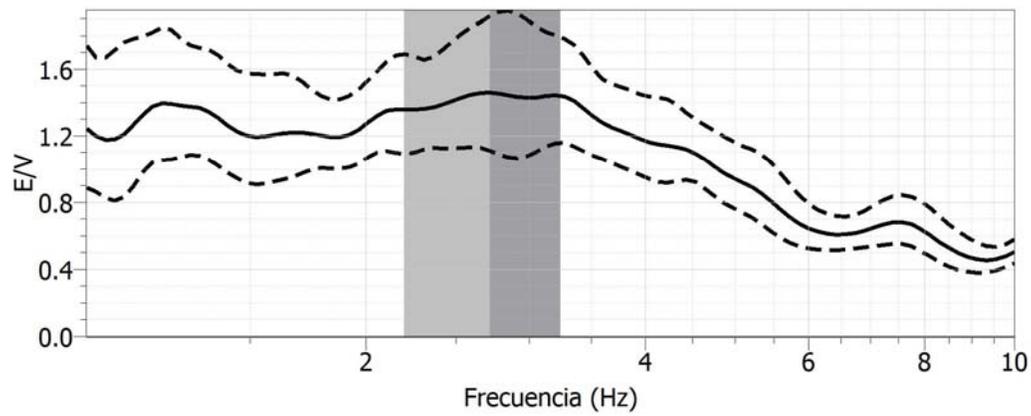
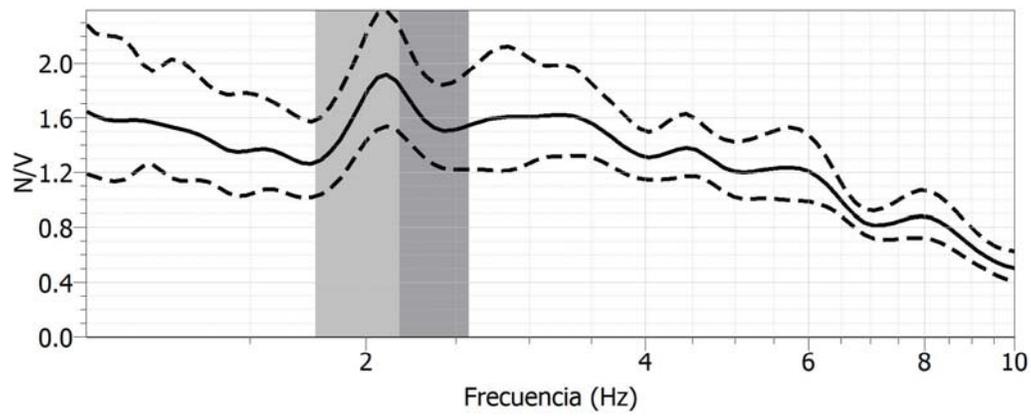
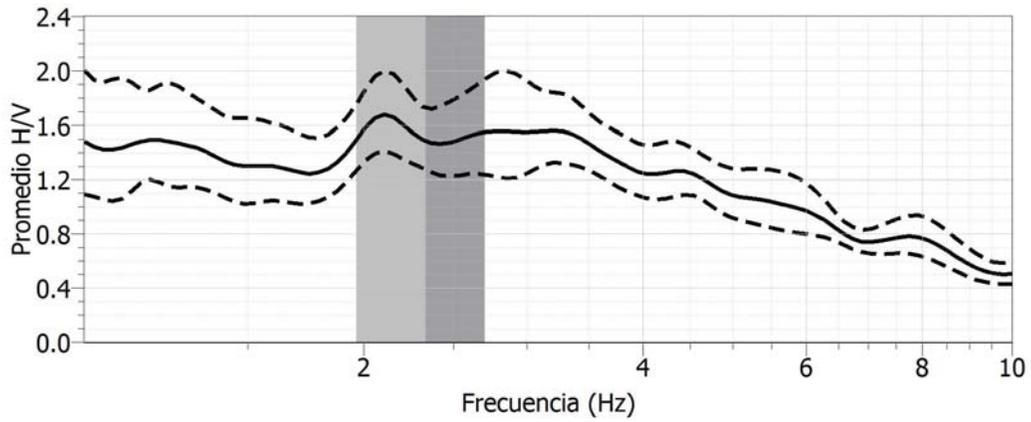


Figura A6.- Cocientes espectrales para la estación GIRA

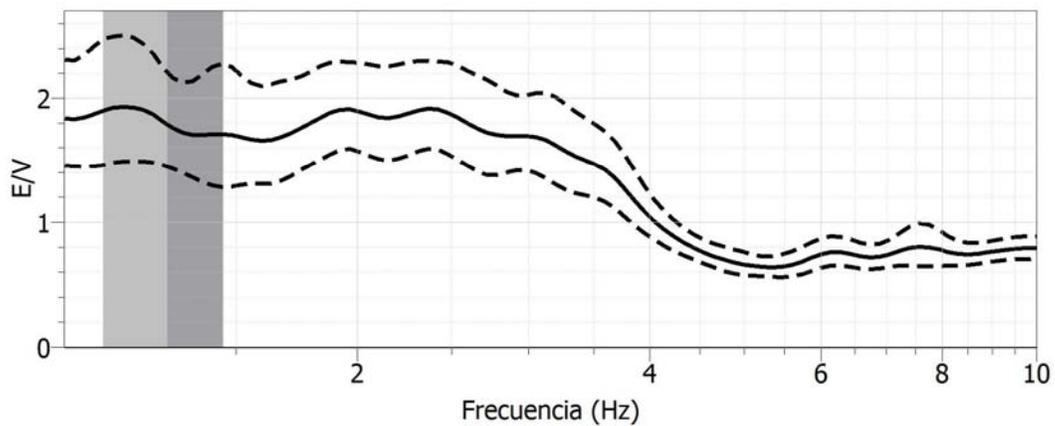
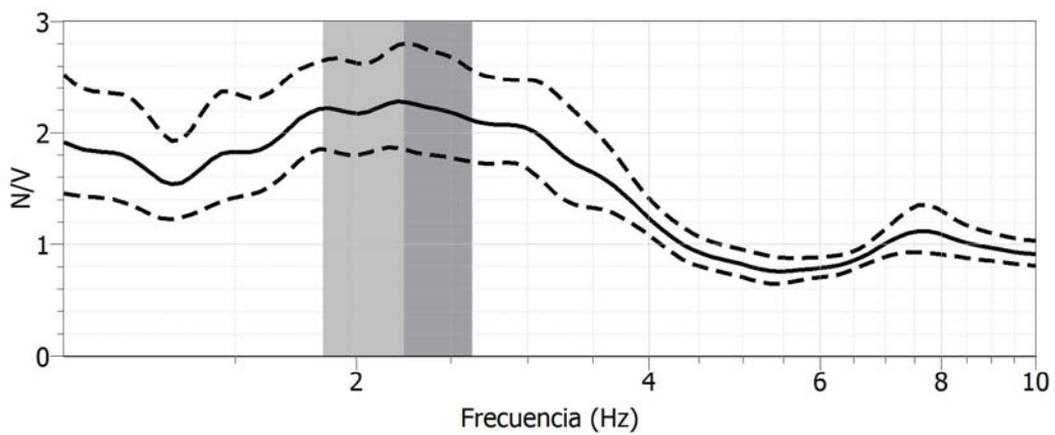
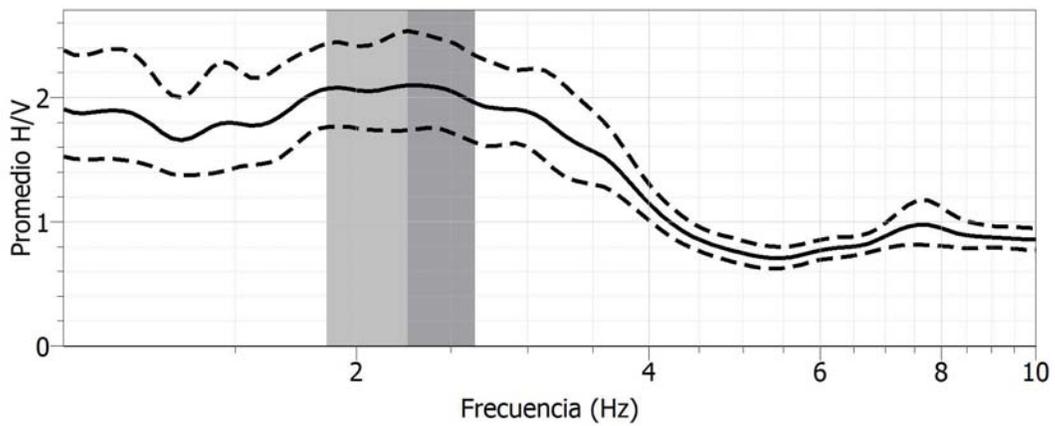


Figura A7.- Cocientes espectrales para la estación AOTY

Profundidad (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)
2	2.9	1.67
3	4.7	2.71
7	6.0	3.46
11	6.8	3.93
22	7.7	4.45
55	8.05	4.65
100	8.26	4.77
150	8.58	4.95

Tabla A3: Modelo de velocidades para el Valle de México. Tomada de (Huesca-Pérez, 2008).

Modelo	Estrato	Profundidad (Km)	Vel. Onda P (km/s)	Vel. Onda S (km/s)
Pozo Chapultepec	1	0.003 ~ 0.011	0.630	0.200
	2	0.011 ~ 0.018	0.920	0.500
	3	0.018 ~ 0.021	0.600	0.250
	4	0.021 ~ 0.035	0.850	0.420
	5	0.035 ~ 0.090	1.450	0.830
Pozo Roma	6	0.102 ~ 0.122	1.940	0.660
	7	0.122 ~ 0.130	1.750	0.430
	8	0.130 ~ 0.138	2.250	0.920
	9	0.138 ~ 0.160	1.760	0.500
	10	0.160 ~ 0.177	2.070	0.670
	11	0.177 ~ 0.200	2.5	1.120
Gutiérrez	12	0.5	2.6	1.2
	13	0.8	3.3	2.6
	14	1.9	4.5	2.8
Valdés	15	7	4.5	2.6
	16	12	5.4	3.2
	17	28	7.0	4.0
	18	--	8.3	4.8

Tabla A4: Modelo de Velocidades empleado para el análisis de los eventos locales, tabla tomada de (Cárdenas, 2007).

Escalas de Intensidad. En las tablas que se muestran a continuación, se indican los niveles de sacudimiento del terreno, es la unidad gal, el cual equivale a una aceleración de 1 cm/s^2 .

Escala JMA		Descripción	Máx. aceleración del terreno (gal)
0	No sentido	Registrado por sismógrafos pero no perceptible por humanos	Bajo 0.8
I	Ligero	Sentido por personas en reposo o personas especialmente sensitivas a terremotos	0.8-2.5
II	Débil	Sentido por la mayoría de las personas, ligero ruido de puertas y deslizamiento de puertas enrejadas, de paneles al estilo japonés (shoji)	2.5-8
III	Algo	Vibración de casas y edificios, fuertes ruidos de puertas y "shoji", balanceo de candelabros (araftas) y otros objetos colgantes, movimiento de líquidos.	8.0-25
IV	Fuerte	Movimientos fuertes de casas y edificios, volcadura de objetos inestables, derramamiento de líquidos de las vasijas llenas hasta los 4/5.	25-80
V	Muy fuerte	Fisuras en los morteros de las paredes, volcaduras de lápidas y linternas de piedra, daños en chimeneas de mampostería y almacenes revestidos con barro.	80-250
VI	Desastroso	Demolición de un 30% de casas de madera japonesas, numerosos deslizamientos de tierra y fallas de terraplenes, fisuras en terrenos planos.	250-400
VII	Ruinoso	Demolición de más del 30% de casas de madera japonesas.	Sobre 400

Tabla A5: Escala de intensidades de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) Tomada de (Ishiyama, 1989).

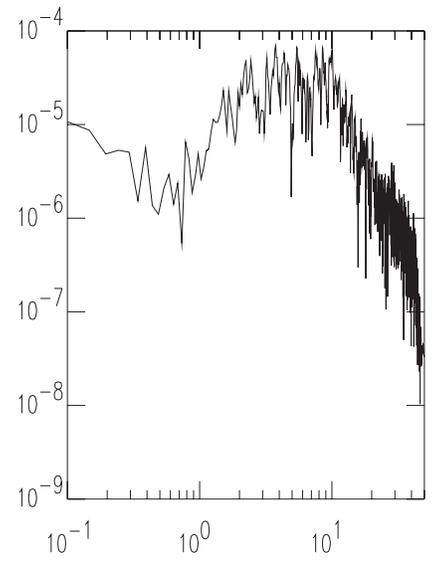
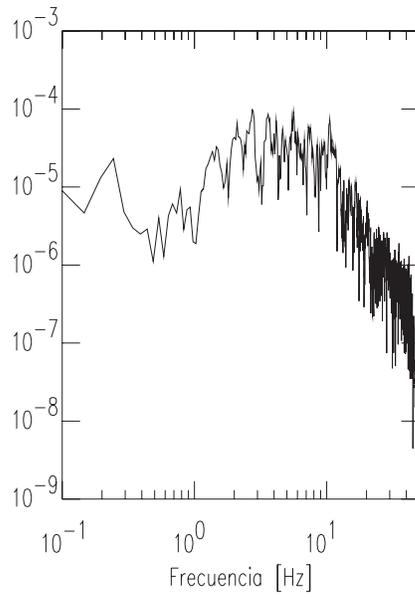
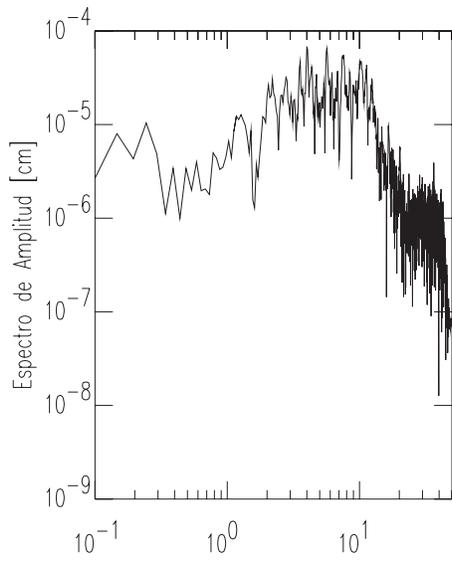
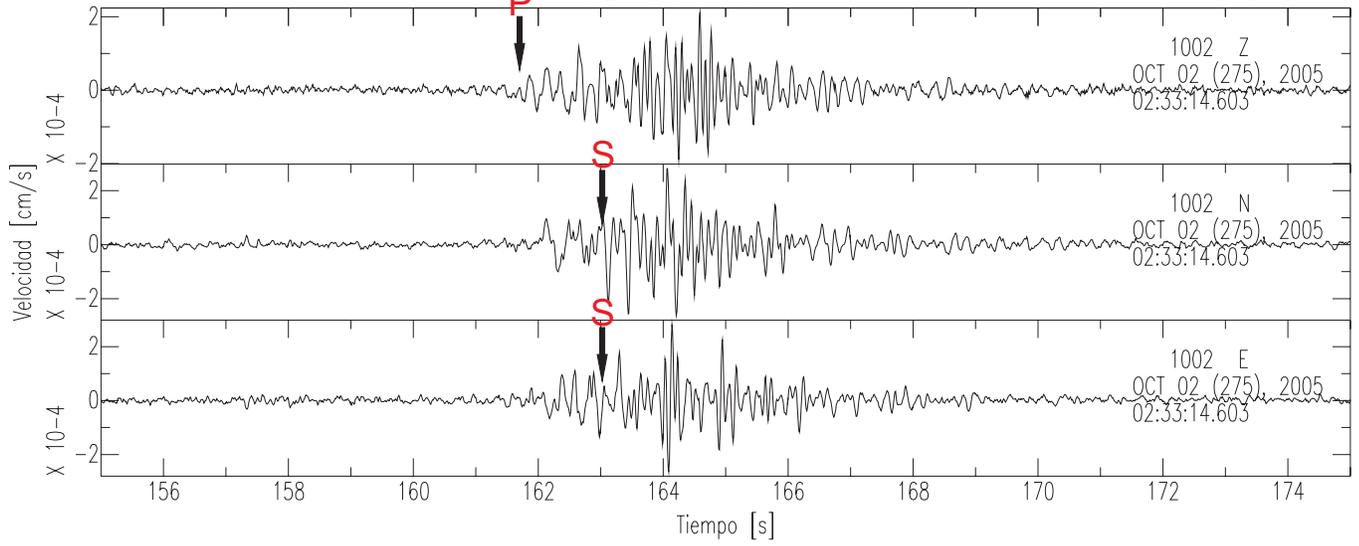
Escala MM	Descripción	Max. Aceleración del terreno (gal)
I	No sentida, excepto por unos pocos en condiciones especialmente favorables.	Bajo 1
II	Sentido solo por personas en reposo en lugares tales como los pisos superiores de edificios. Balanceo de objetos delicadamente suspendidos.	1-2
III	Sentido por muchas personas en lugares tales como los pisos superiores de edificios, pero de un grado tal que muchas personas no lo reconocen como un sismo. Automóviles estacionados pueden mecerse ligeramente como si fuera causado por vibraciones de un camión que pasa. La duración puede ser medida.	2-5
IV	En el día, sentido por muchos en interiores, pero por pocos en el exterior. Vibración de vasijas, ventanas, puertas y crujido de paredes. Sensación como si un pesado camión golpease al edificio. Automóviles estacionados se mecen considerablemente.	5-10
V	Sentido por todos, muchos son despertados, algunas vasijas y vidrios de ventanas se rompen, el mortero de la pared se puede romper, volcadura de objetos inestables. A veces se notan vibración de postes del teléfono, árboles y otros objetos altos, relojes de péndulo paran.	10-21
VI	La gente se asusta y corren al exterior. Pesados muebles pueden moverse, en algunos lugares cae el mortero, caída de chimeneas, daños ligeros.	21-44
VII	Todos corren fuera de la casa. Daños insignificantes en edificios de buena construcción y diseño, ligeros a moderados en estructuras comunes, y considerables en edificaciones malas o mal diseñadas estructuralmente, rotura de chimeneas, sentido en autos en movimiento.	44-94
VIII	Algunos danos en edificios de buena construcción y diseño, considerables daños en construcciones comunes con algunos colapsos, grandes daños en edificaciones pobremente construidas. Muros de diafragma son sacados fuera de la estructura aporticada, caída de chimeneas de fábricas y casas, columnas, monumentos y paredes. Volcadura de muebles pesados. Arena y lodo es lanzado en pequeñas cantidades. Cambios de pozos de agua. Molestias en el manejo de automóviles.	94-202

IX	Considerables daños en edificios de buen diseño y construcción. Estructuras son sacadas de su alineamiento con las cimentaciones, rajaduras visibles en el suelo. Daños en tuberías enterradas.	202-432
X	Casas de madera de buen diseño y construcción colapsan. Muchas de las estructuras de albañilería y aporticadas son destruidas con cimentaciones. Fisuras en el suelo originan danos, durmientes de rieles, pendientes y terraplenes se deslizan. Elevación del nivel de agua.	Sobre 432
XI	Casi todas las estructuras de albañilería colapsan. Puentes destruidos. Fisuras sobre todo la superficie del suelo. Tuberías bajo el terreno son completamente puestas fuera de servicio. Asentamiento de tierras y deslizamiento de suelos blandos. Prominentes de durmientes de rieles.	Sobre 432
XII	Total daño. Las ondas son transmitidas a la superficie del terreno. Cambios en la topografía. Objetos vuelan por el aire.	Sobre 432

Tabla A6: Escala de intensidades Modificada de Mercalli (MM) Tomada de (Ishiyama, 1989).

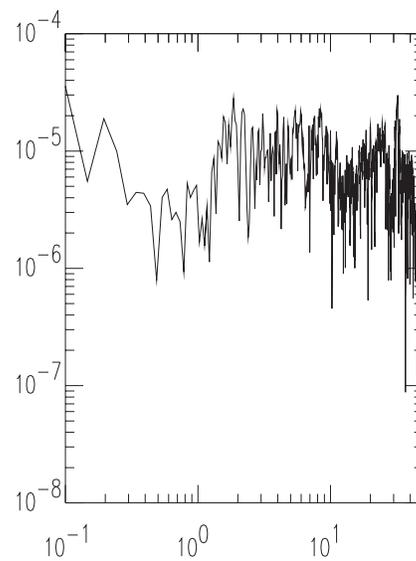
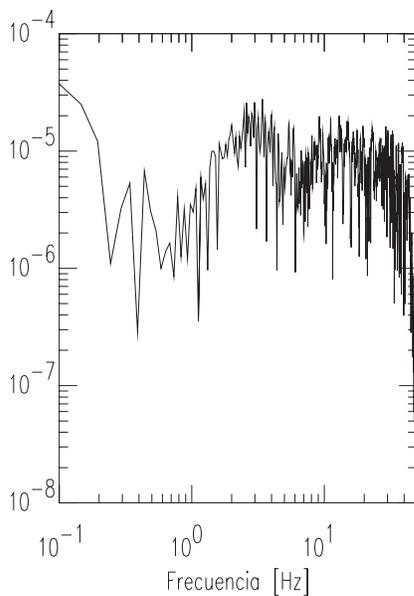
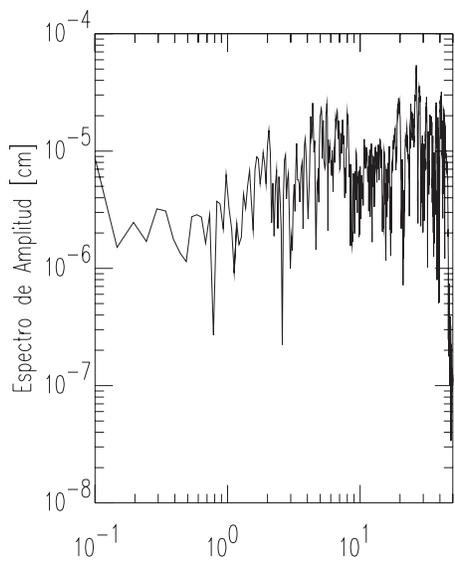
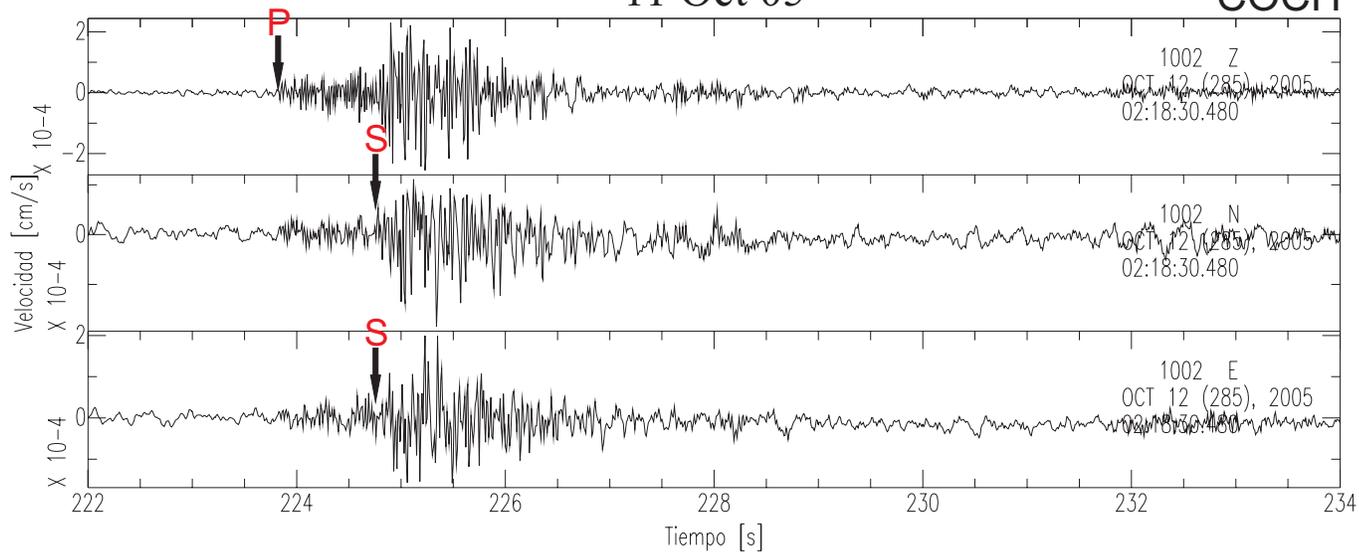
Evento 2 01 Oct 05

COCH



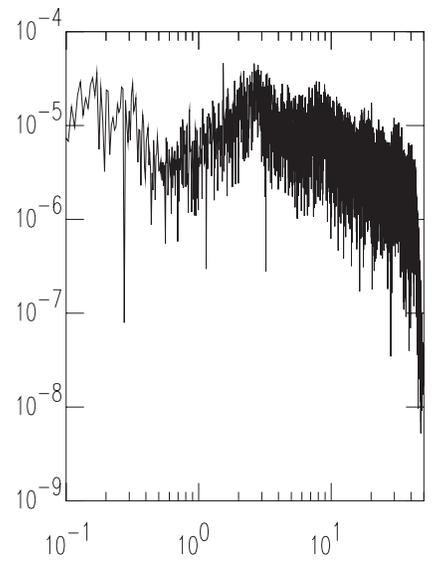
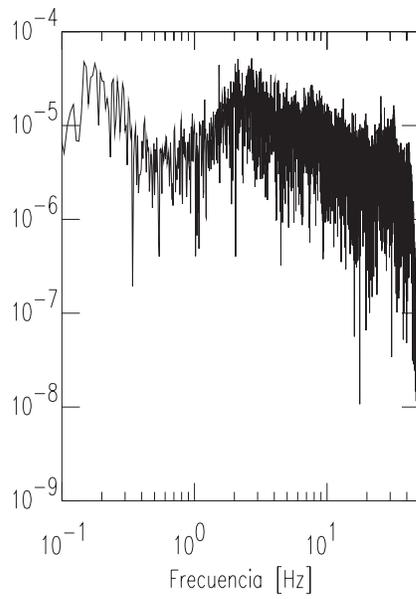
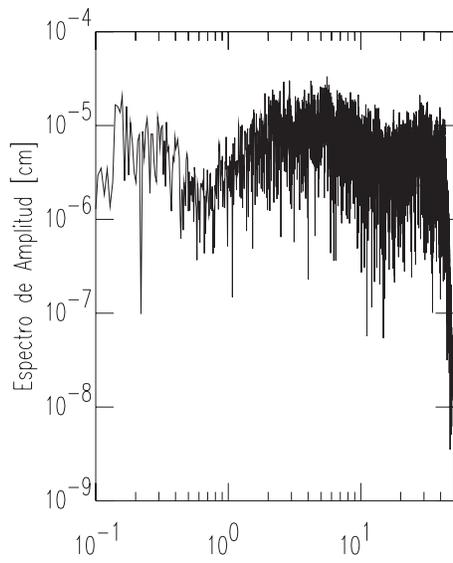
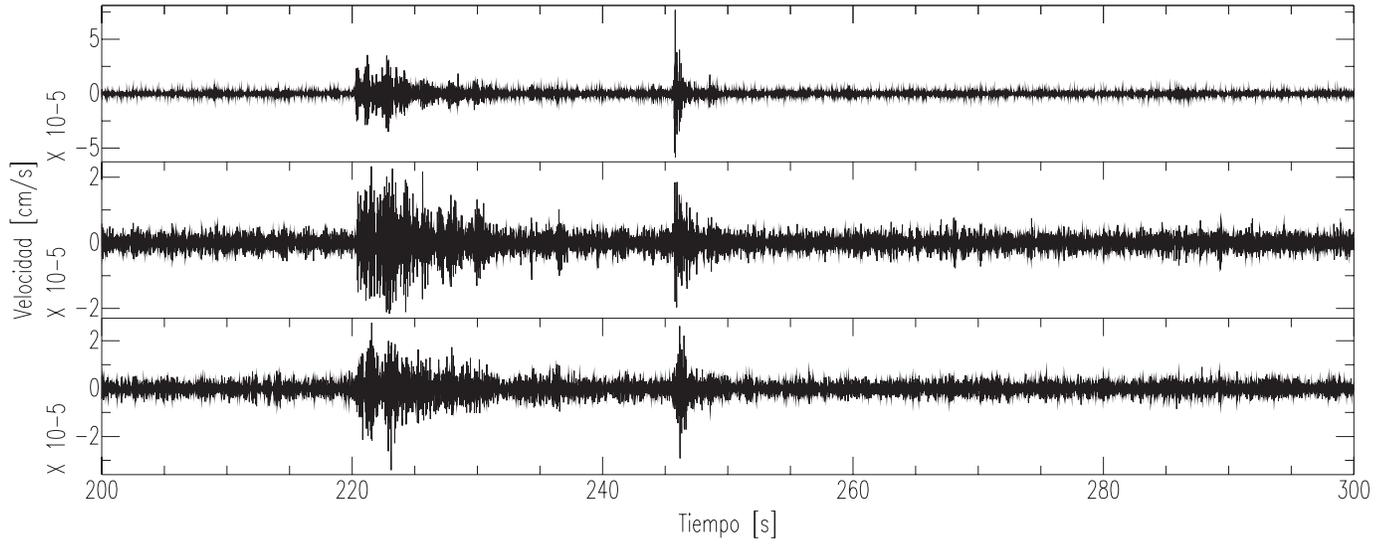
Evento 6 11 Oct 05

COCH



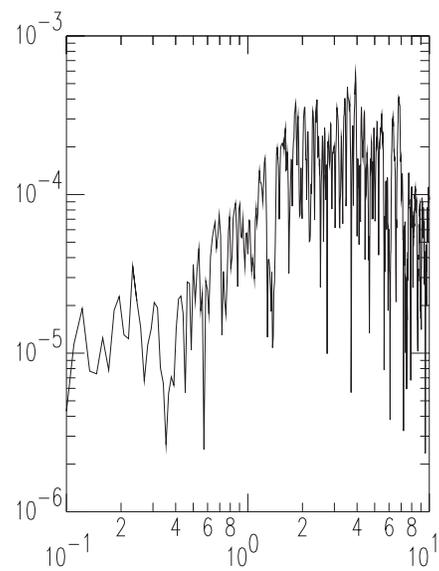
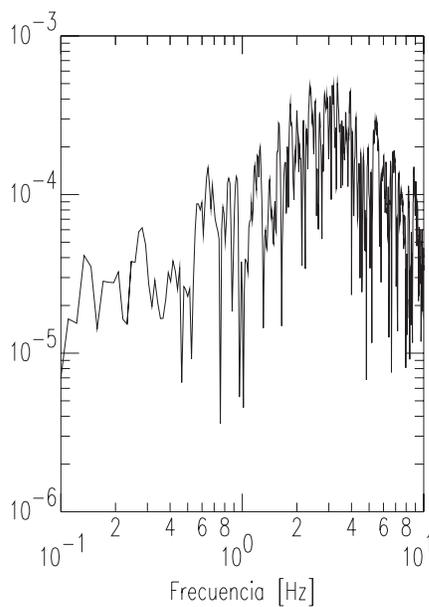
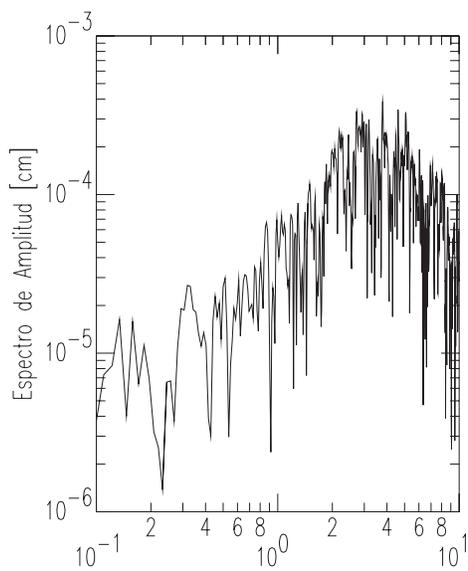
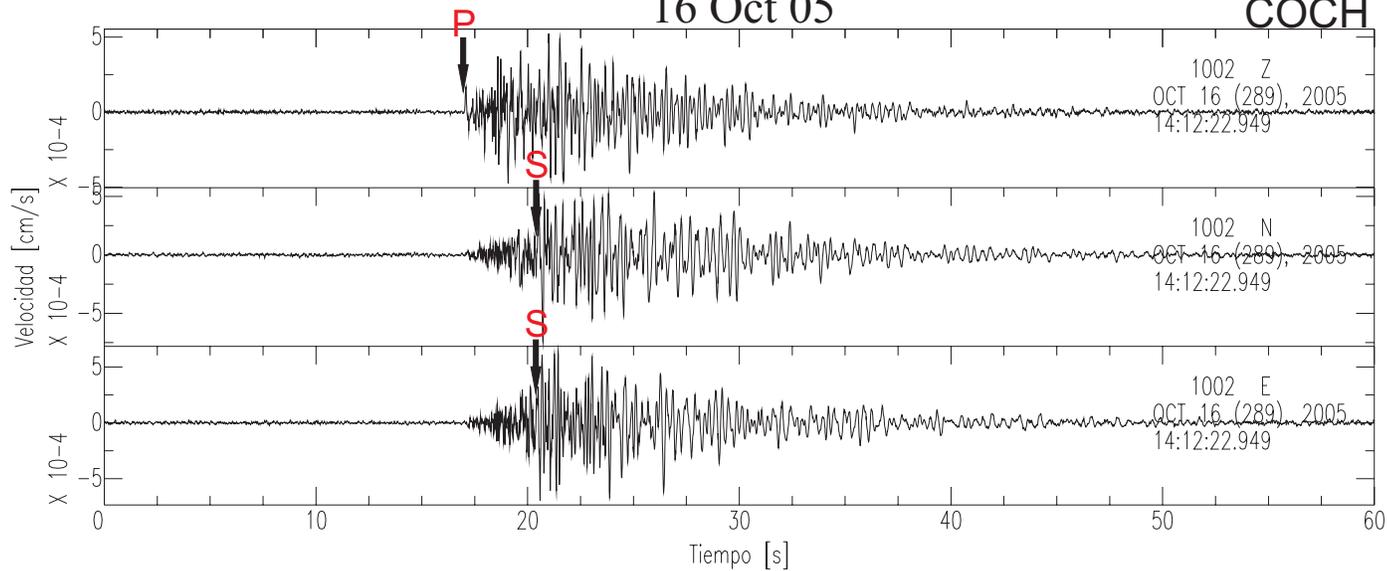
Evento 7 11 Oct 05

COCH



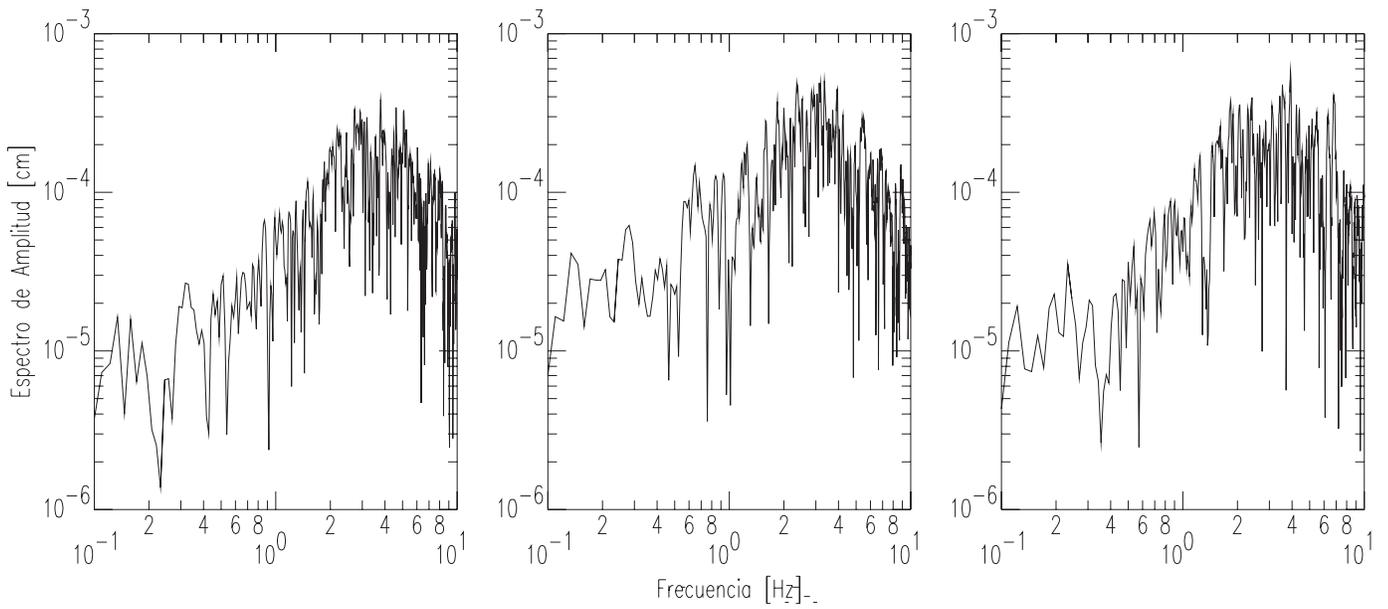
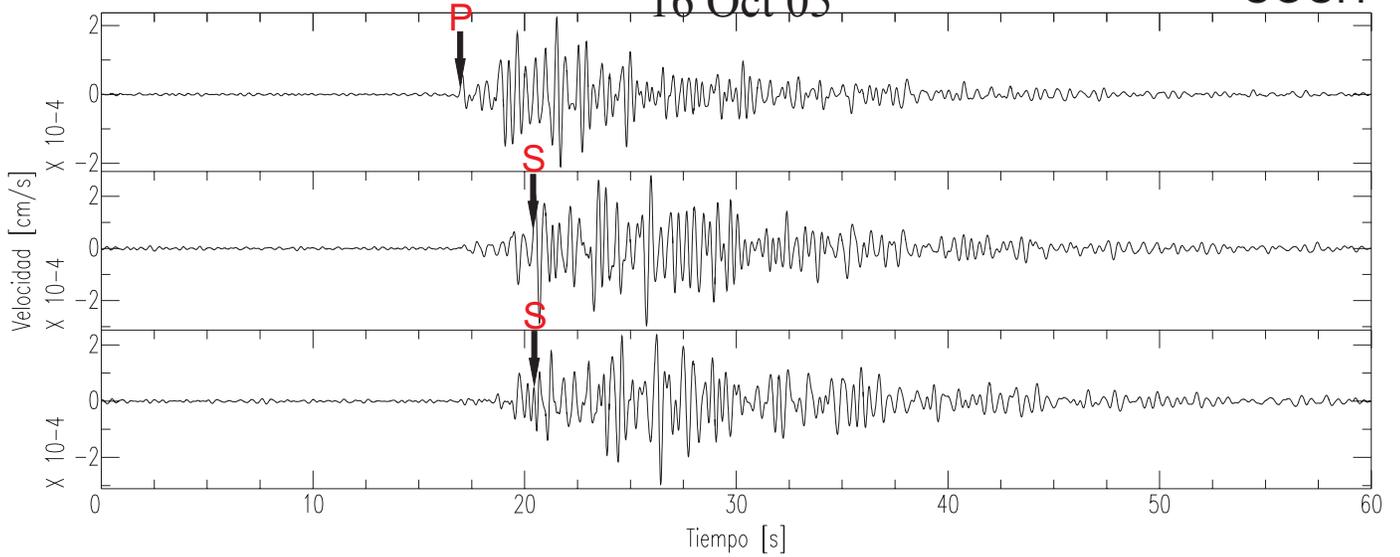
Evento 8 16 Oct 05

COCH



Evento 8 16 Oct 05

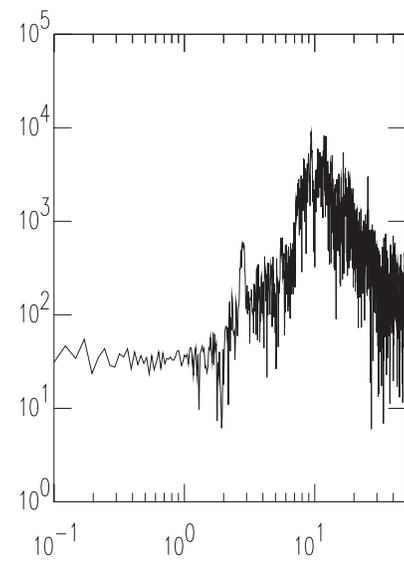
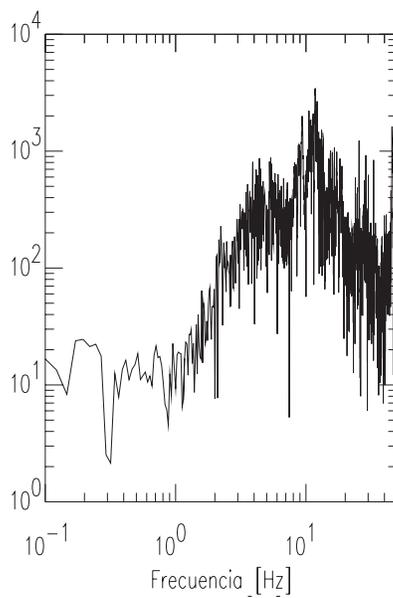
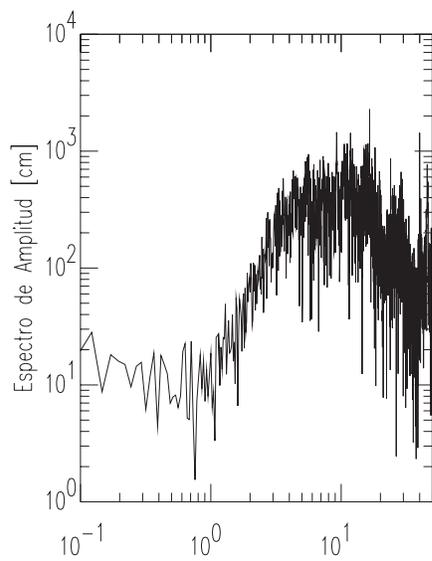
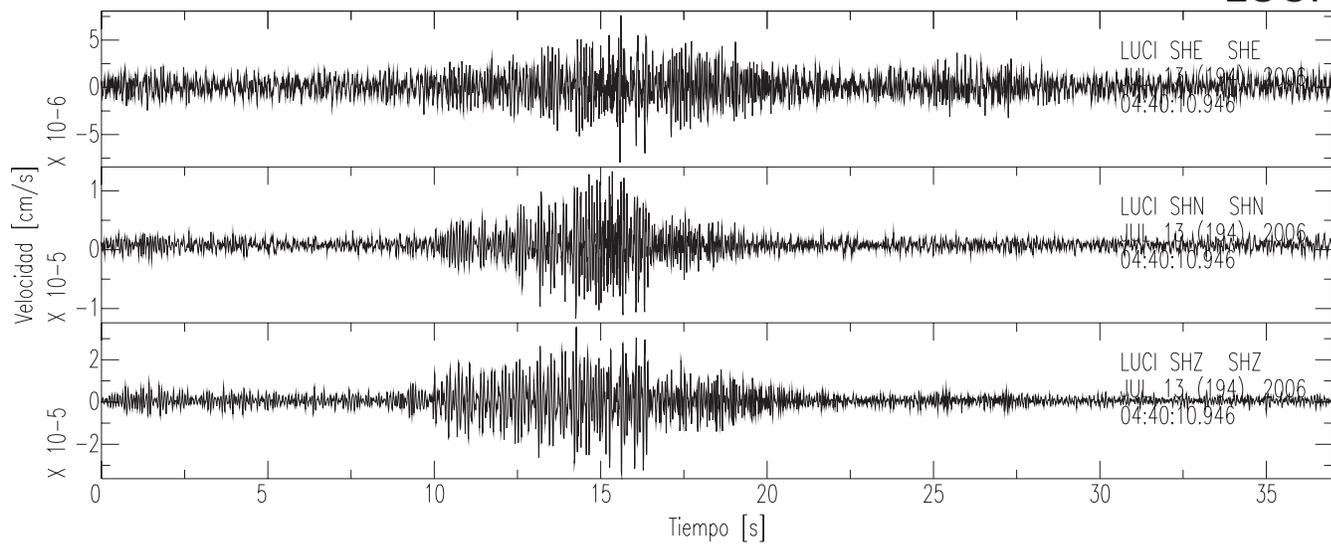
COCH



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 0.5 y 3.0 Hz.

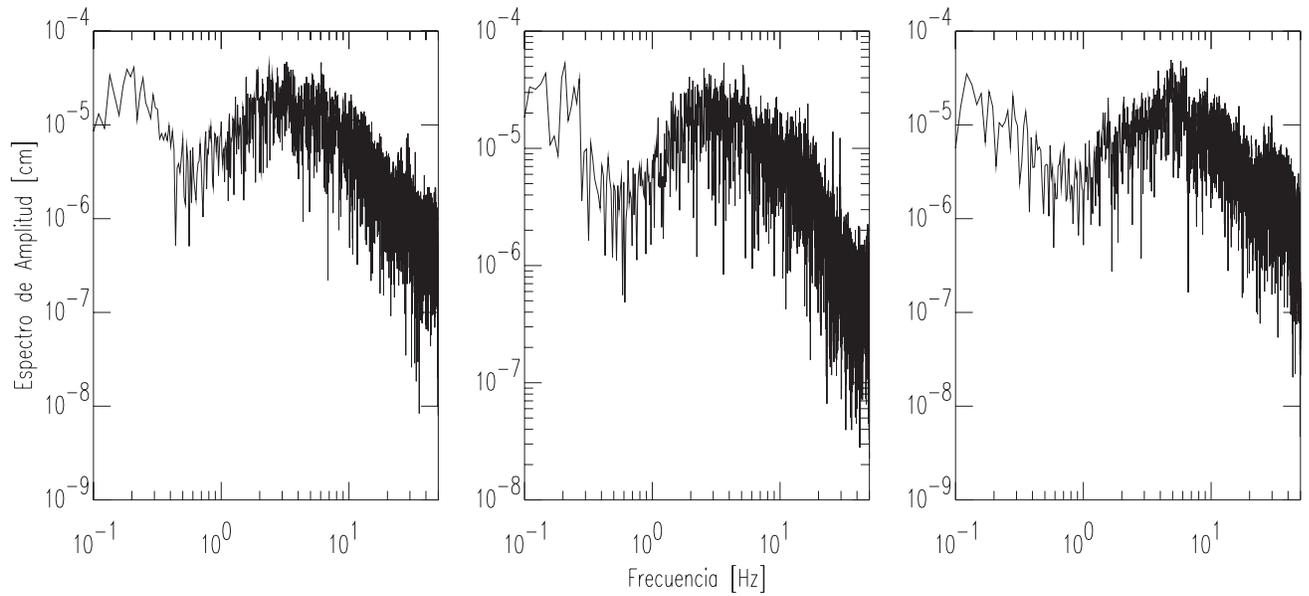
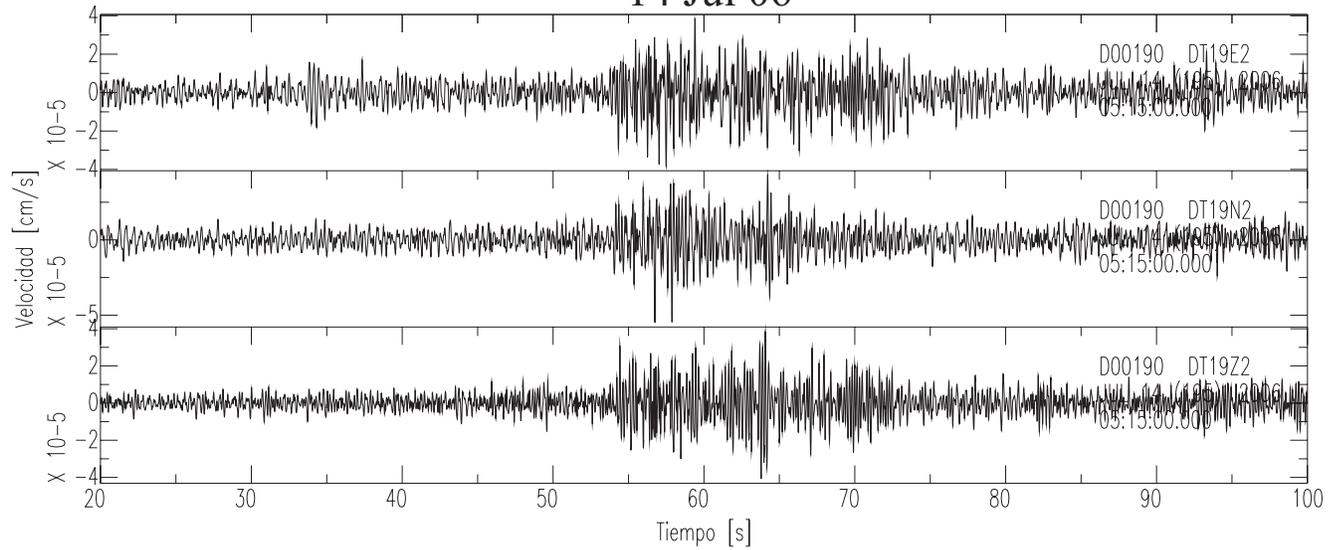
Evento 17 12 Jul 06

LUCI



Evento 18 14 Jul 06

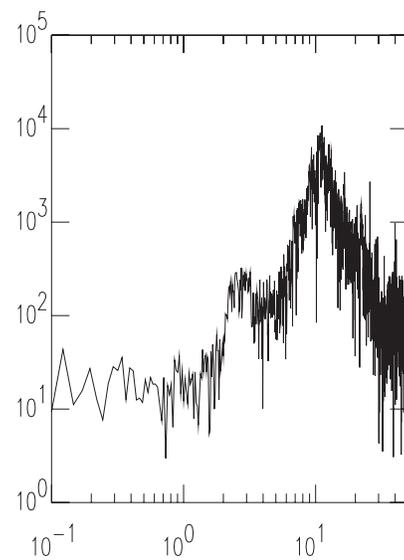
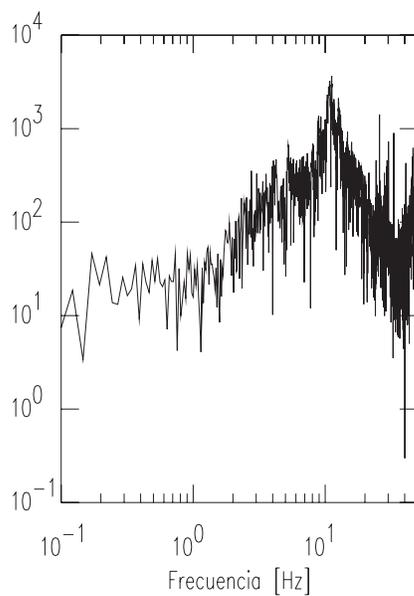
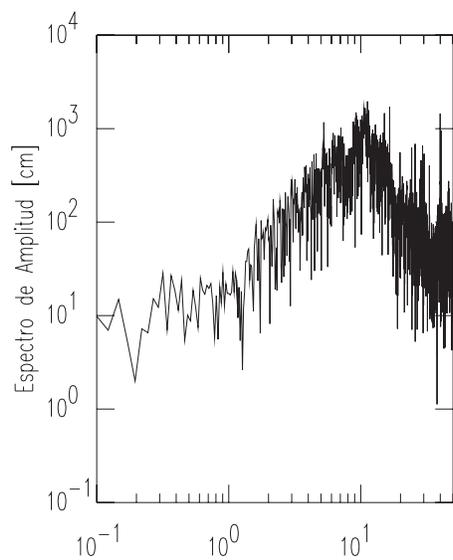
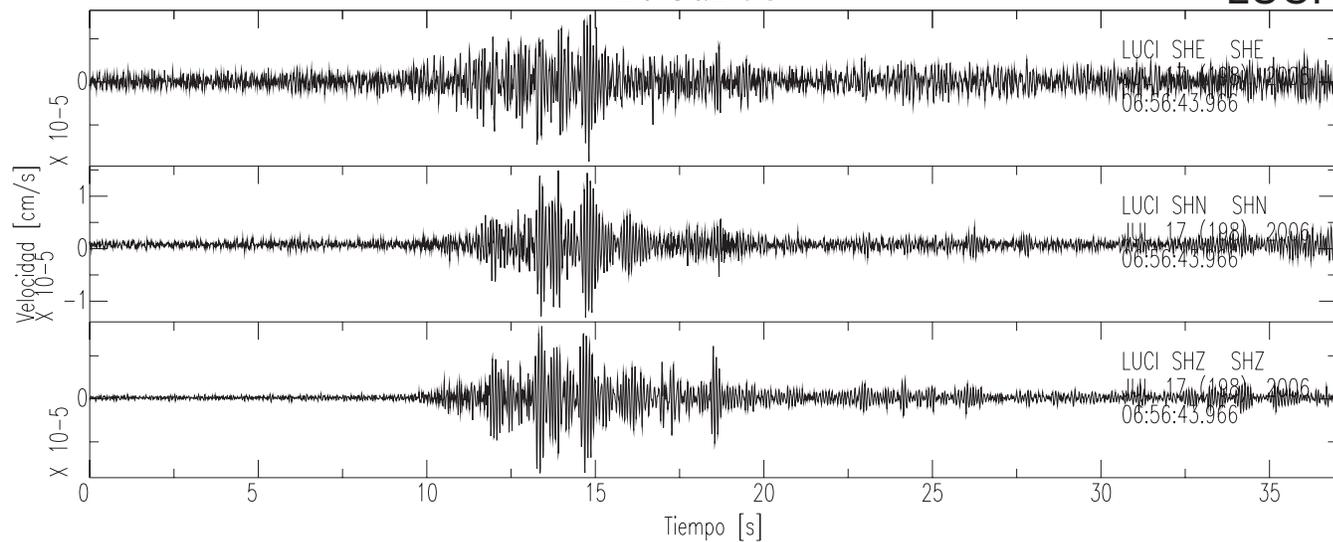
COCH

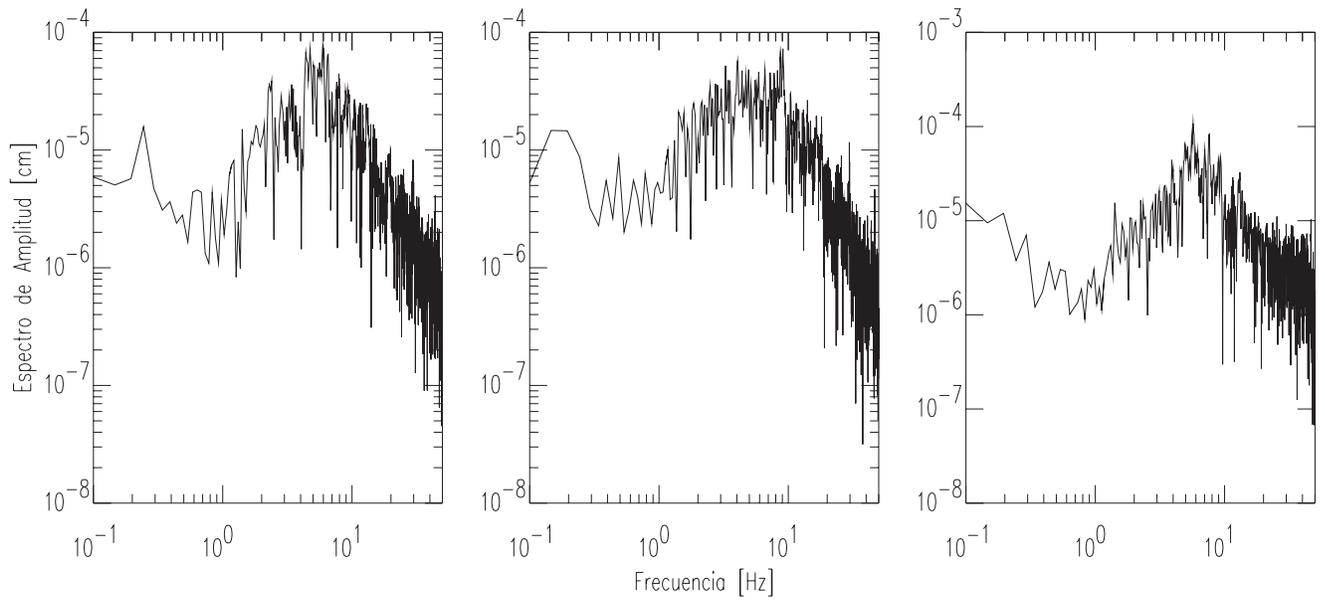
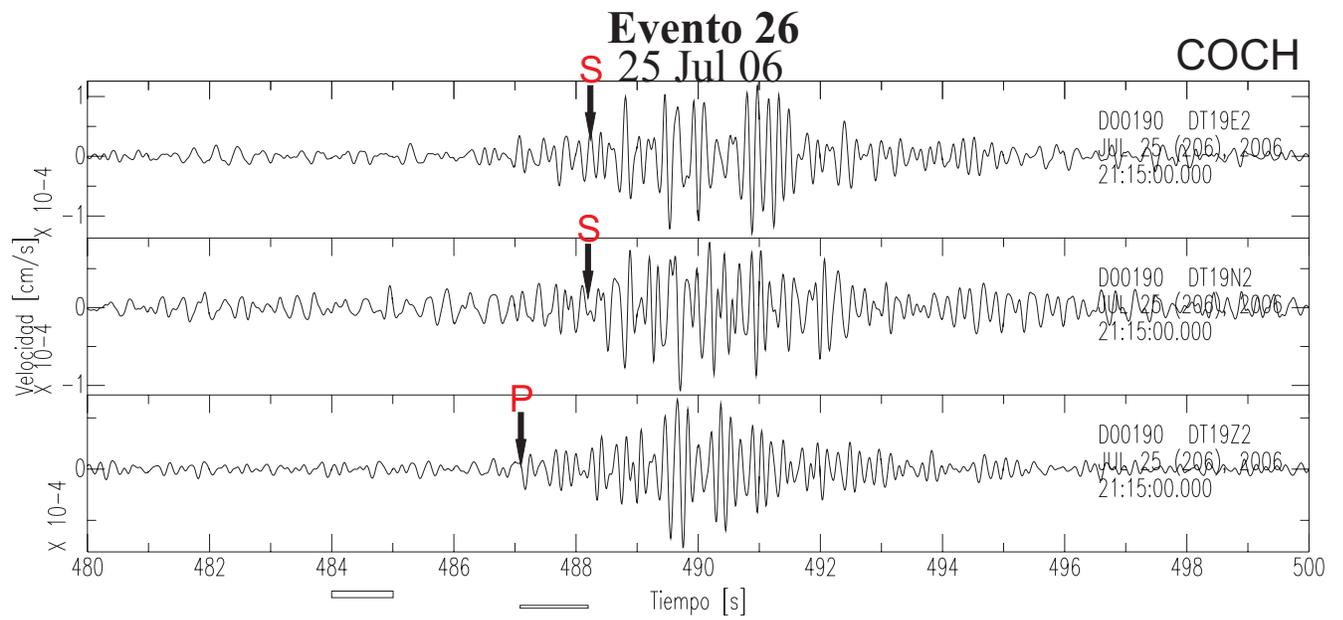


Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 10 Hz.

Evento 20 17 Jul 06

LUCI

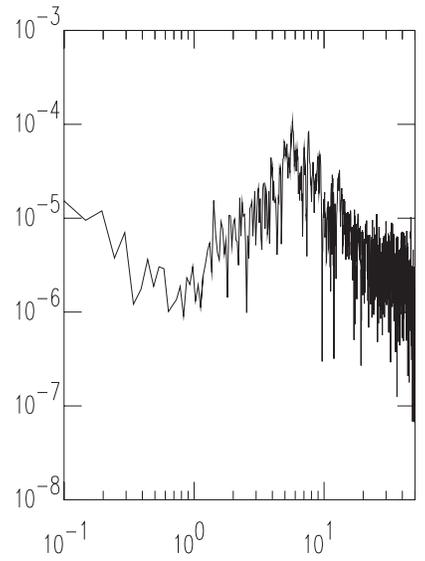
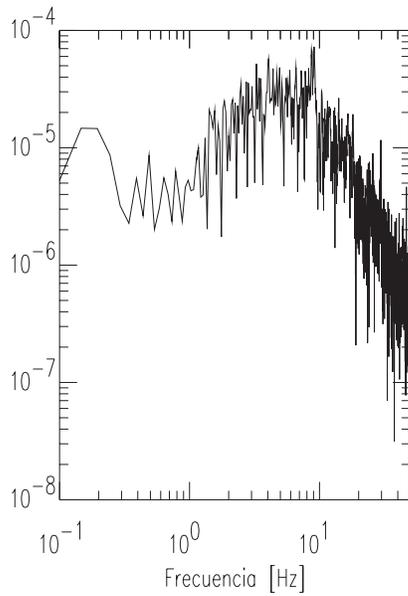
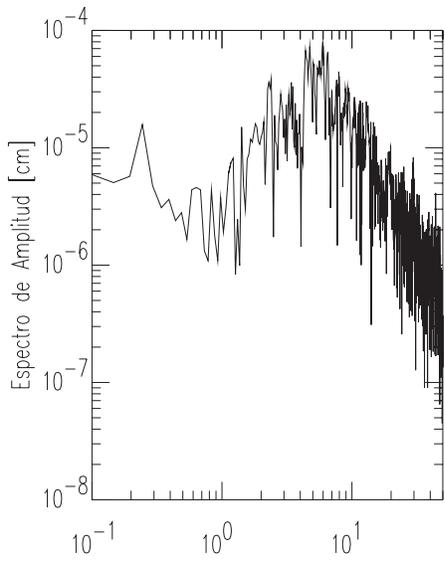
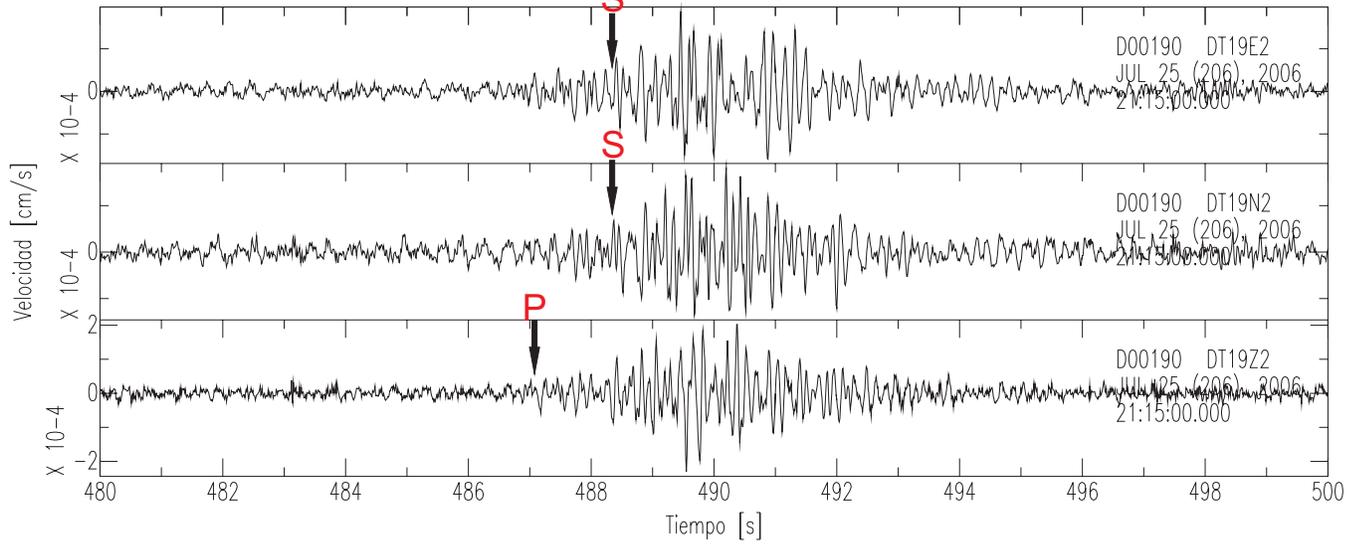




Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 2.0 y 8.0 Hz.

Evento 26 25 Jul 06

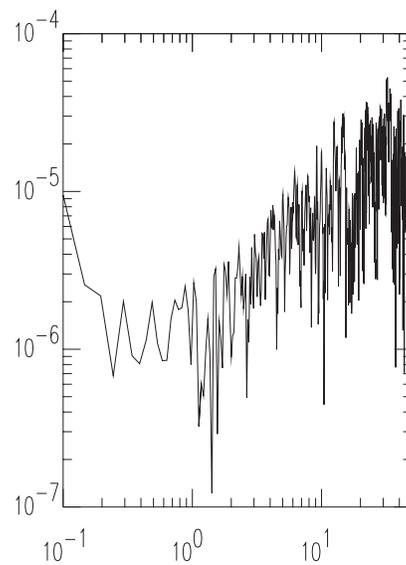
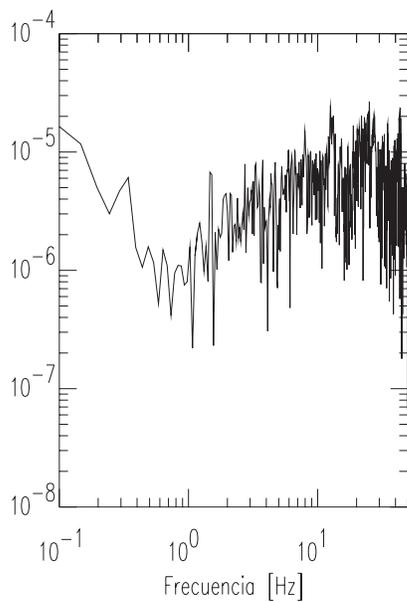
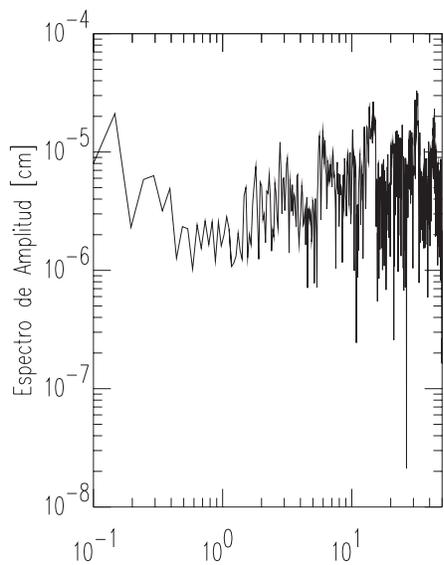
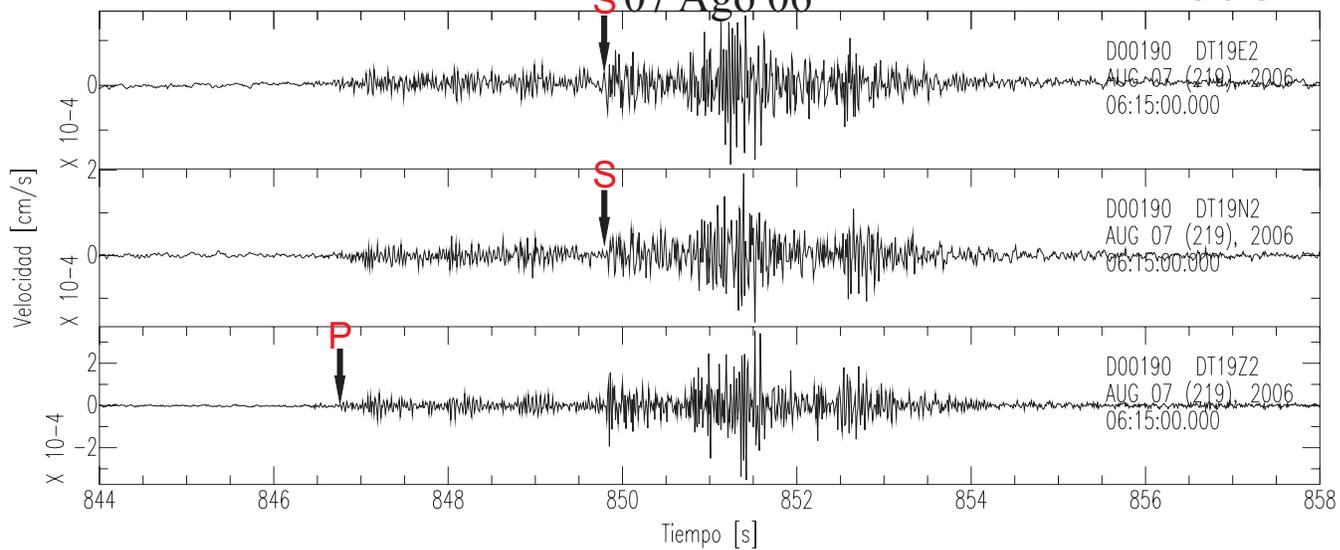
COCH



Evento 31

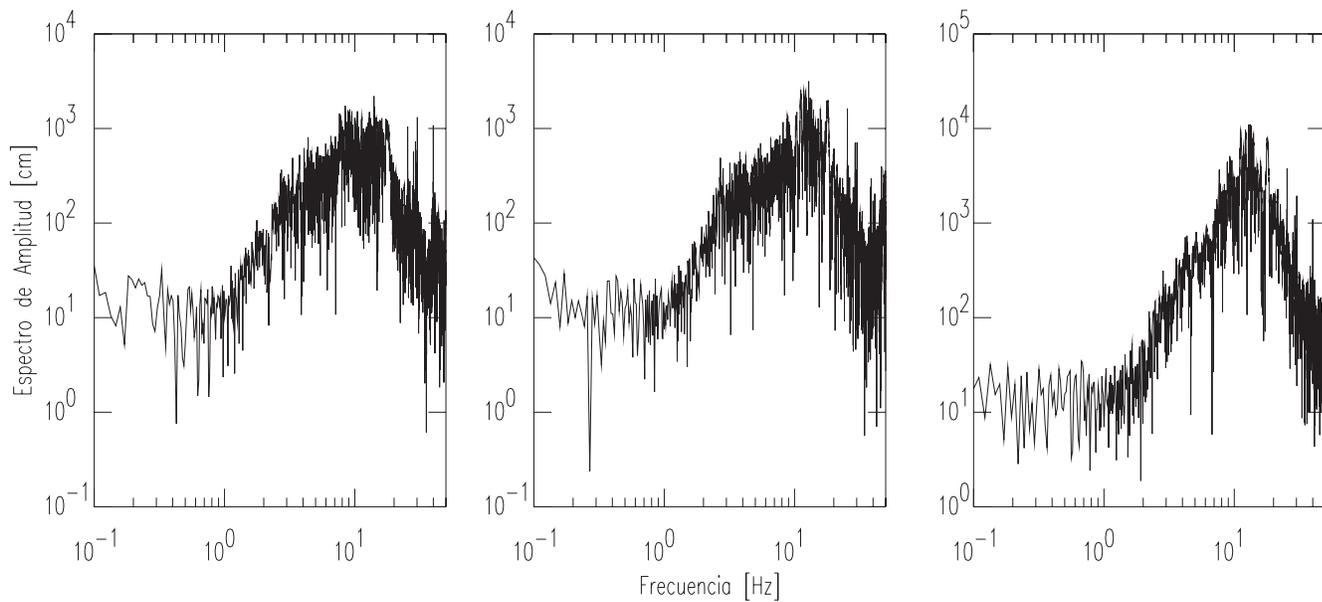
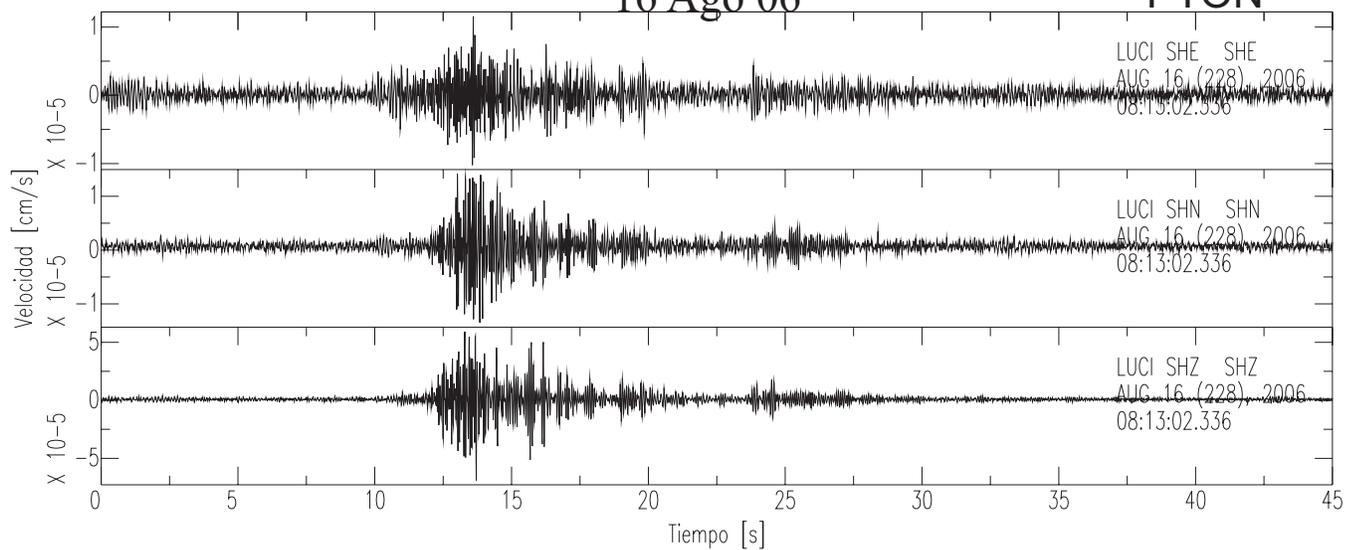
07 Ago 06

COCH



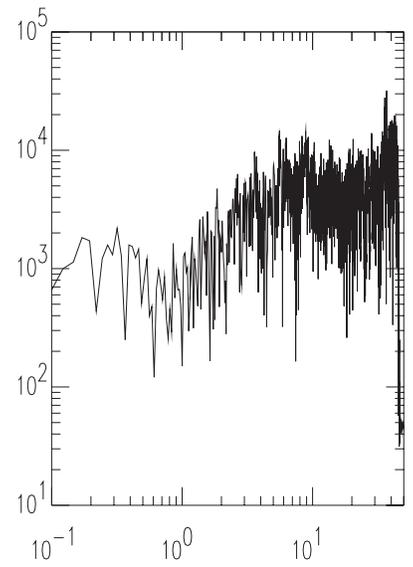
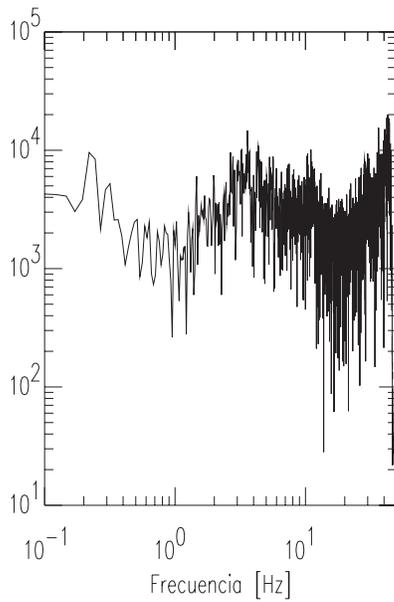
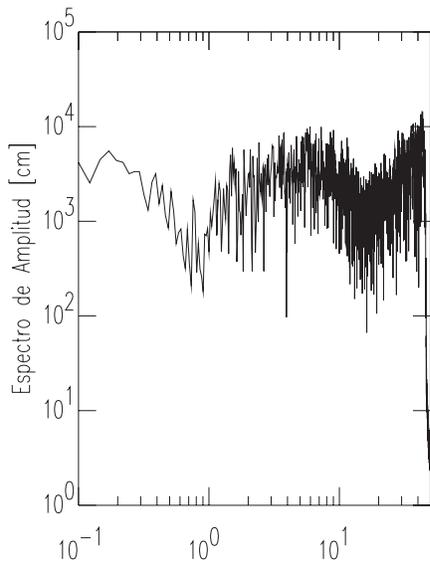
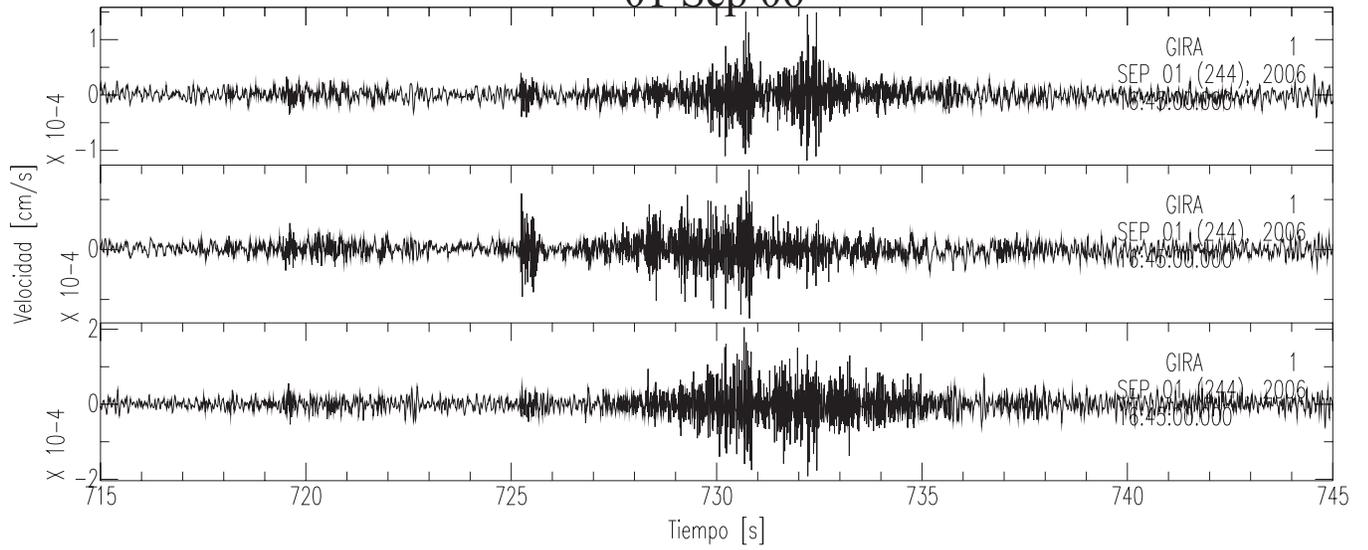
Evento 37 16 Ago 06

PTON



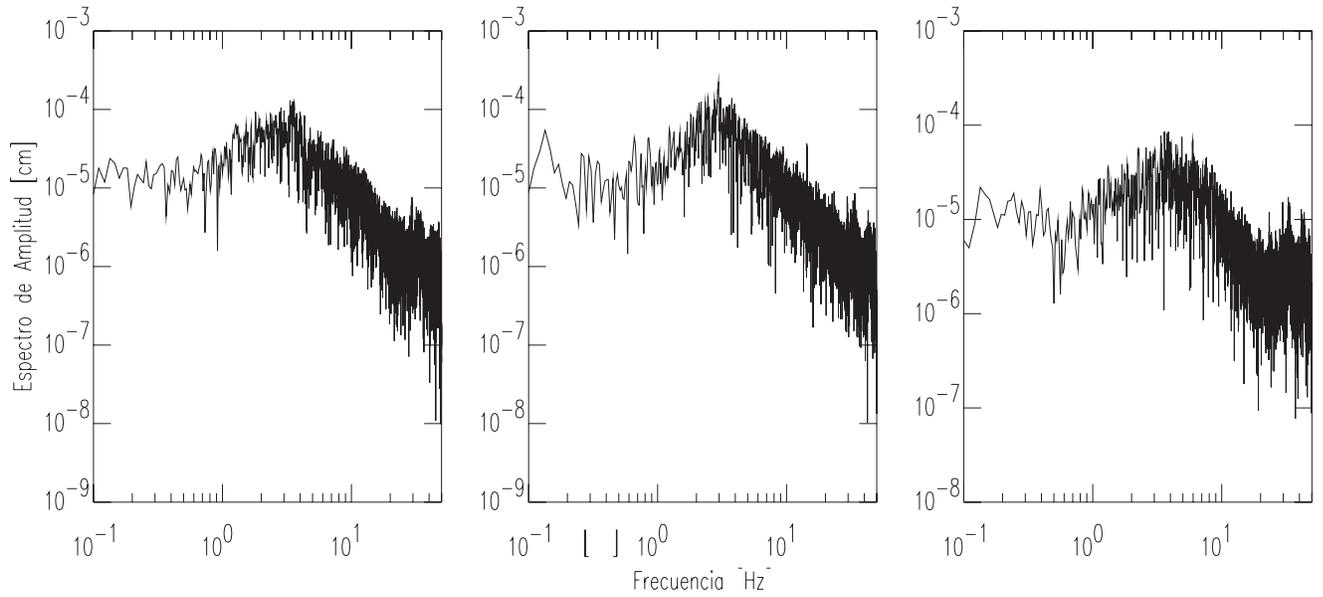
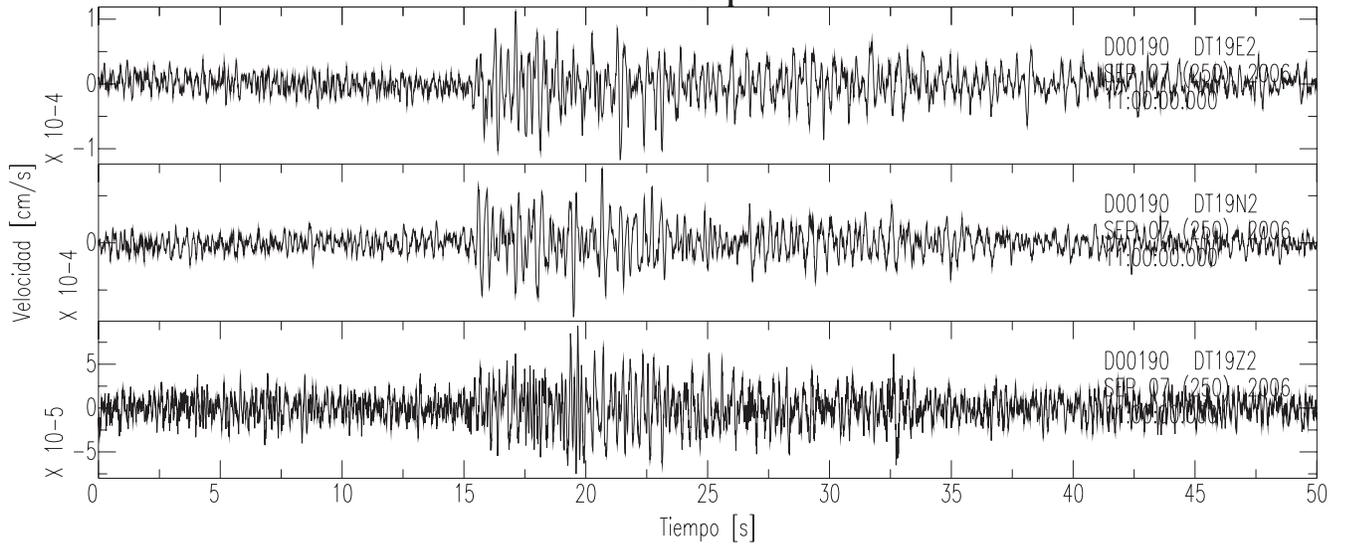
Evento 43 01 Sep 06

GIRA



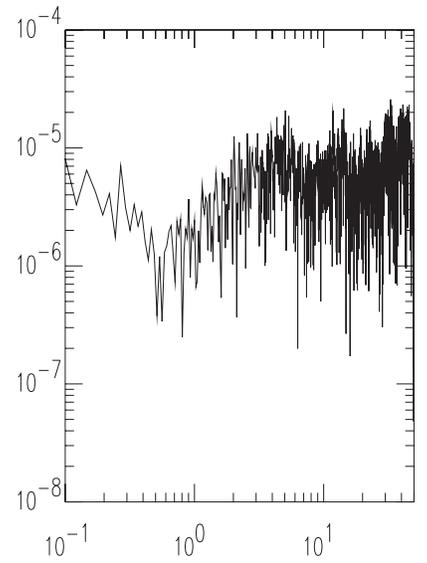
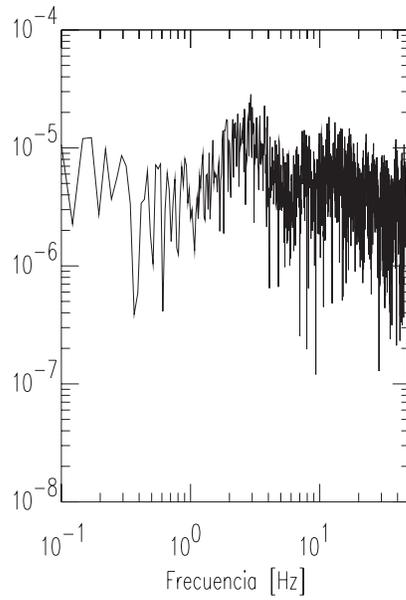
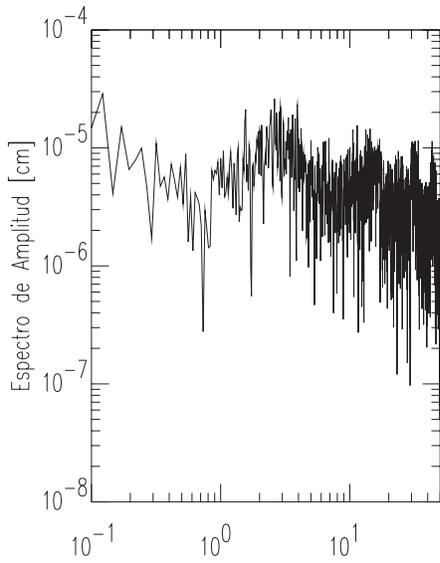
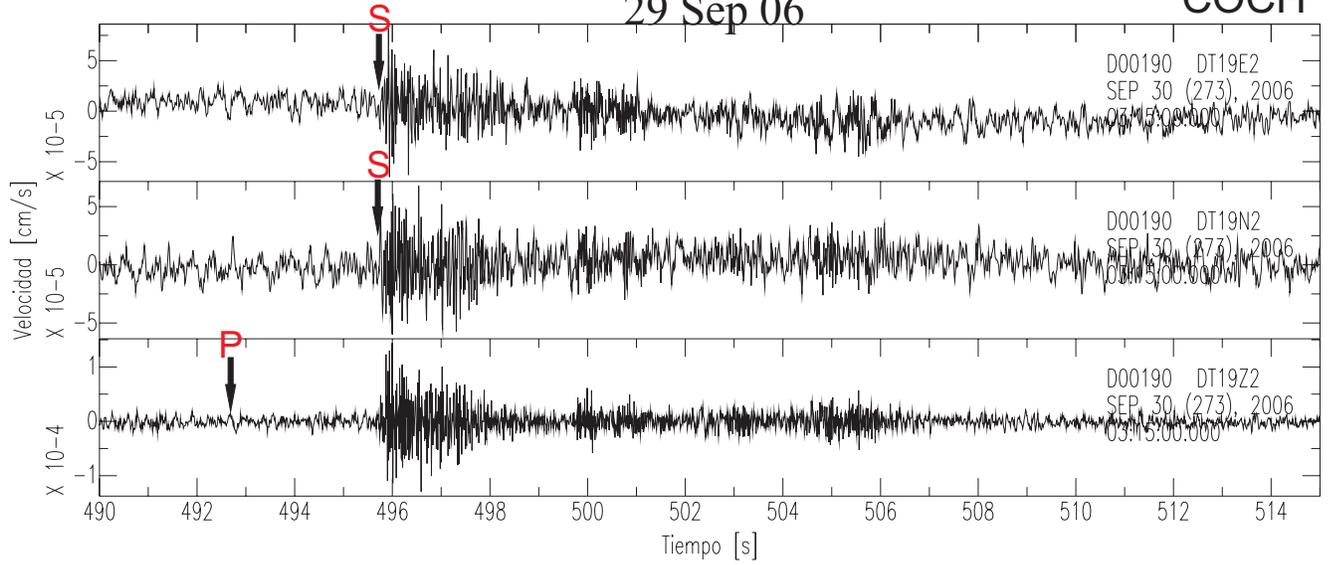
Evento 45
07 Sep 06

COCH



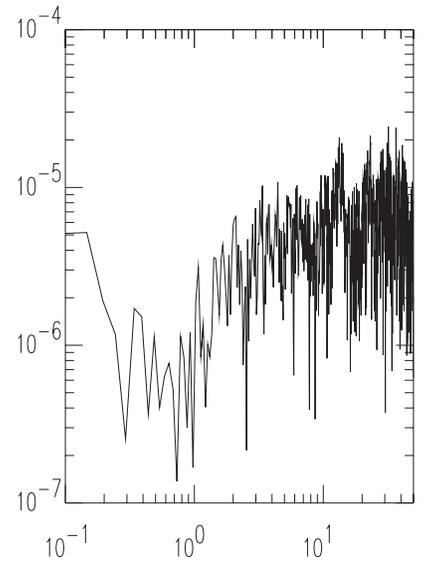
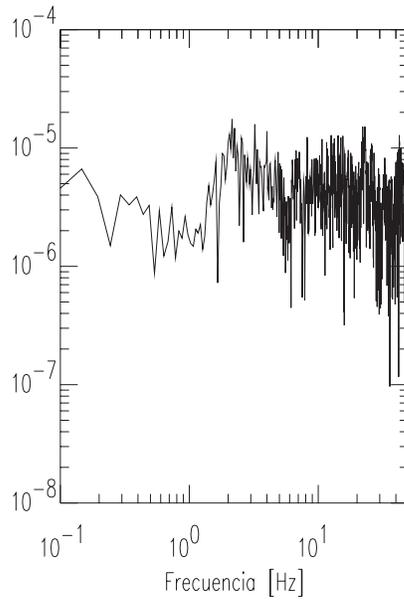
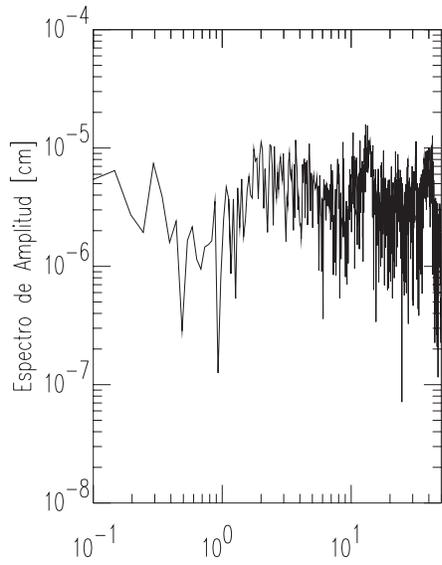
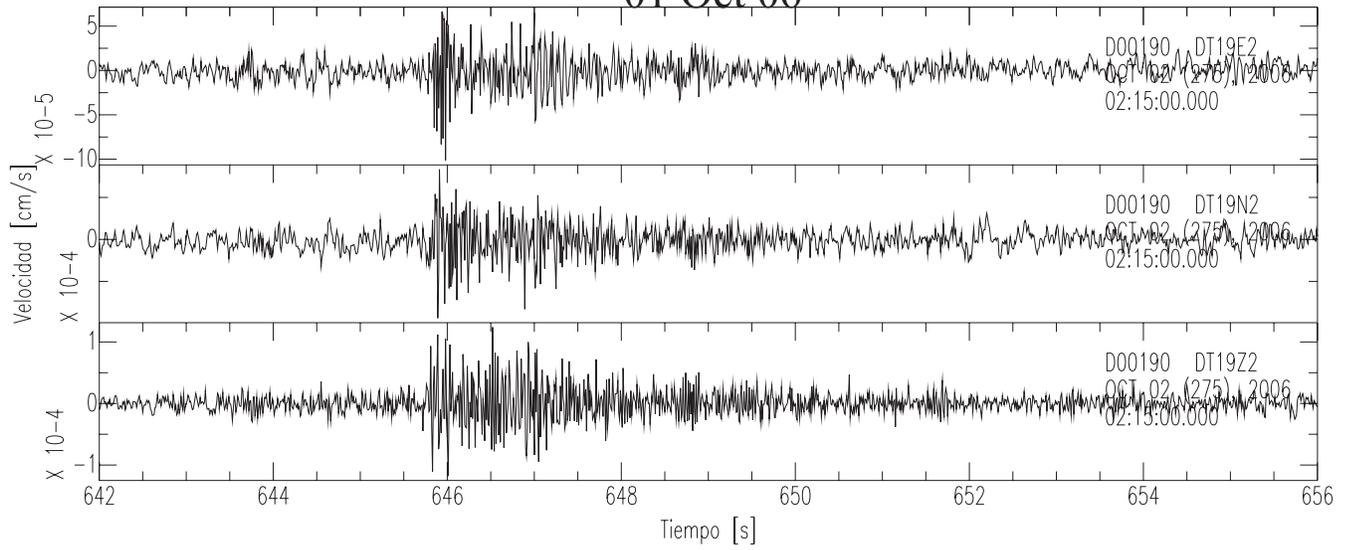
Evento 54 29 Sep 06

COCH



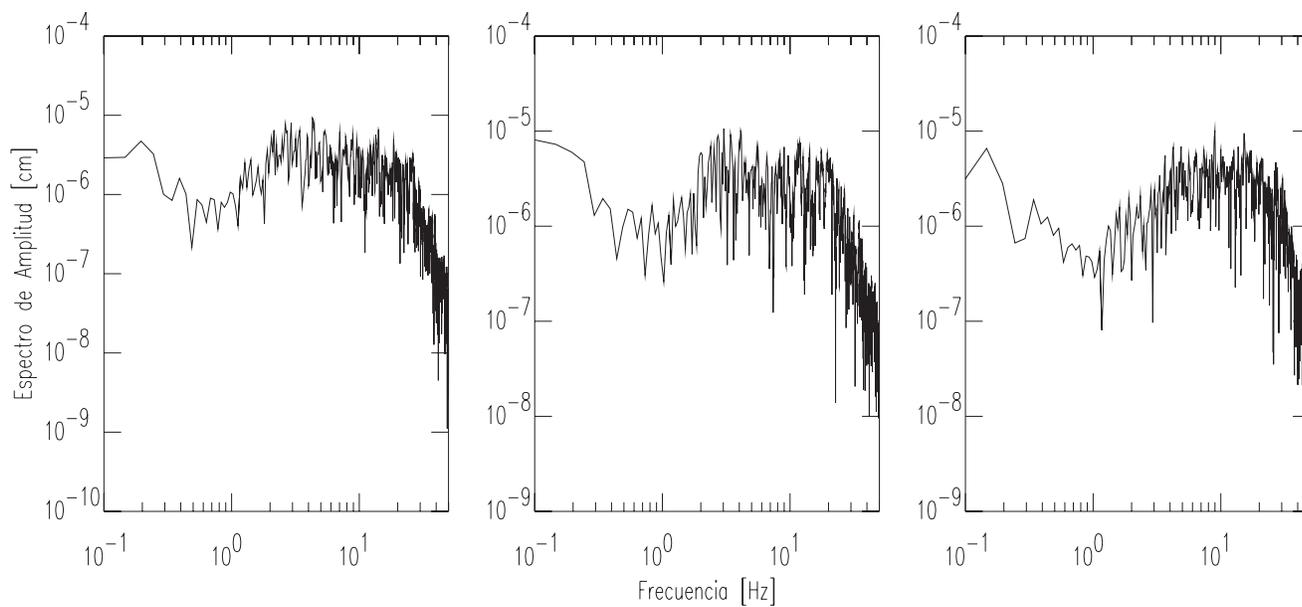
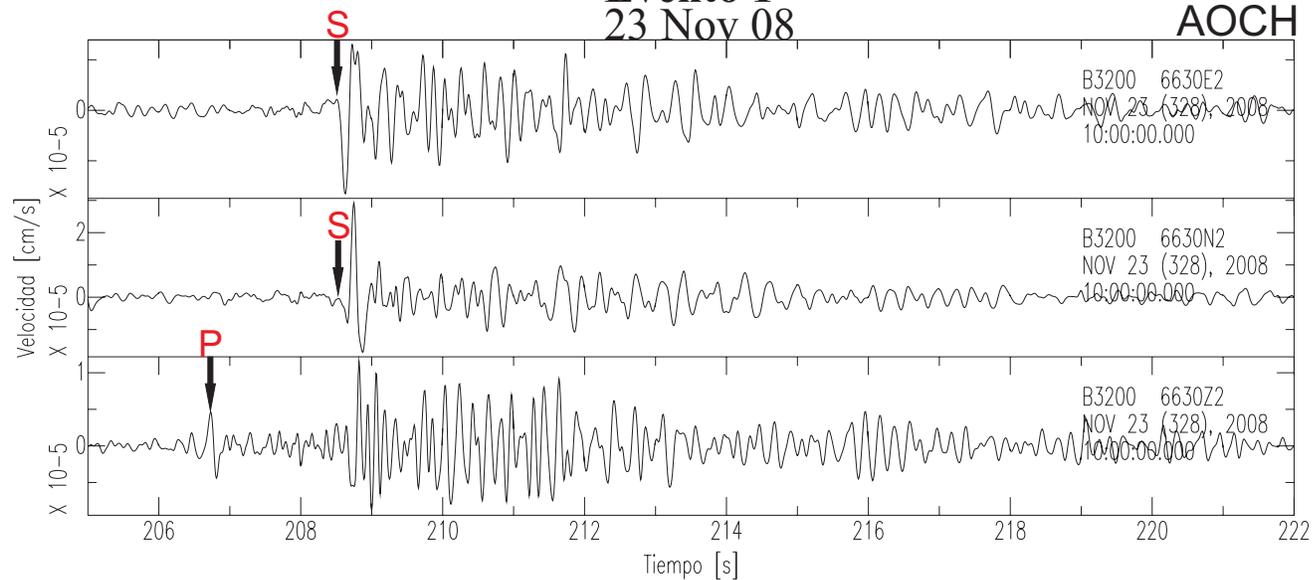
Evento 57
01 Oct 06

COCH



Evento 1 23 Nov 08

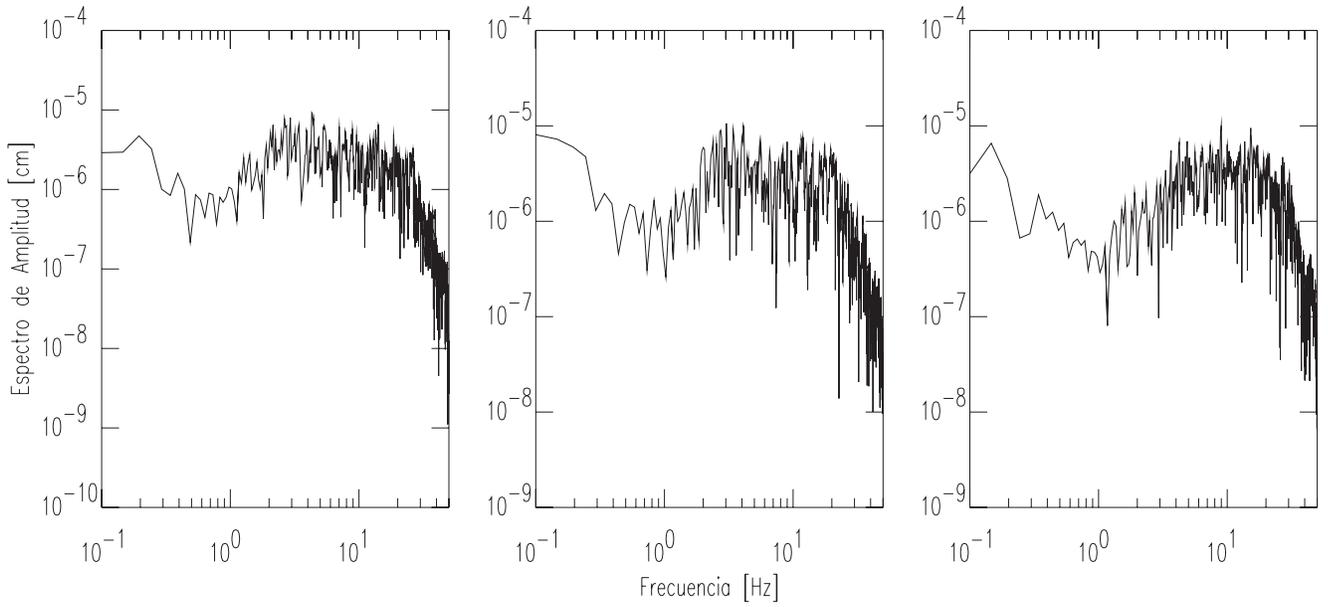
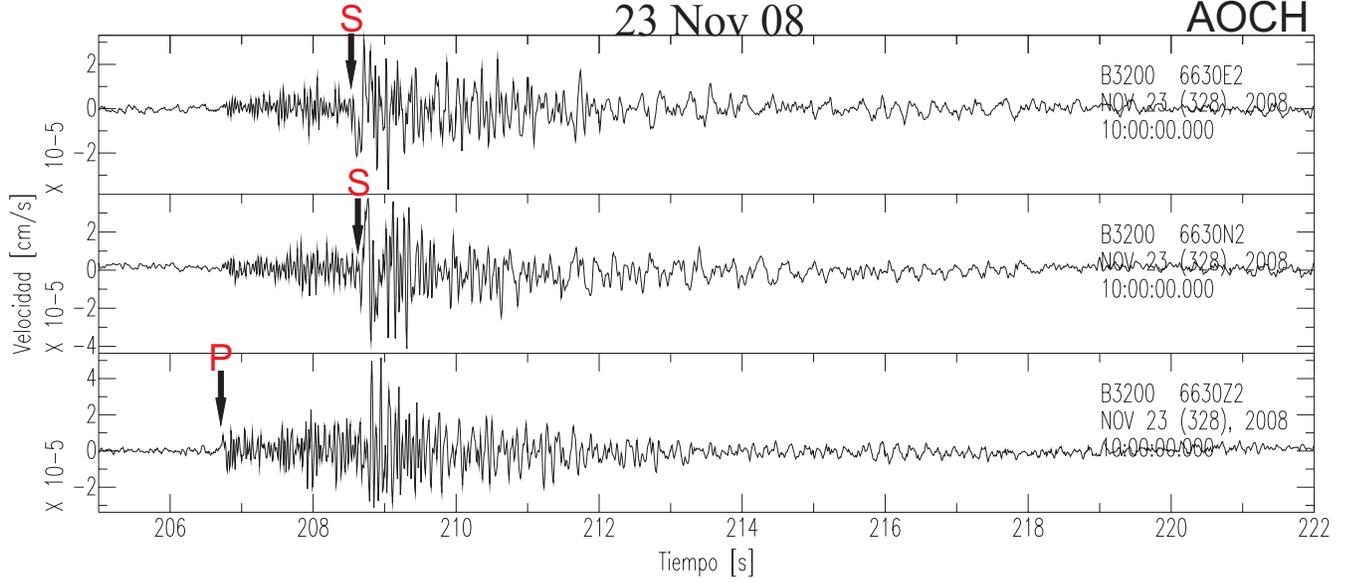
AOCH



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

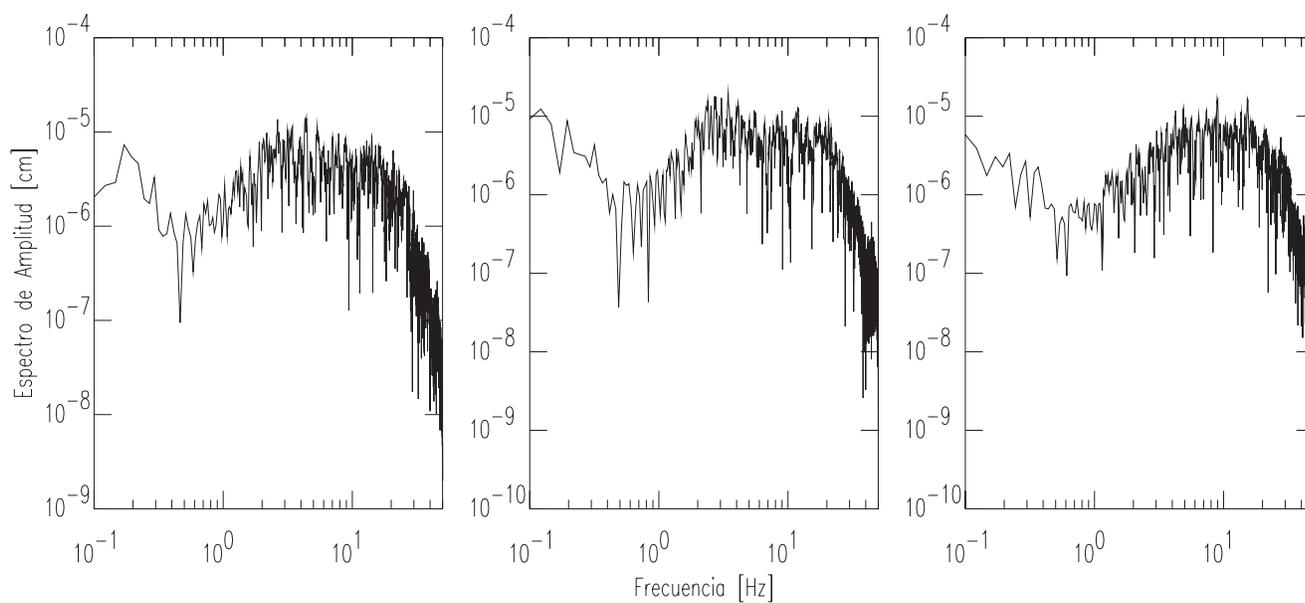
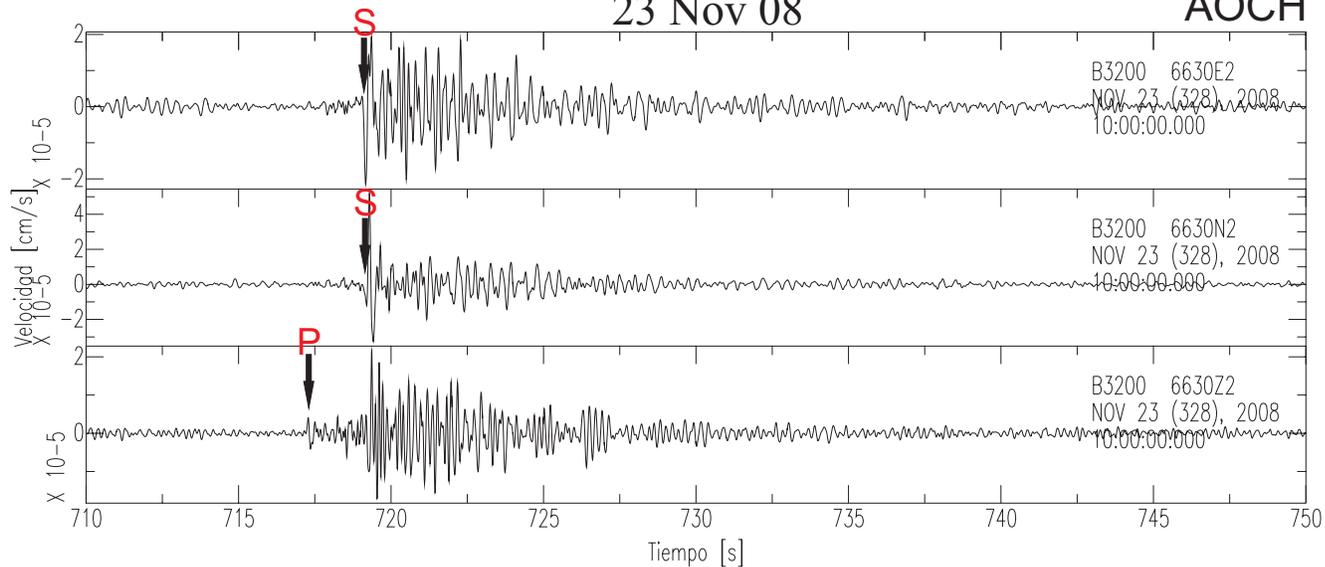
Evento 1 23 Nov 08

AOCH



Evento 2 23 Nov 08

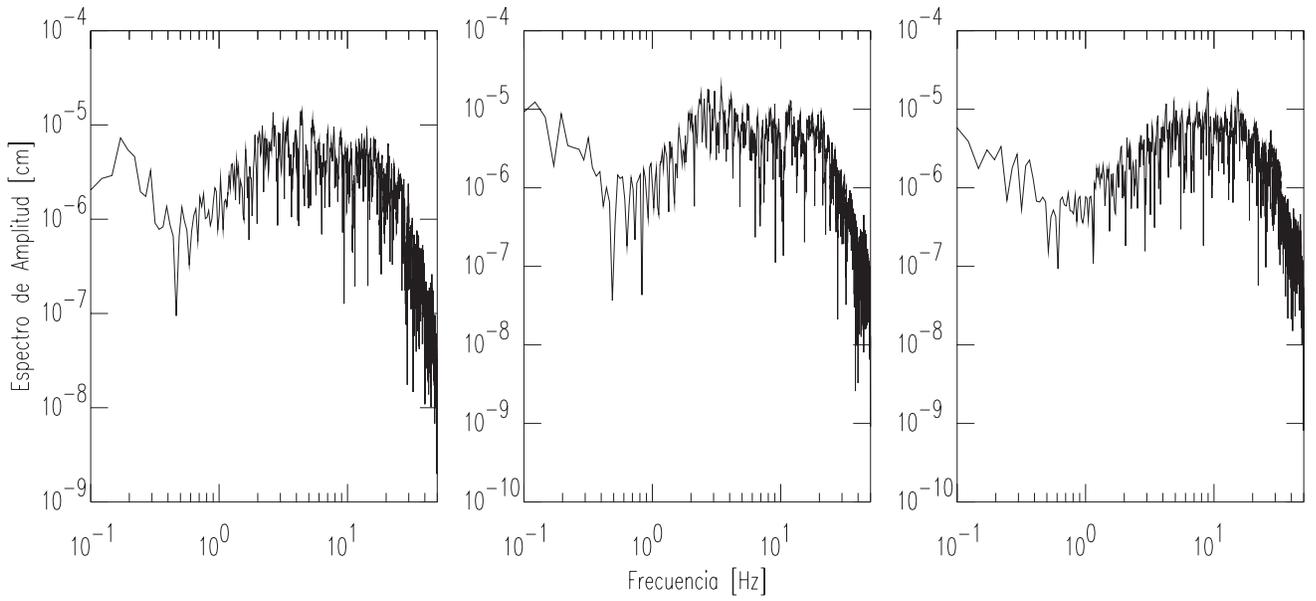
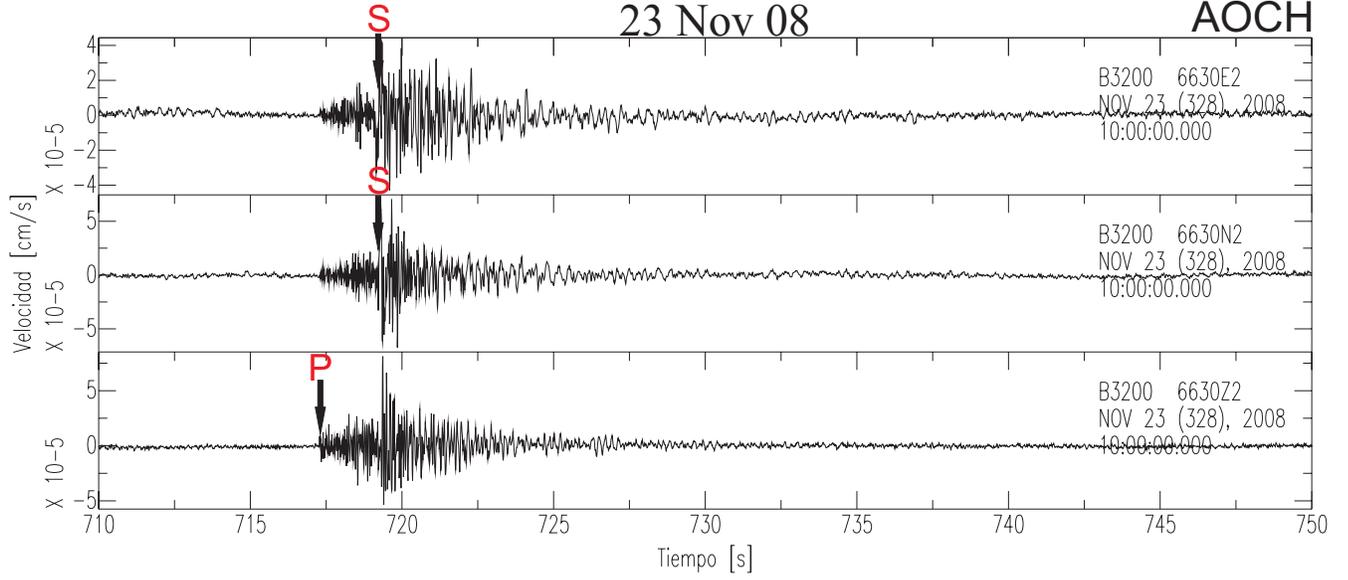
AOCH



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

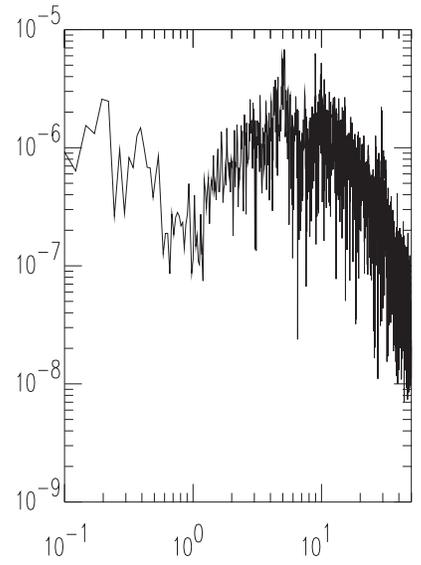
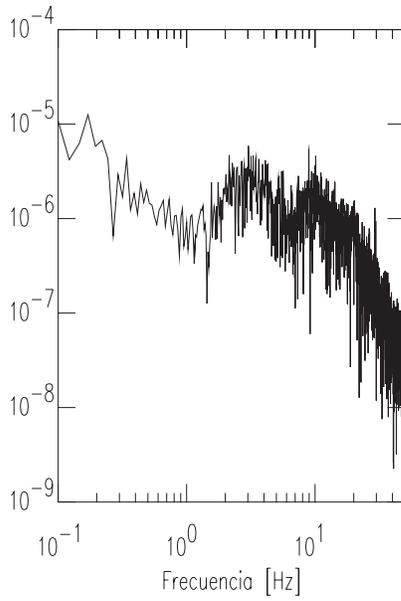
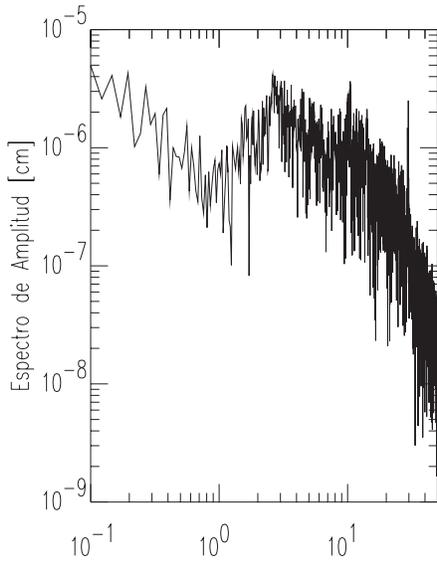
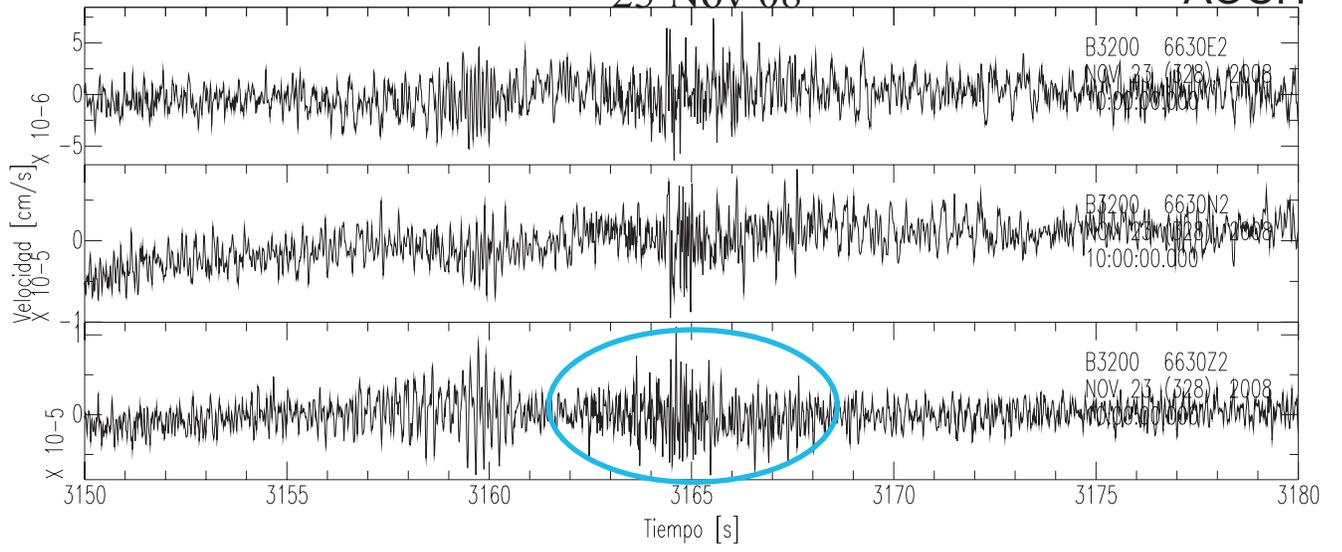
Evento 2 23 Nov 08

AOCH



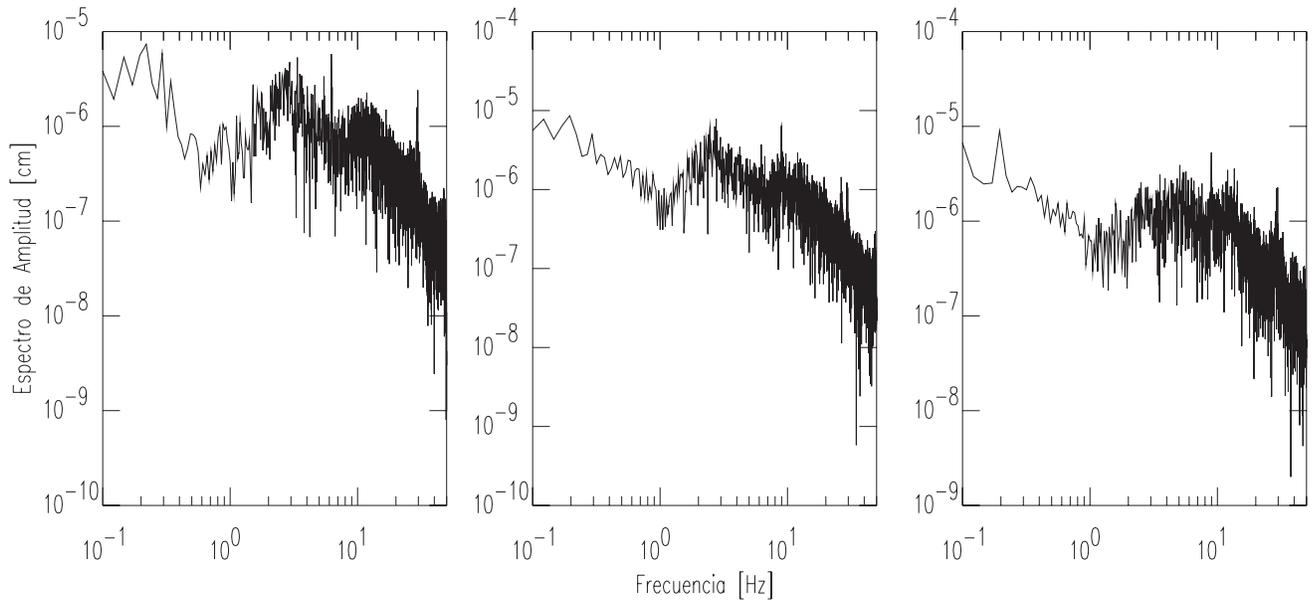
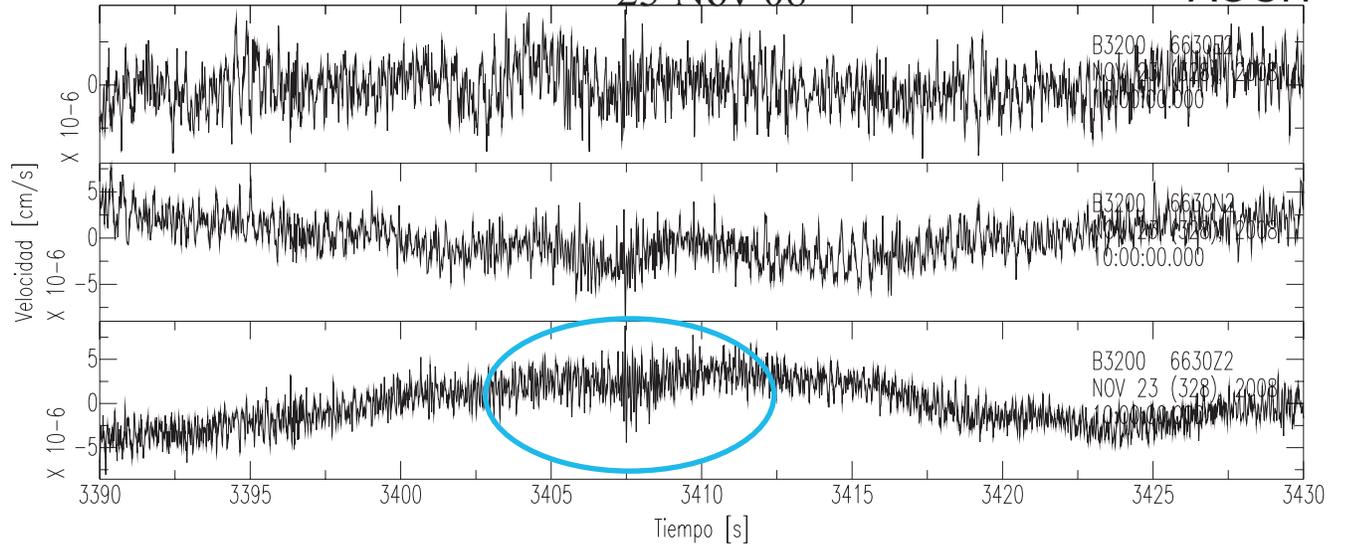
Evento 3 23 Nov 08

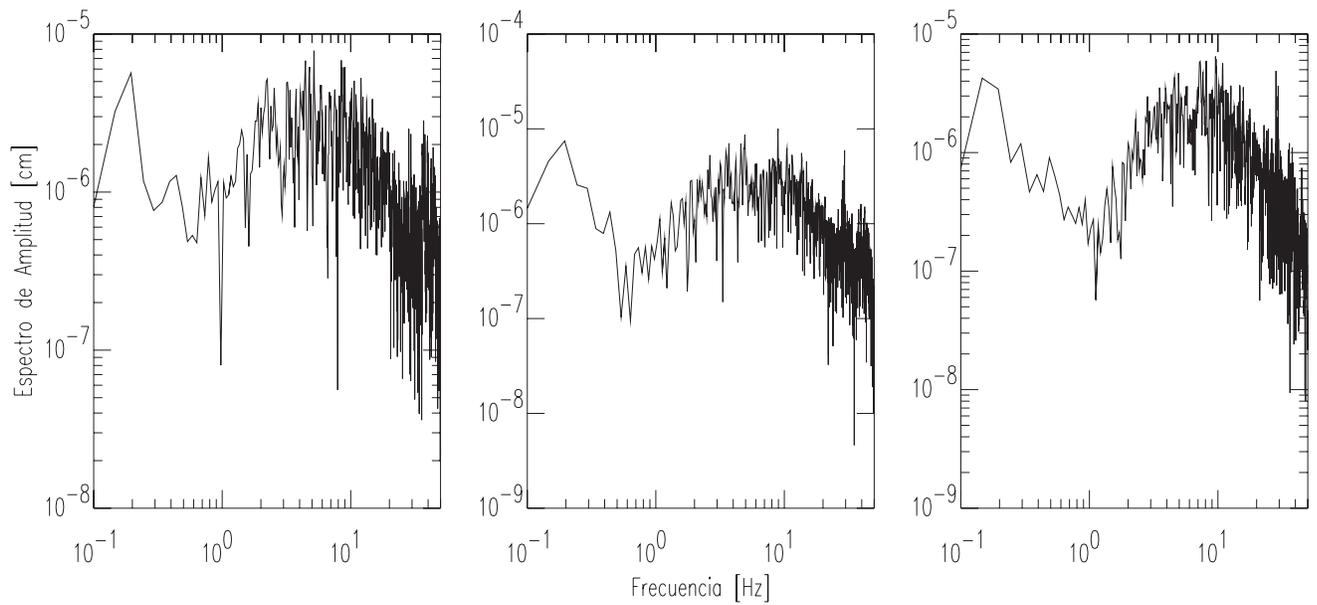
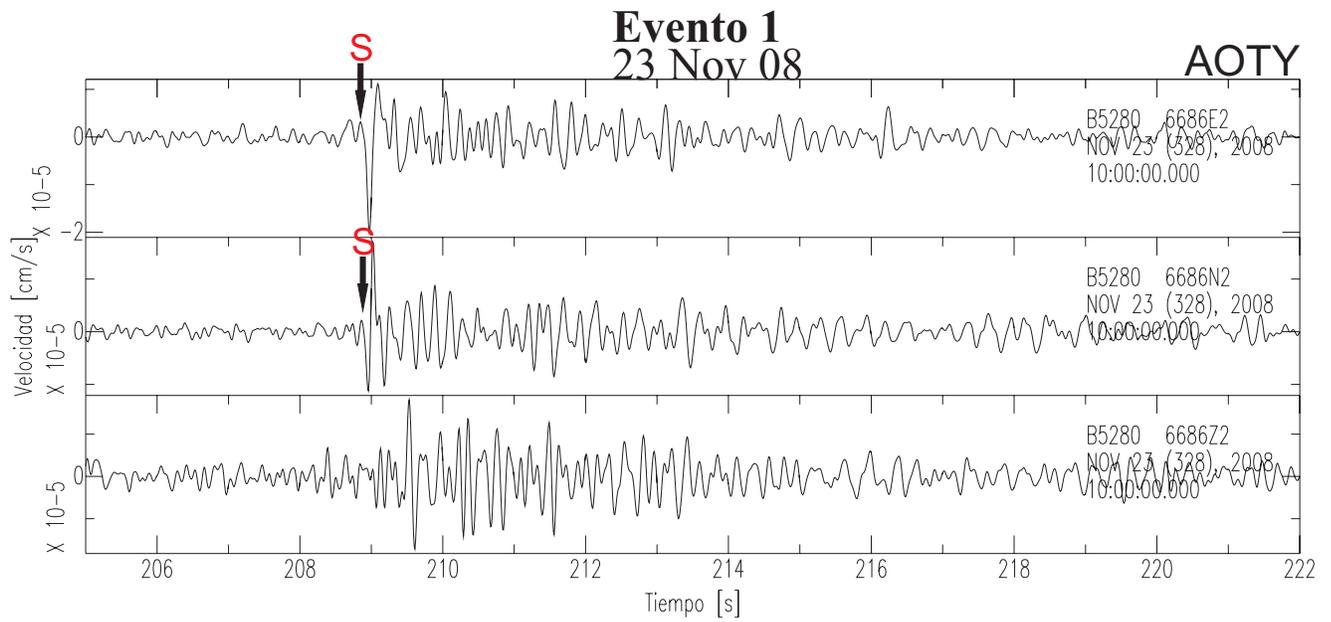
AOCH



Evento 4 23 Nov 08

AOCH

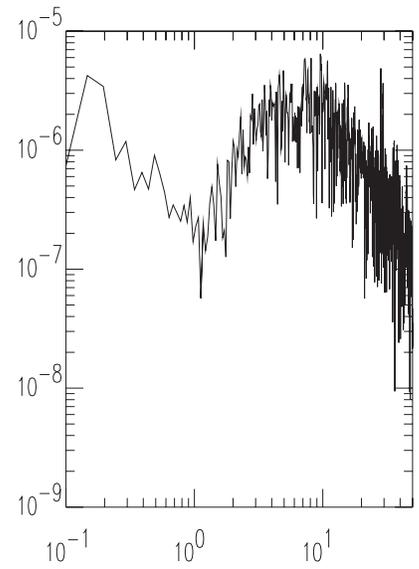
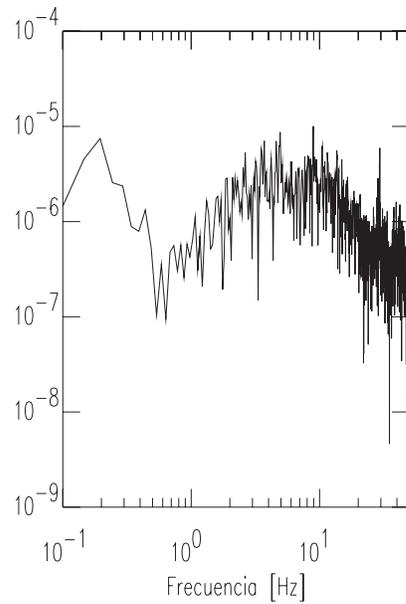
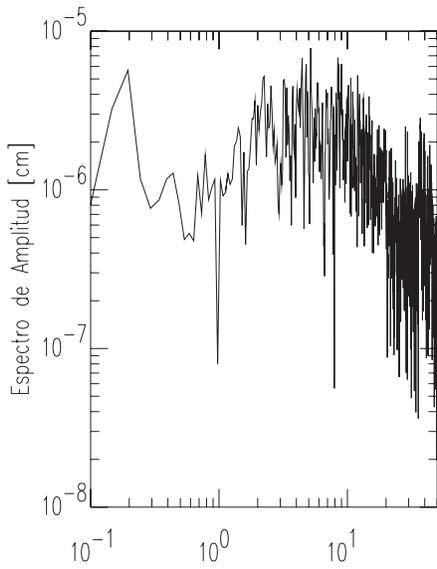
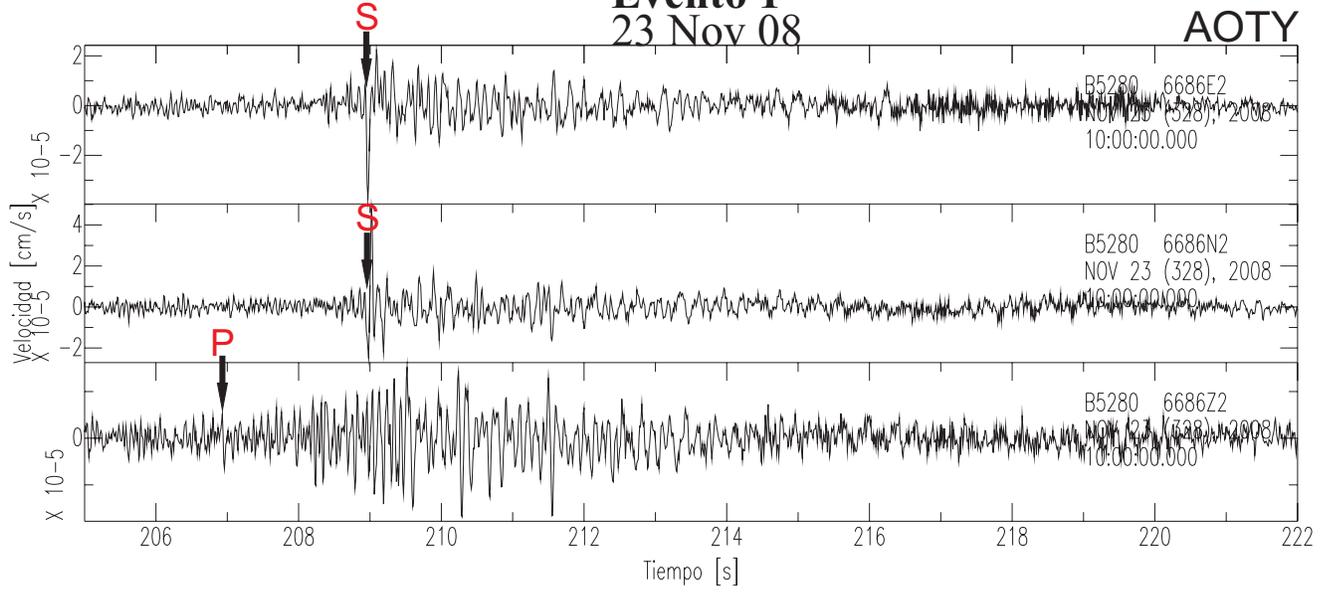




Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

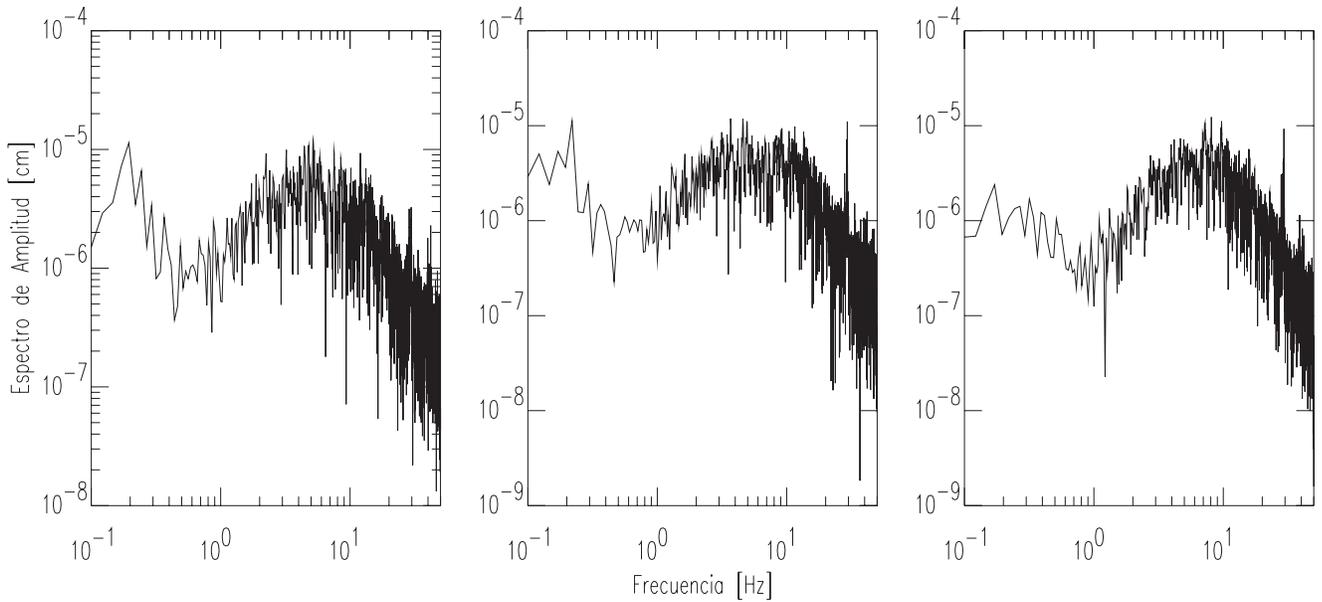
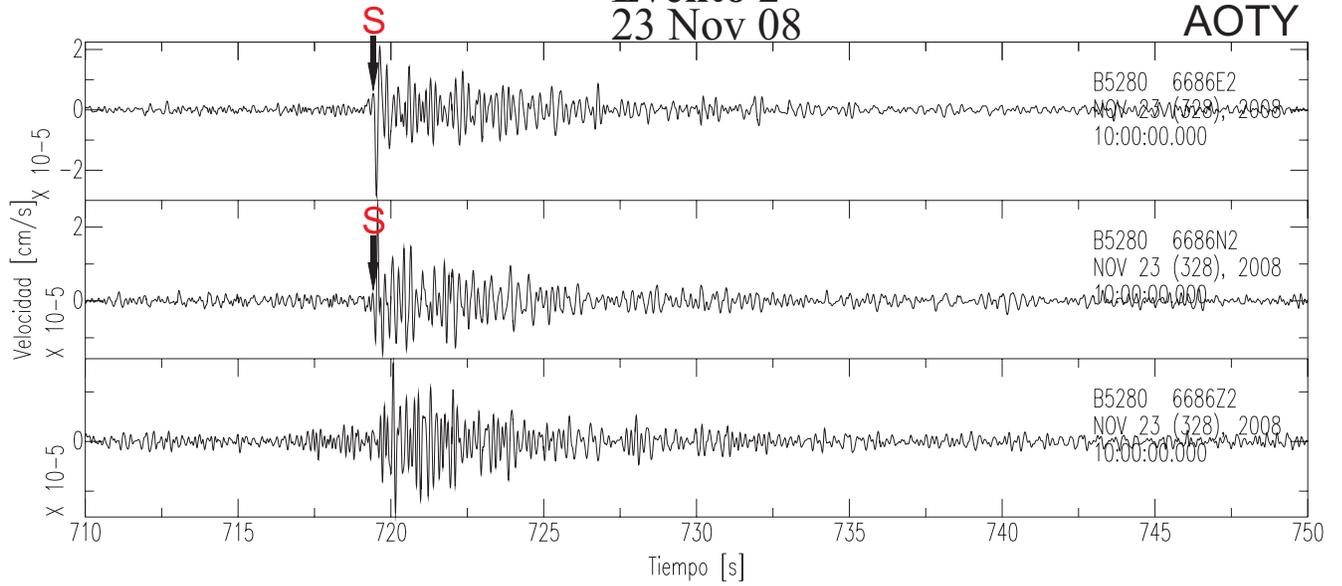
Evento 1 23 Nov 08

AOTY



Evento 2 23 Nov 08

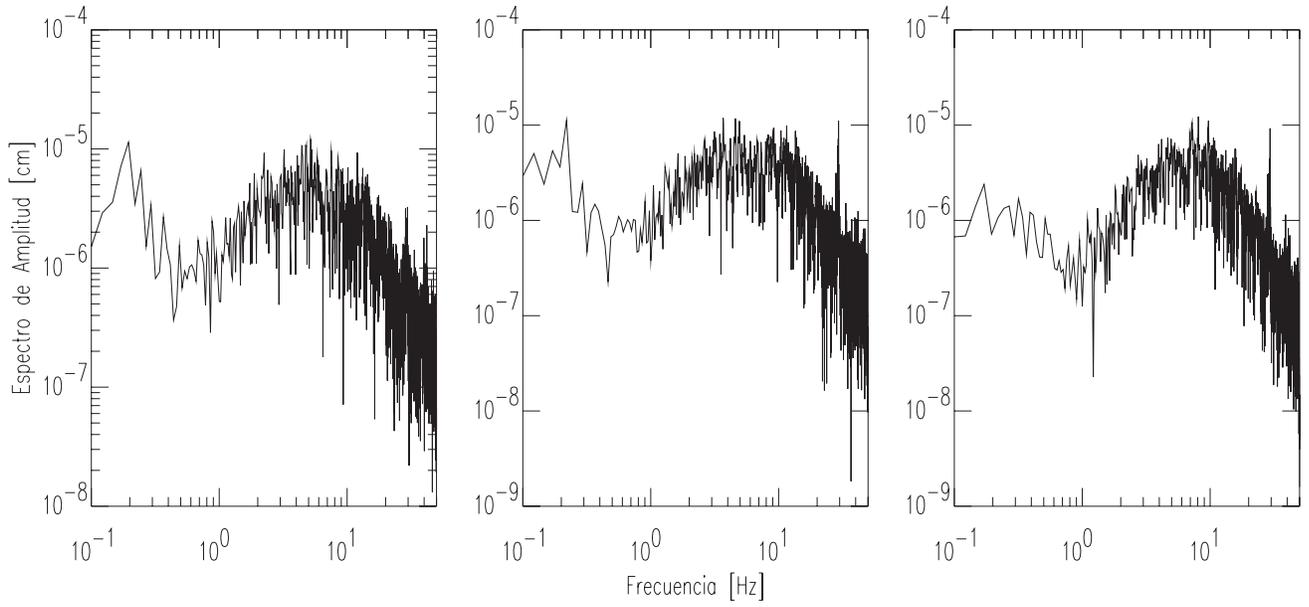
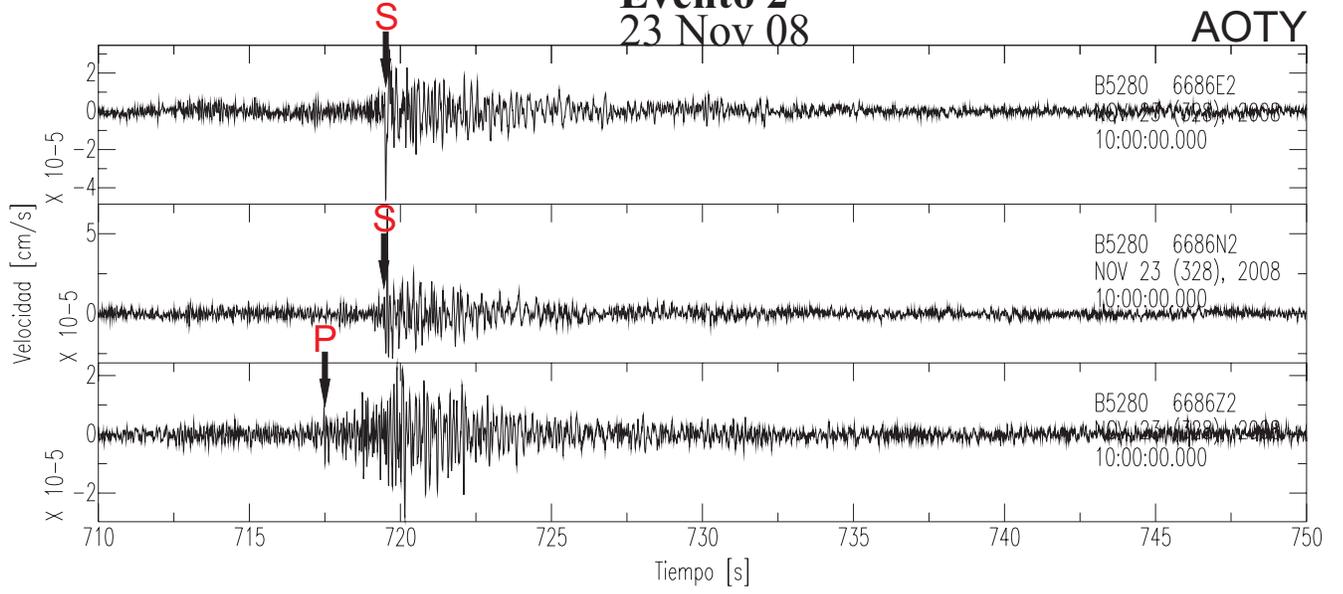
AOTY



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

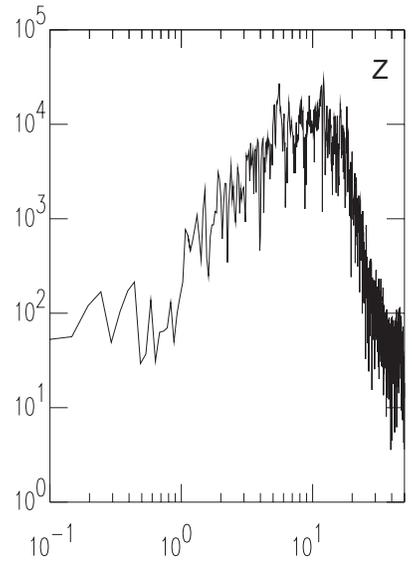
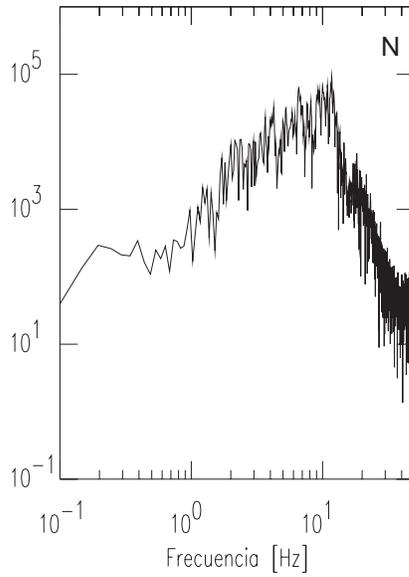
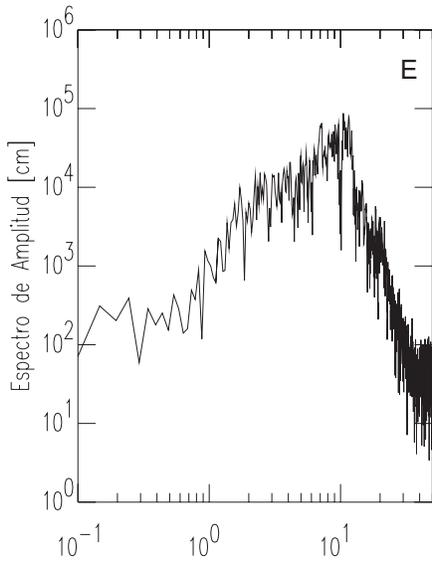
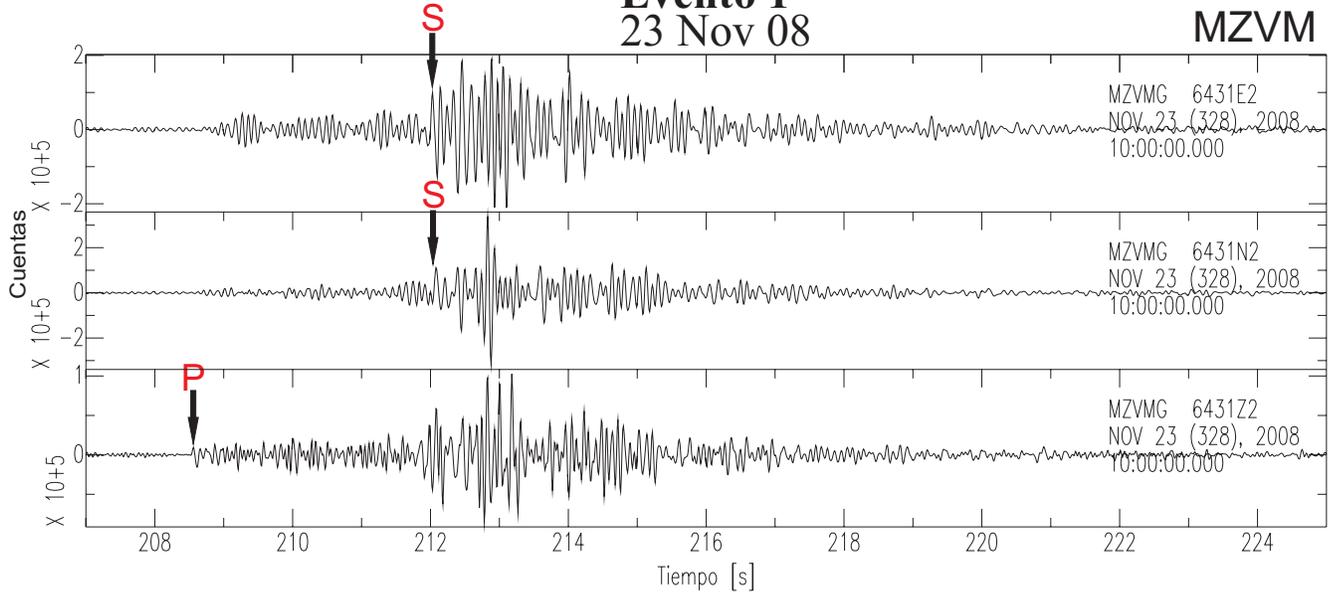
Evento 2 23 Nov 08

AOTY



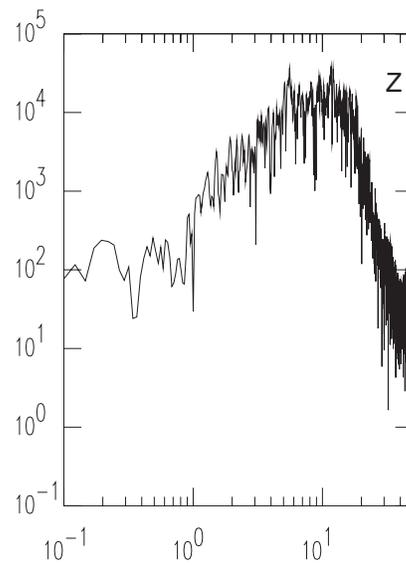
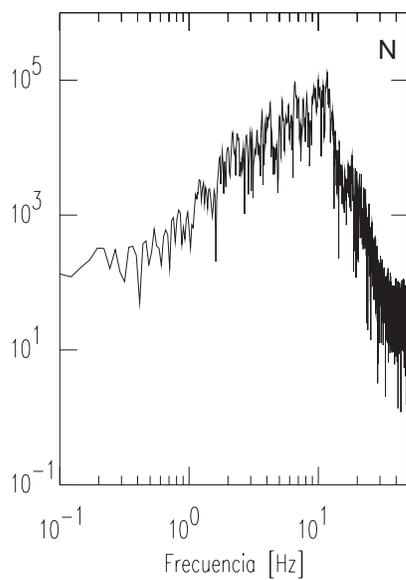
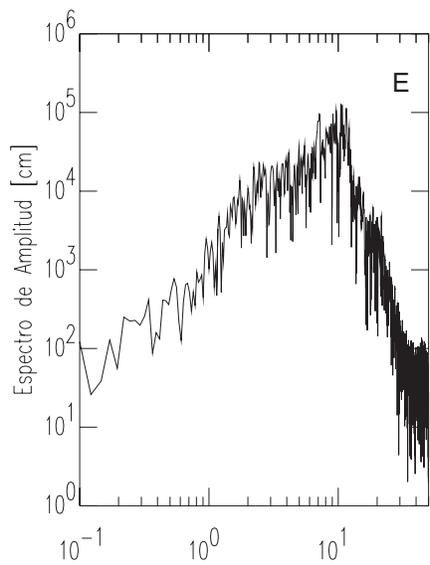
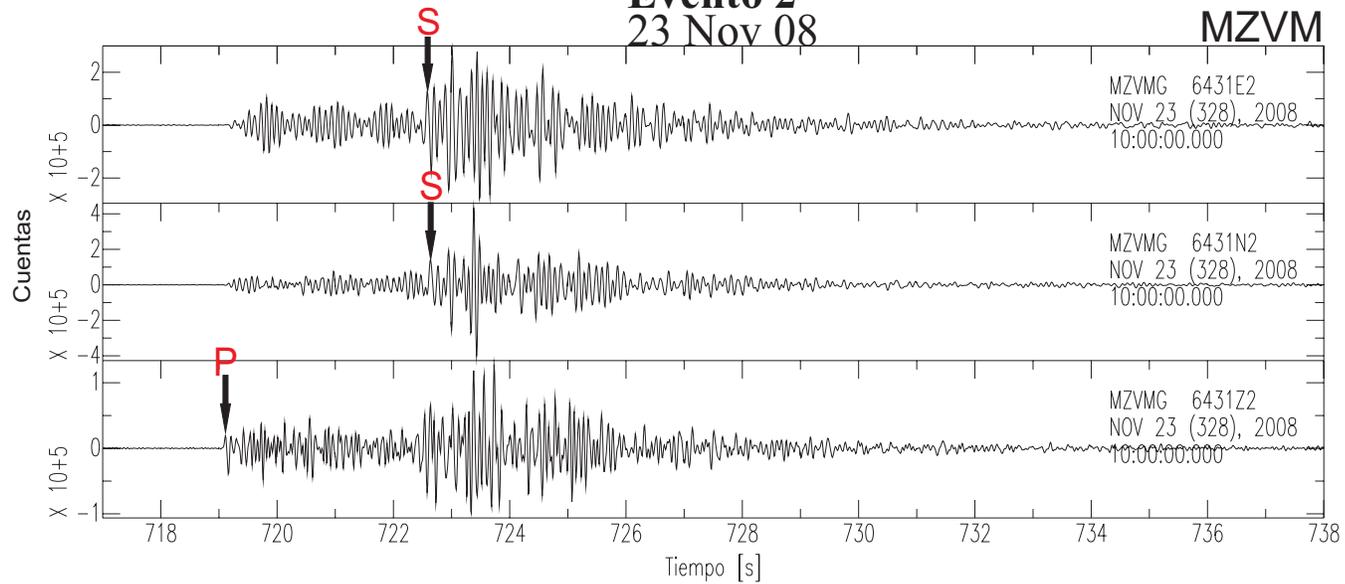
Evento 1 23 Nov 08

MZVM



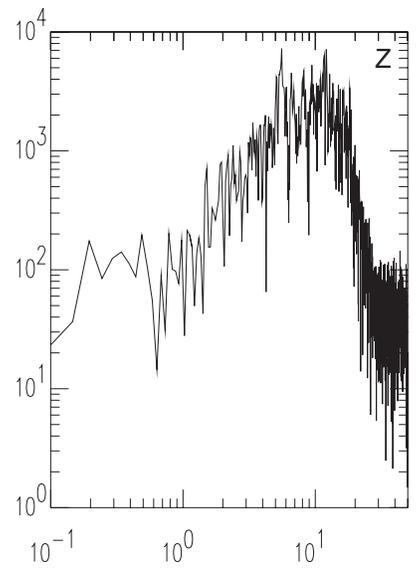
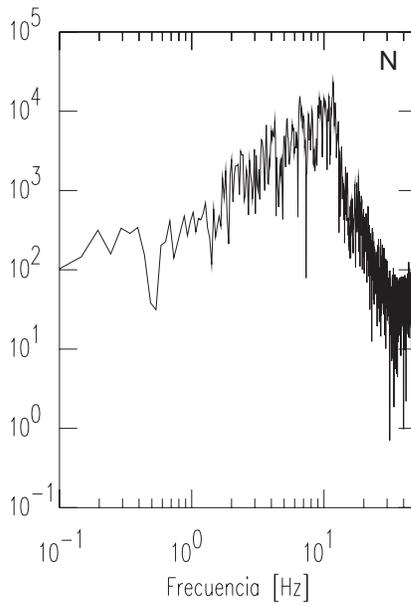
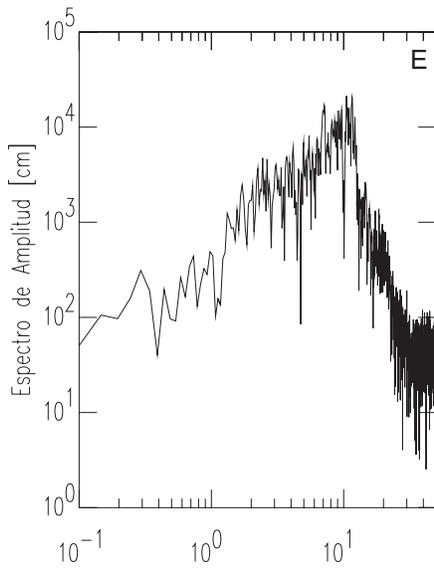
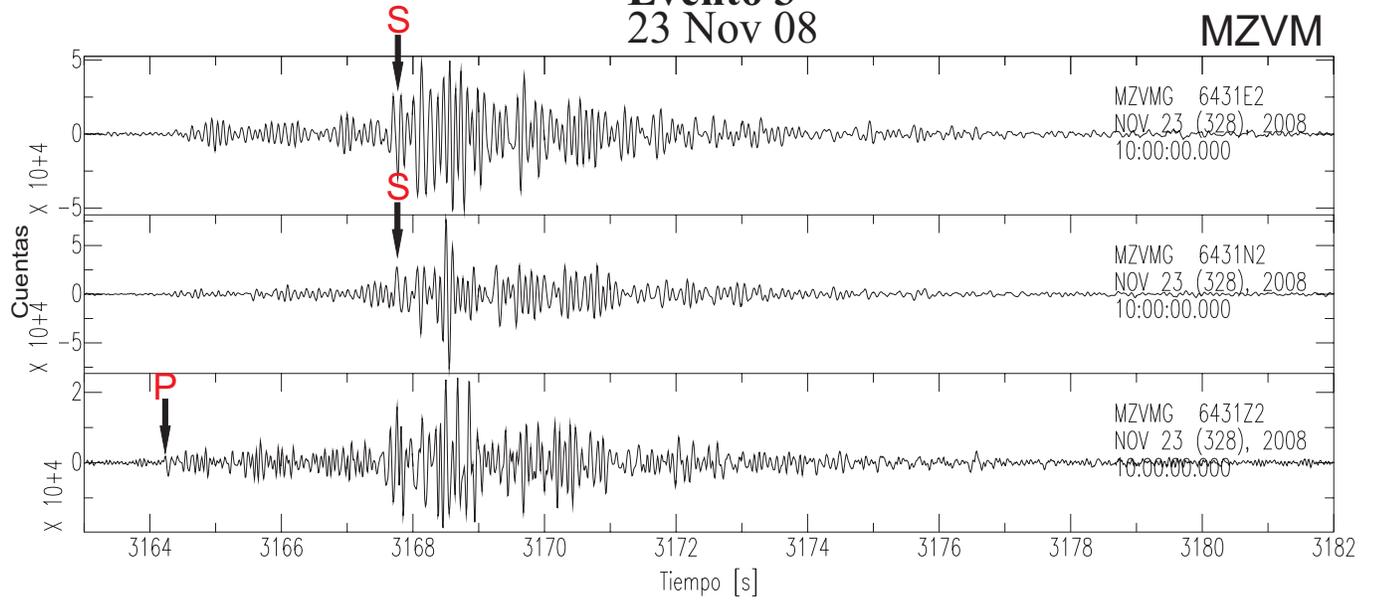
Evento 2 23 Nov 08

MZVM



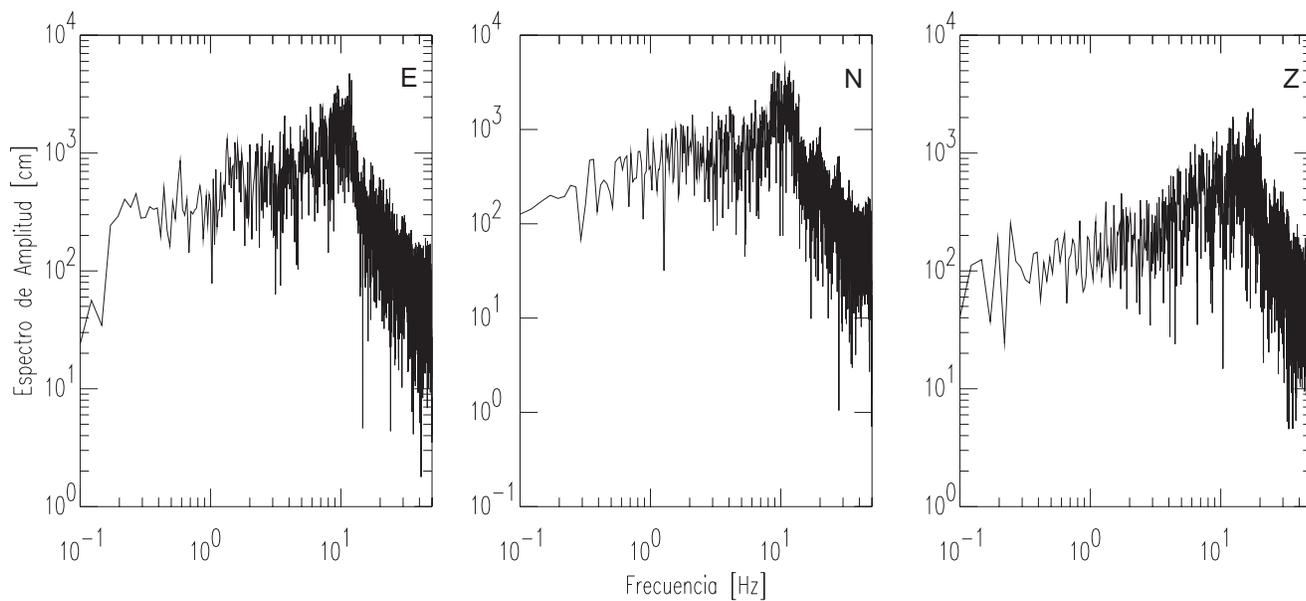
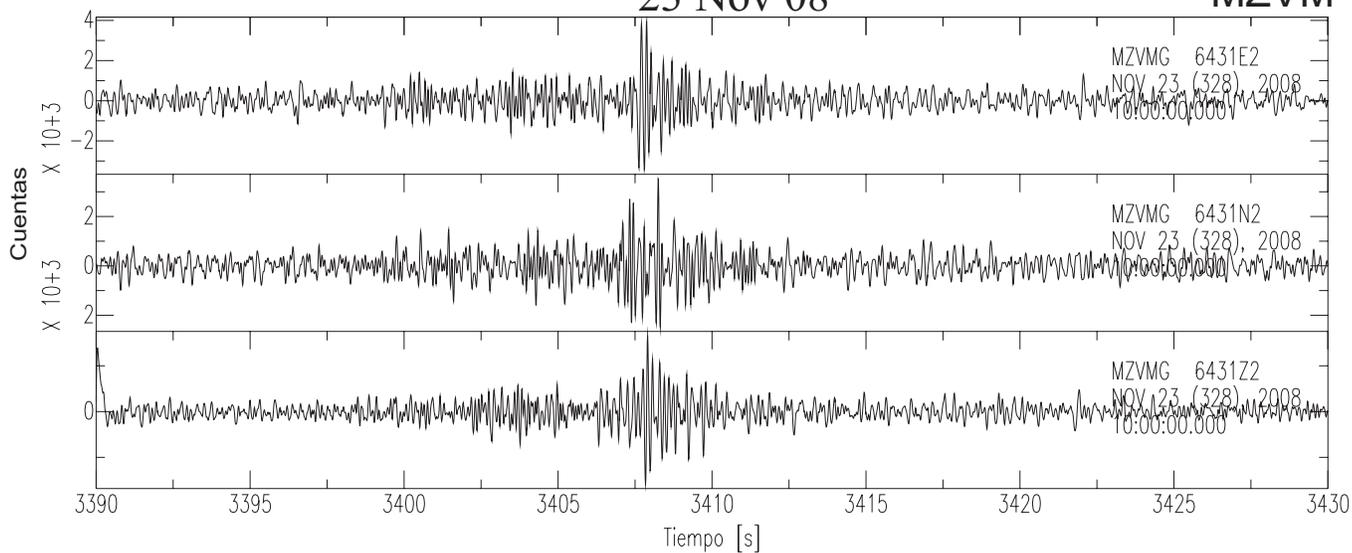
Evento 3 23 Nov 08

MZVM

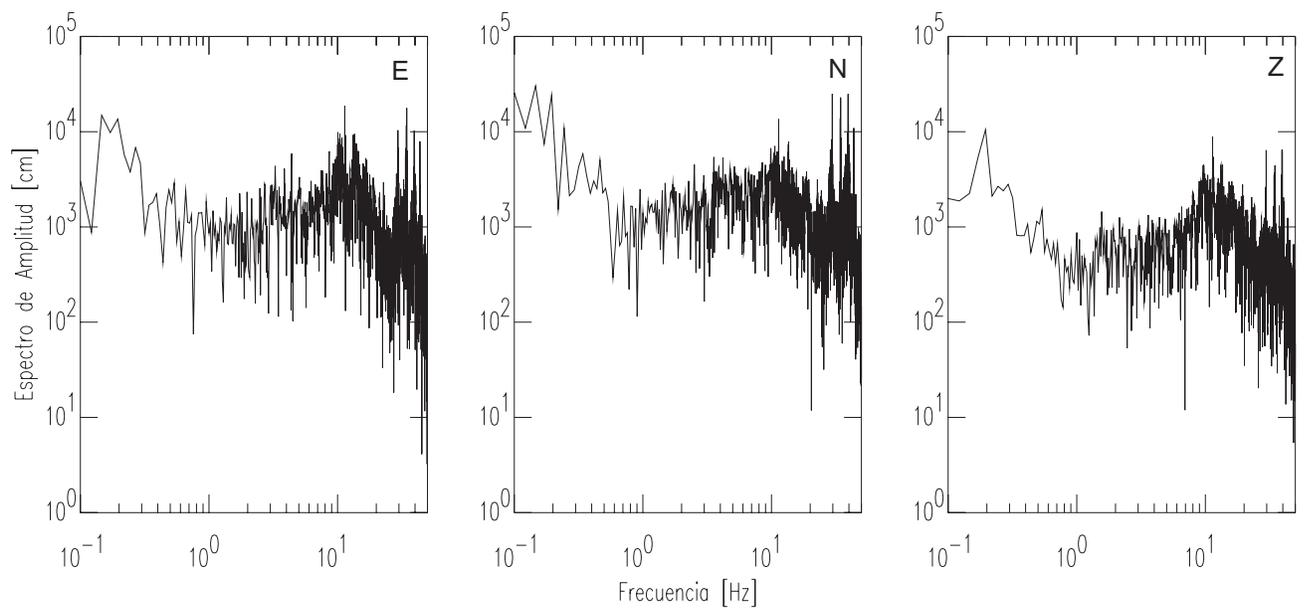
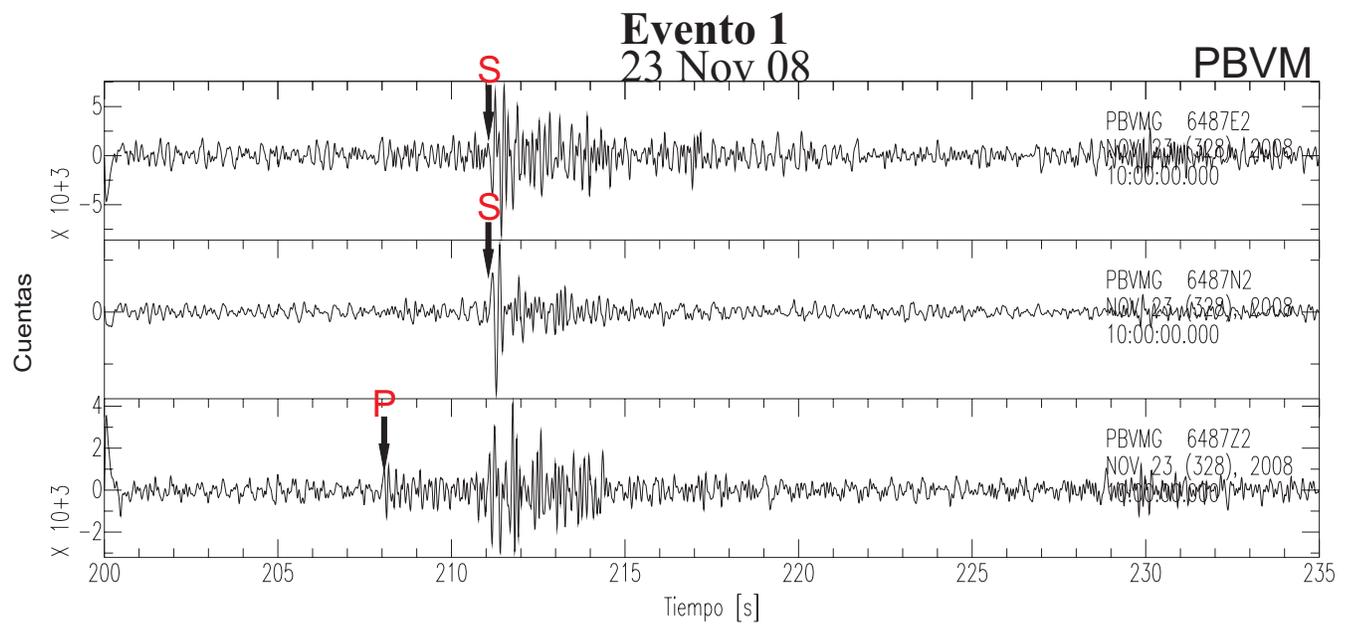


Evento 4 23 Nov 08

MZVM



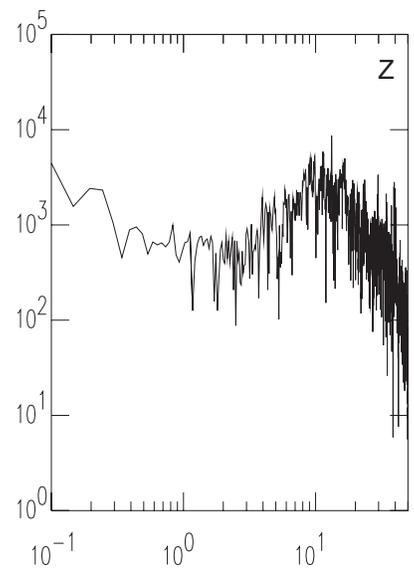
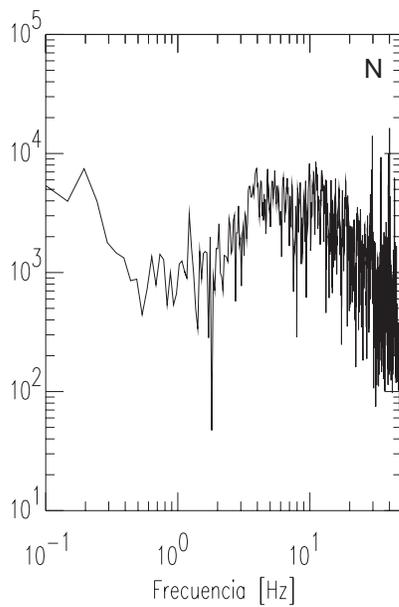
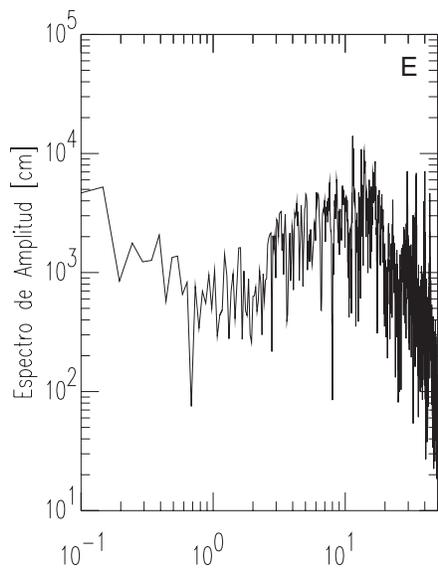
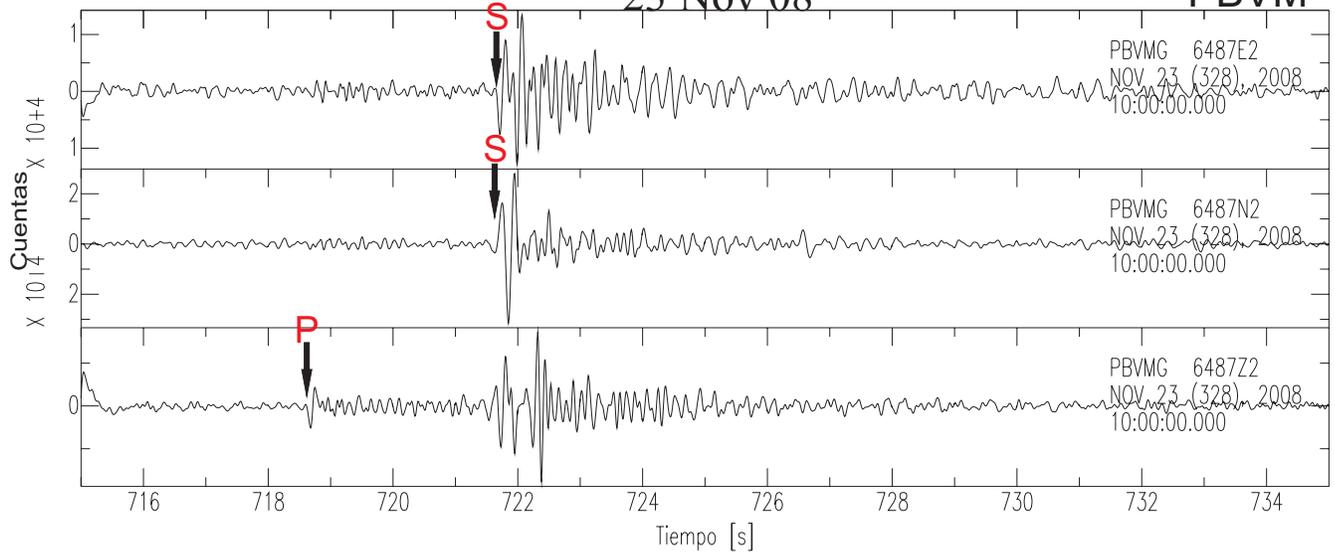
Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

Evento 2 23 Nov 08

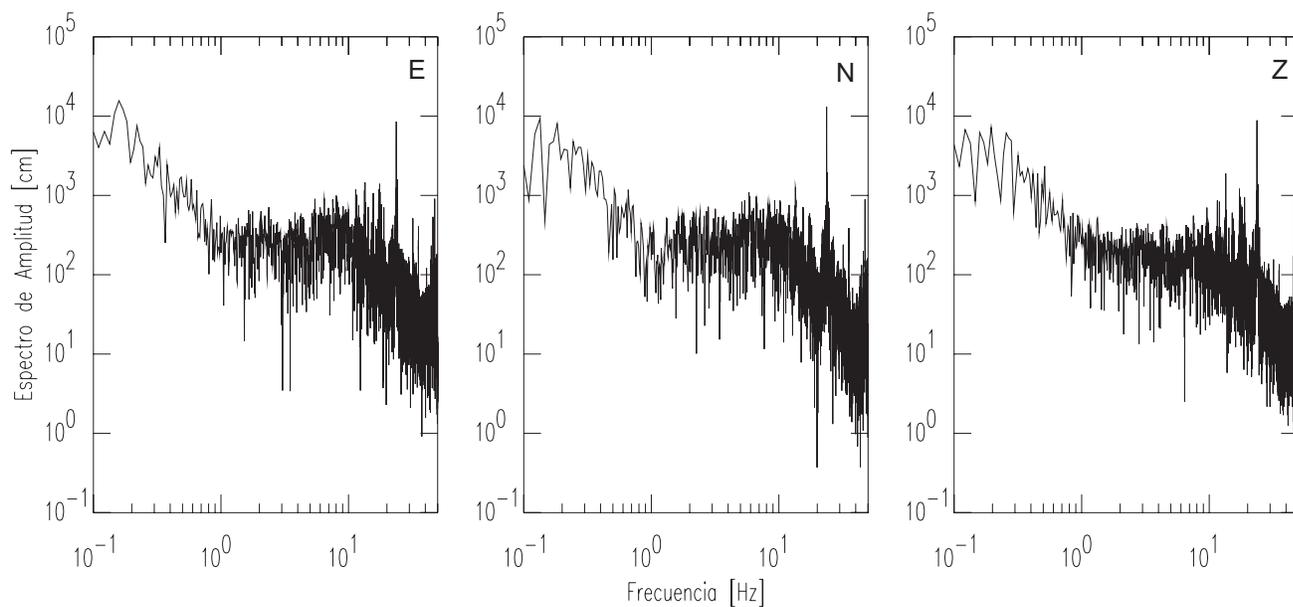
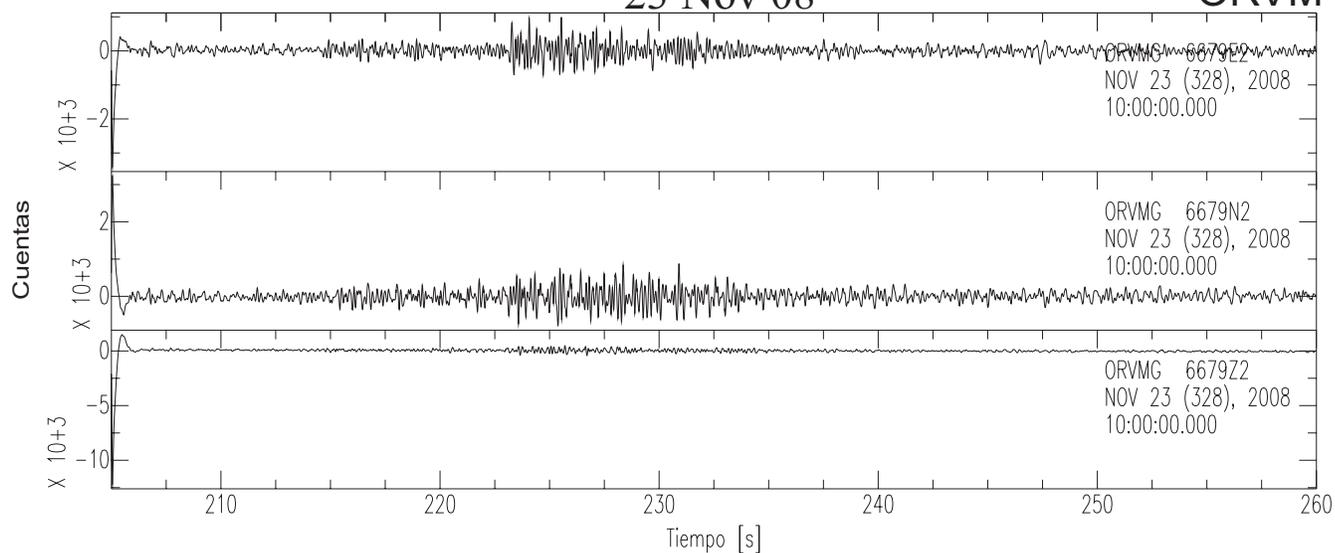
PBVM



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

Evento 1 23 Nov 08

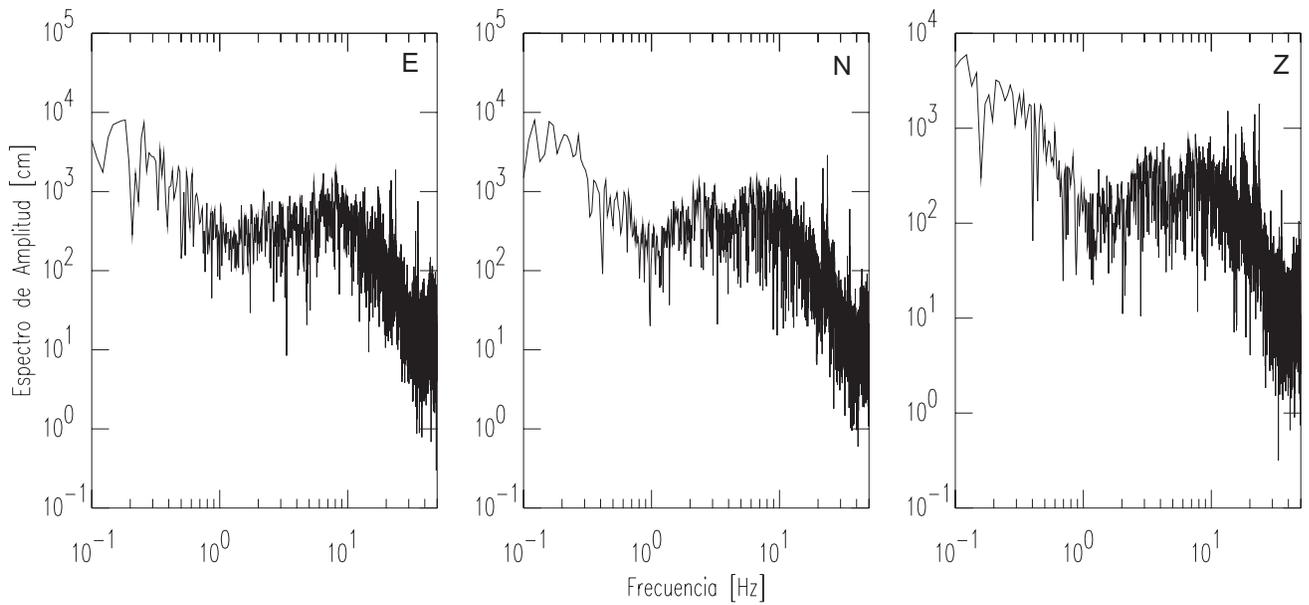
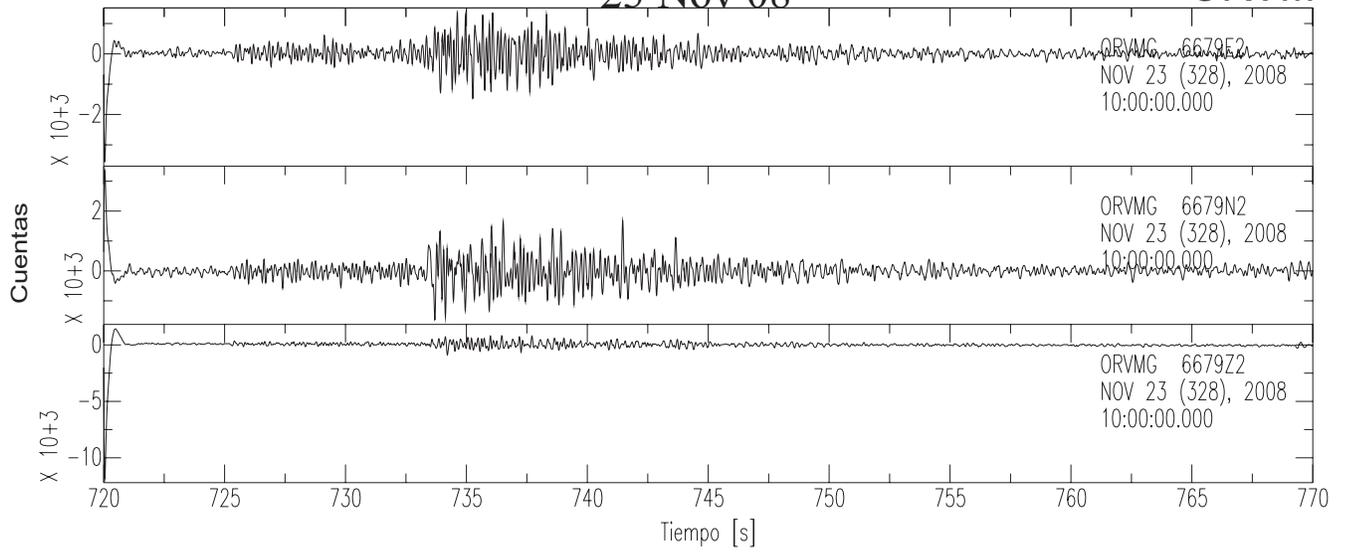
ORVM



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

Evento 2 23 Nov 08

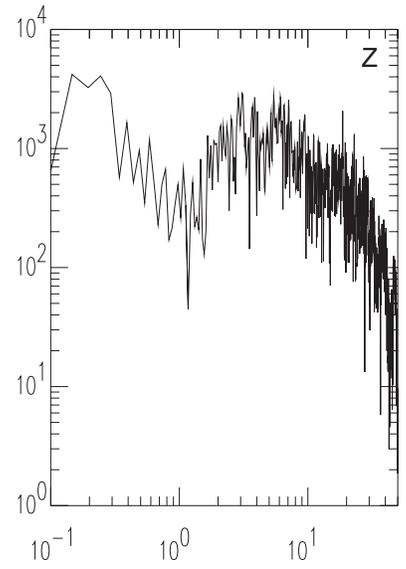
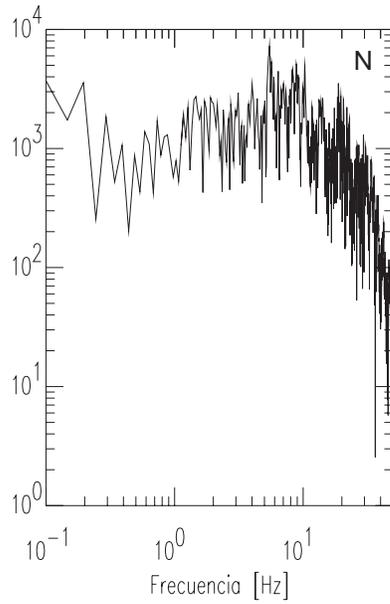
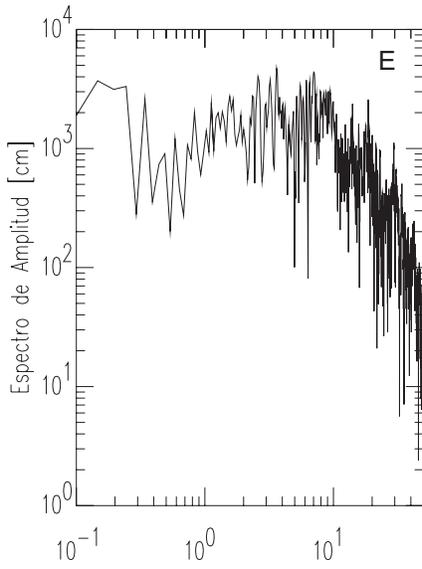
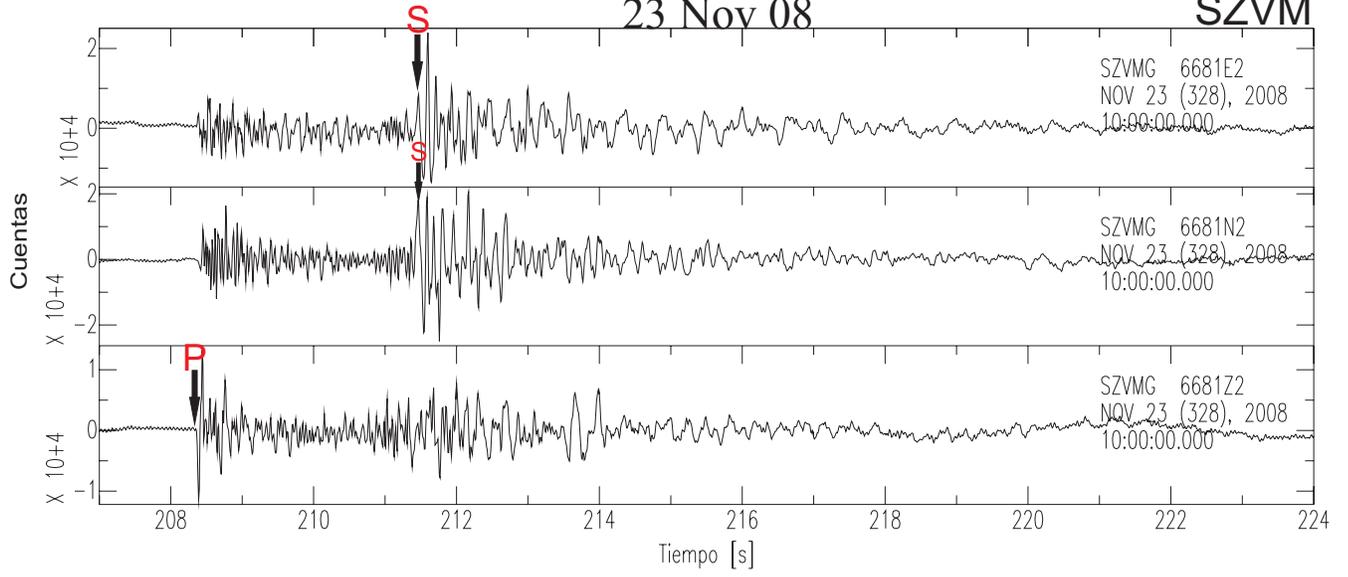
ORVM

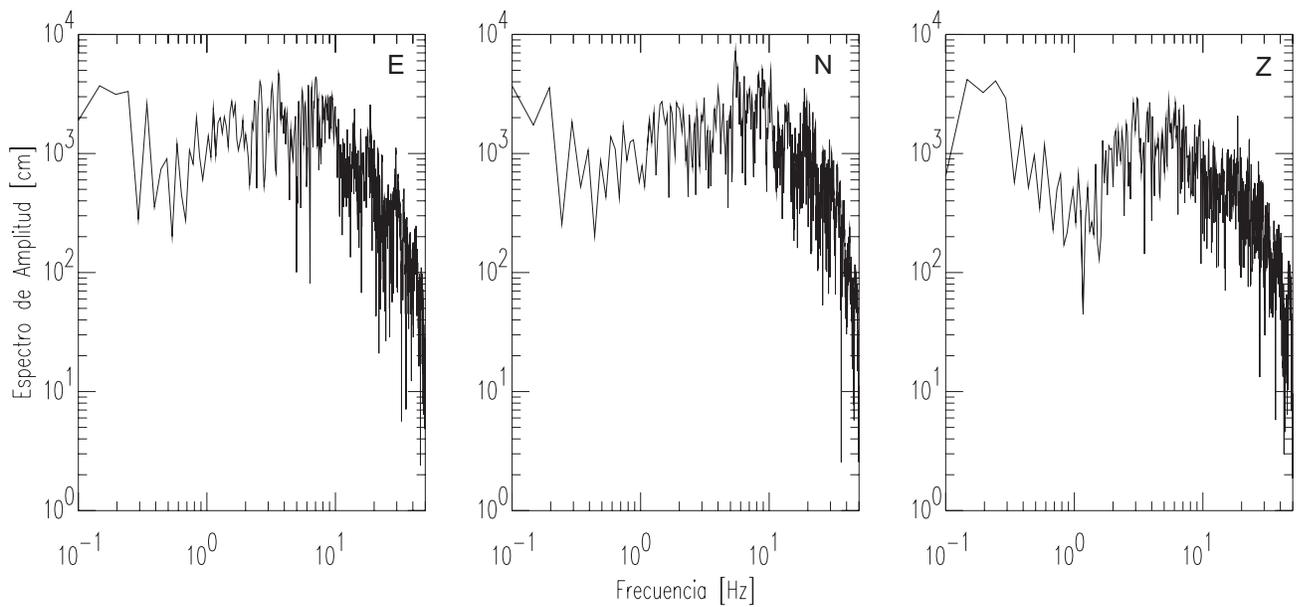
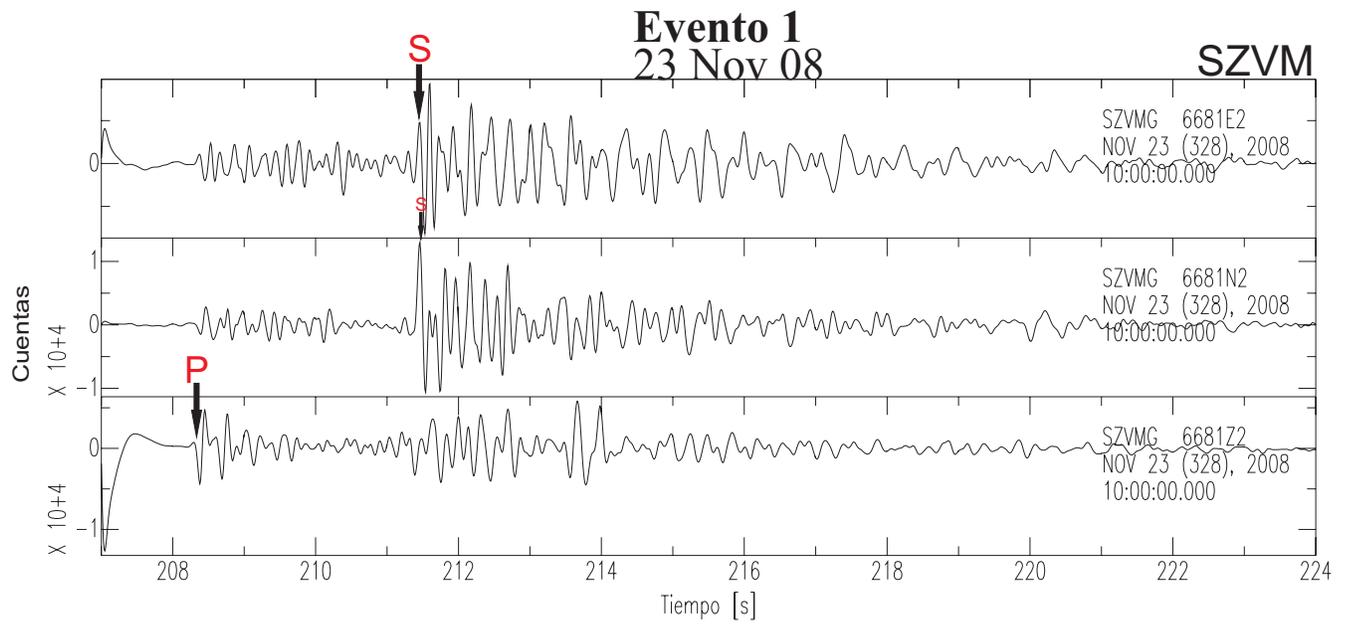


Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

Evento 1 23 Nov 08

SZVM

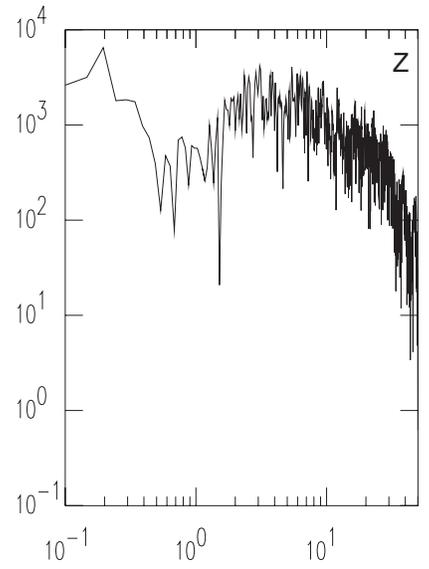
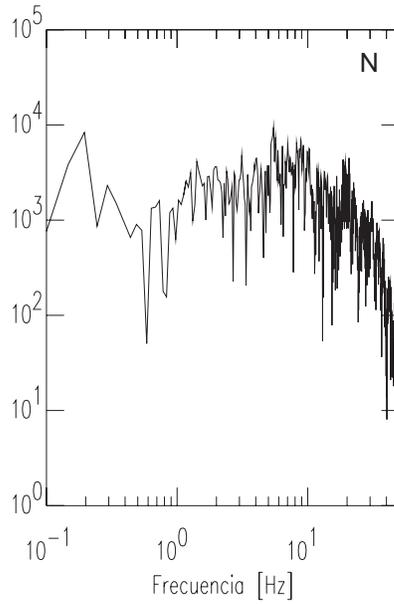
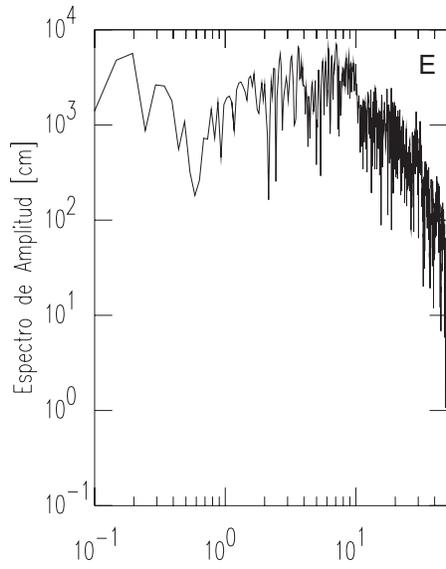
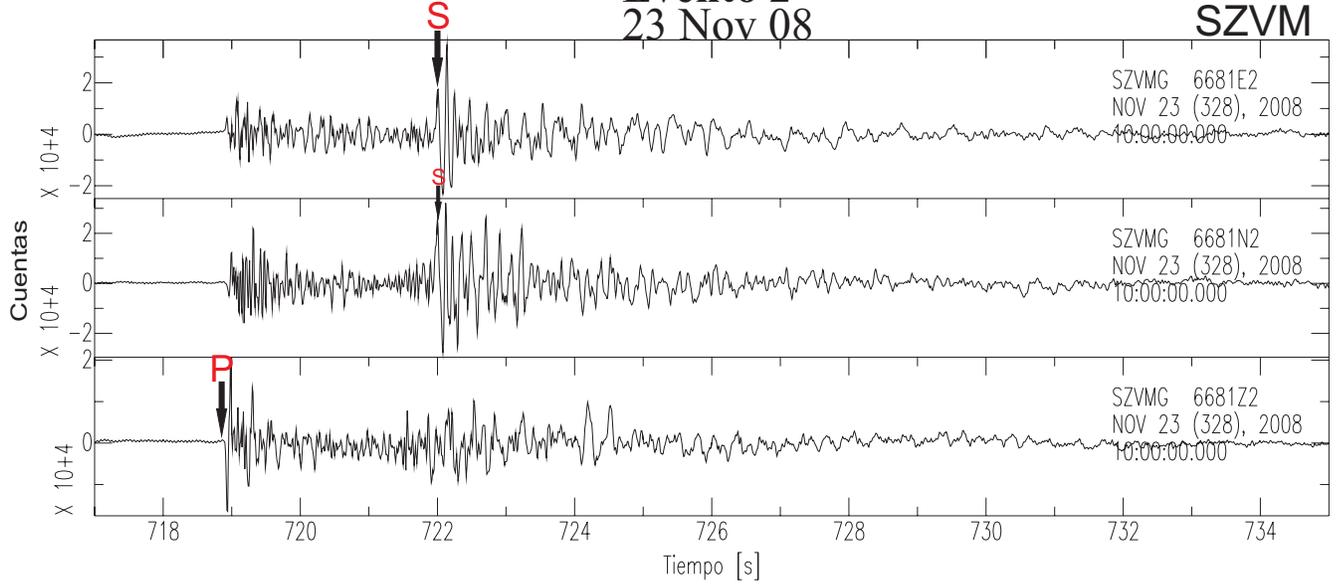


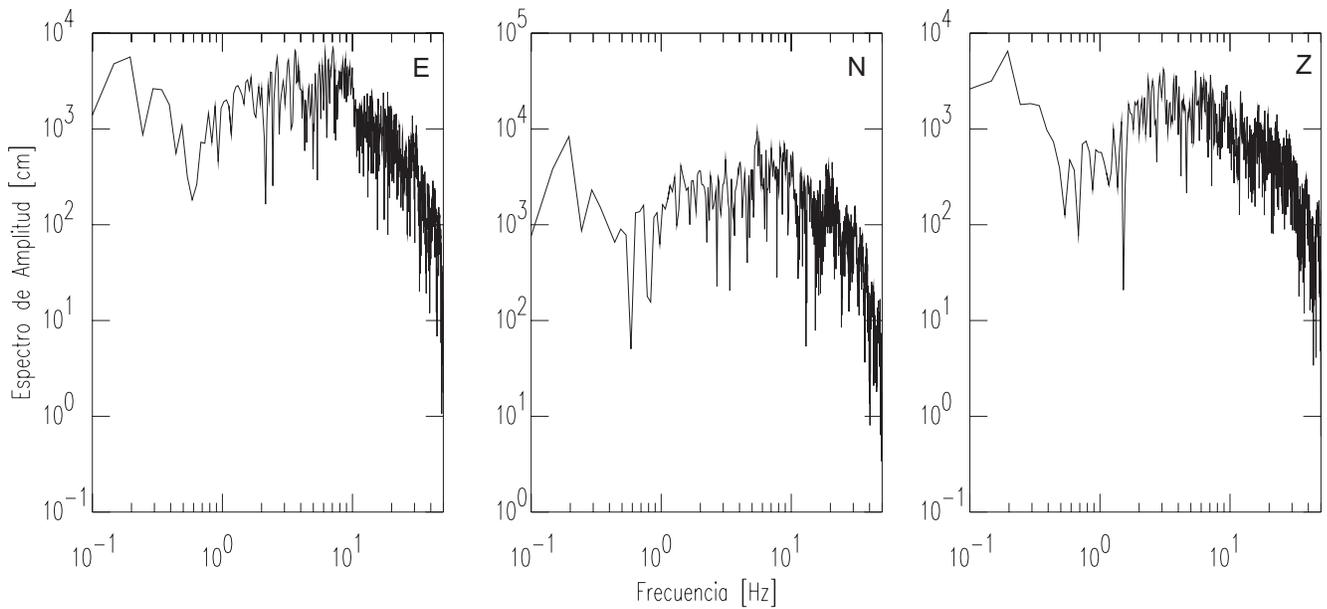
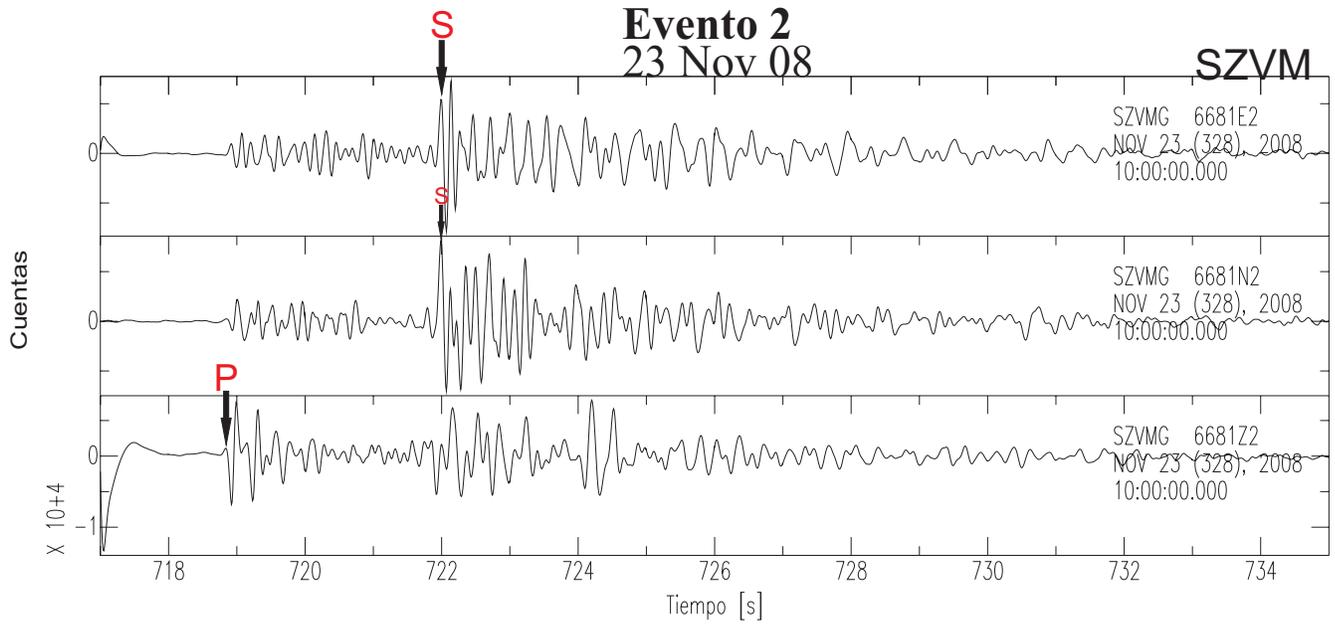


Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

Evento 2 23 Nov 08

SZVM

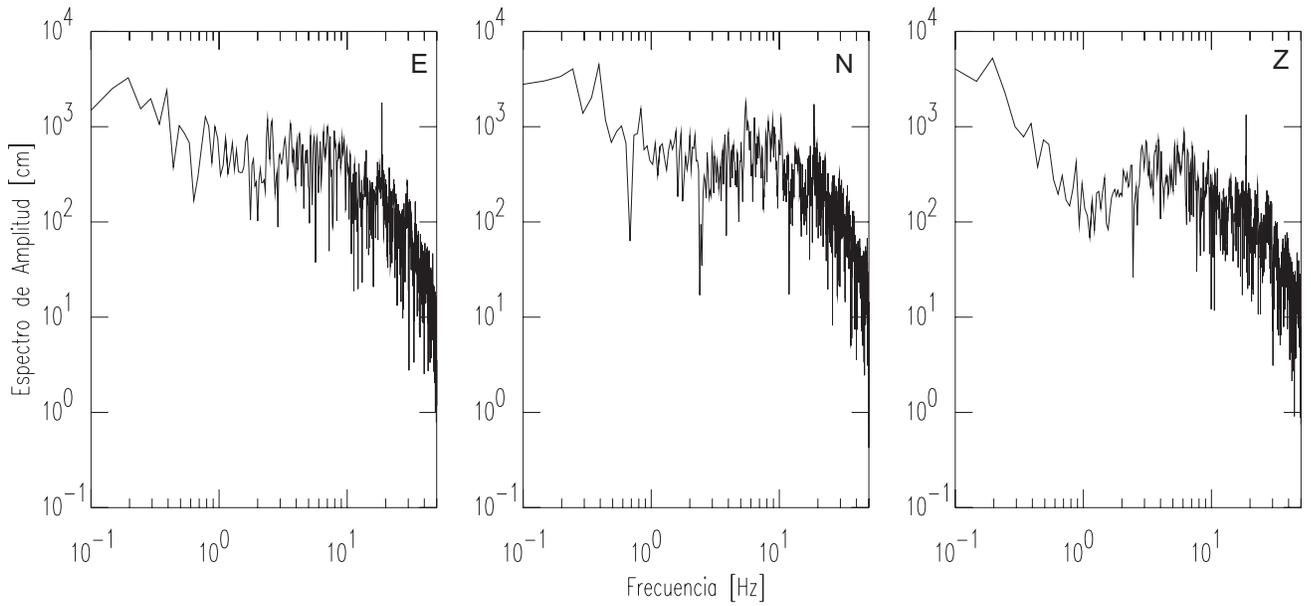
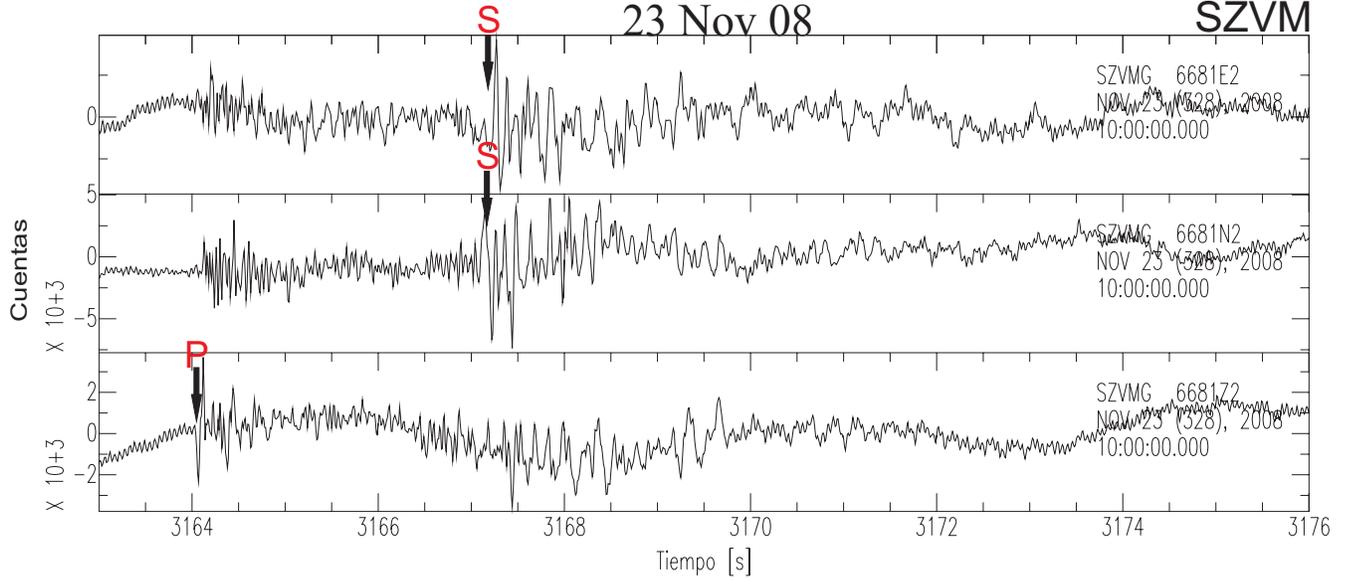


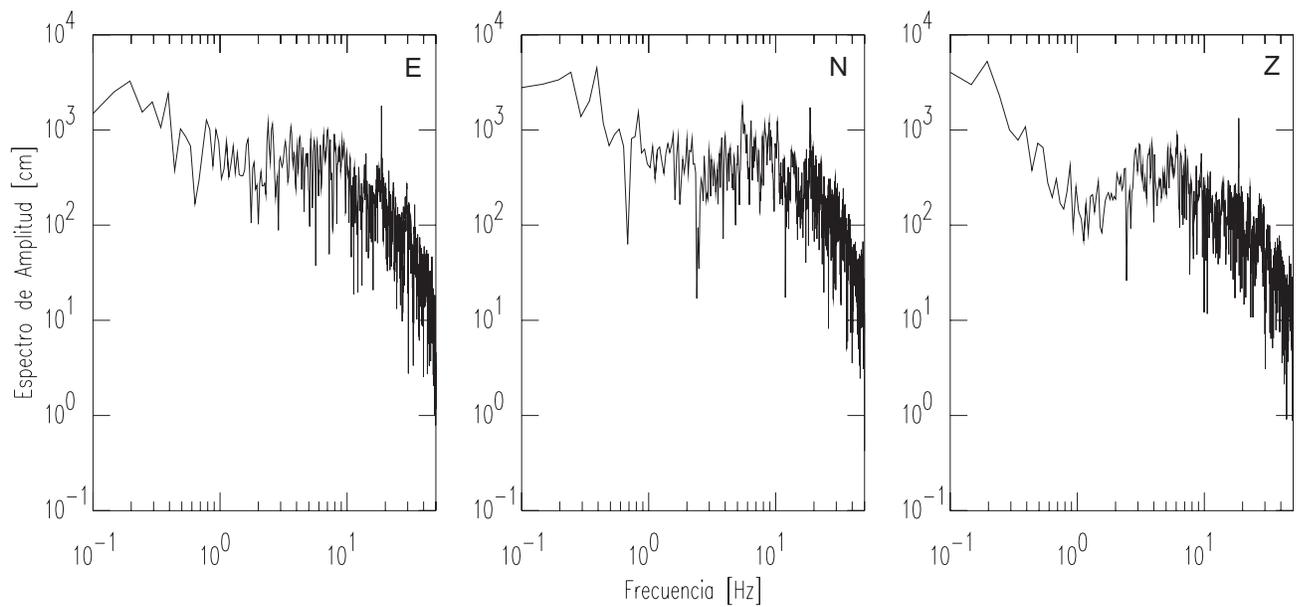
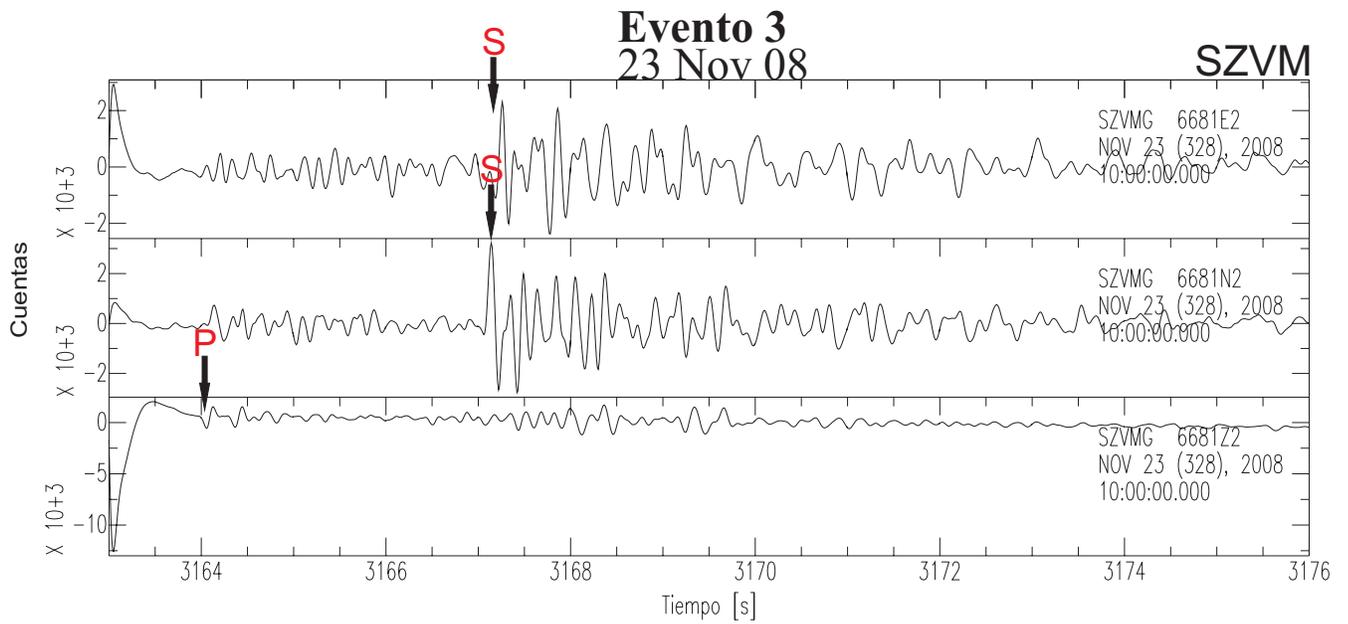


Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

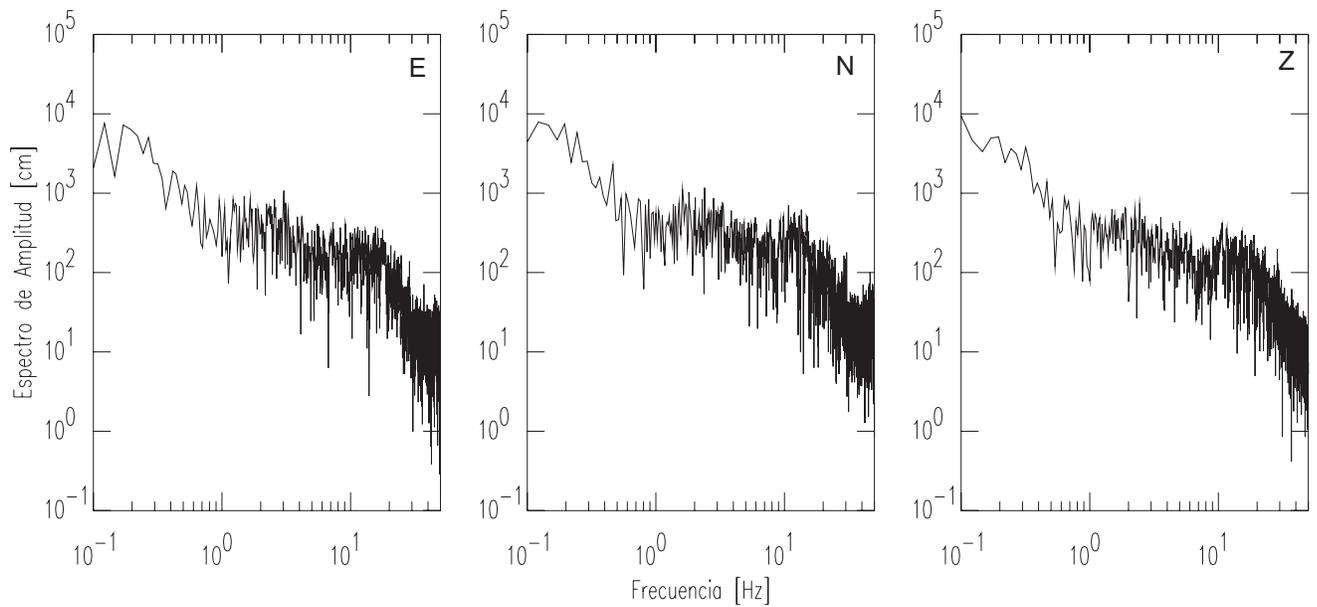
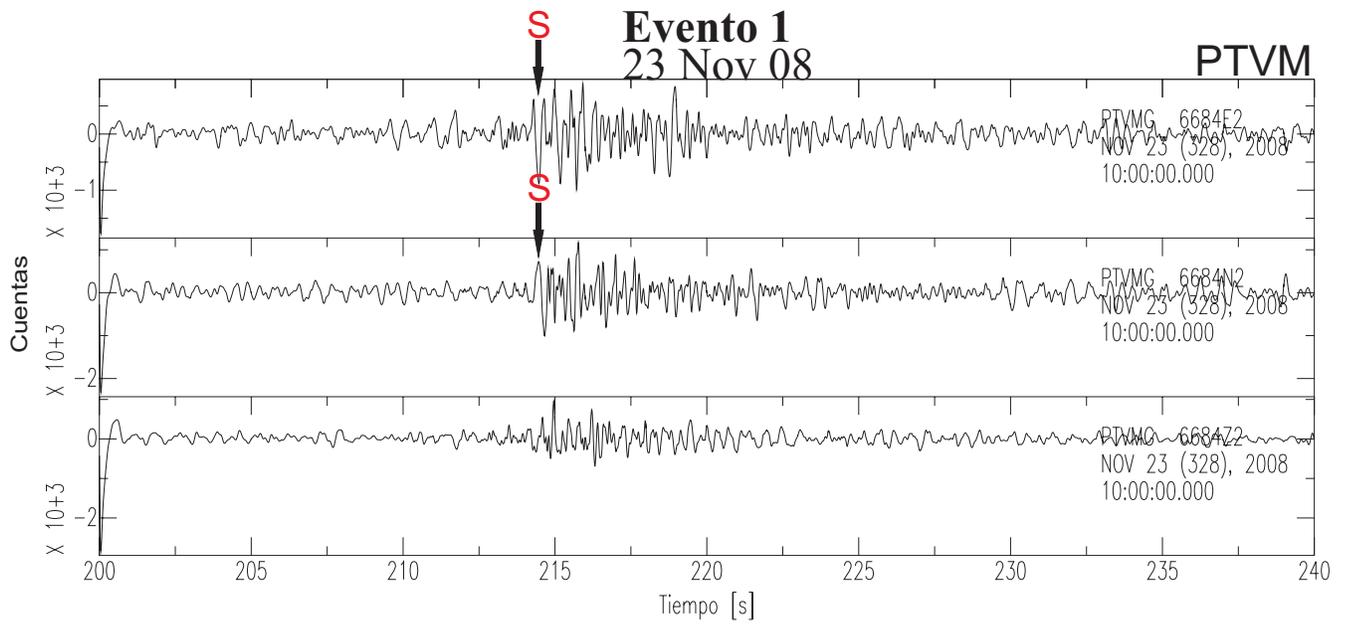
Evento 3 23 Nov 08

SZVM

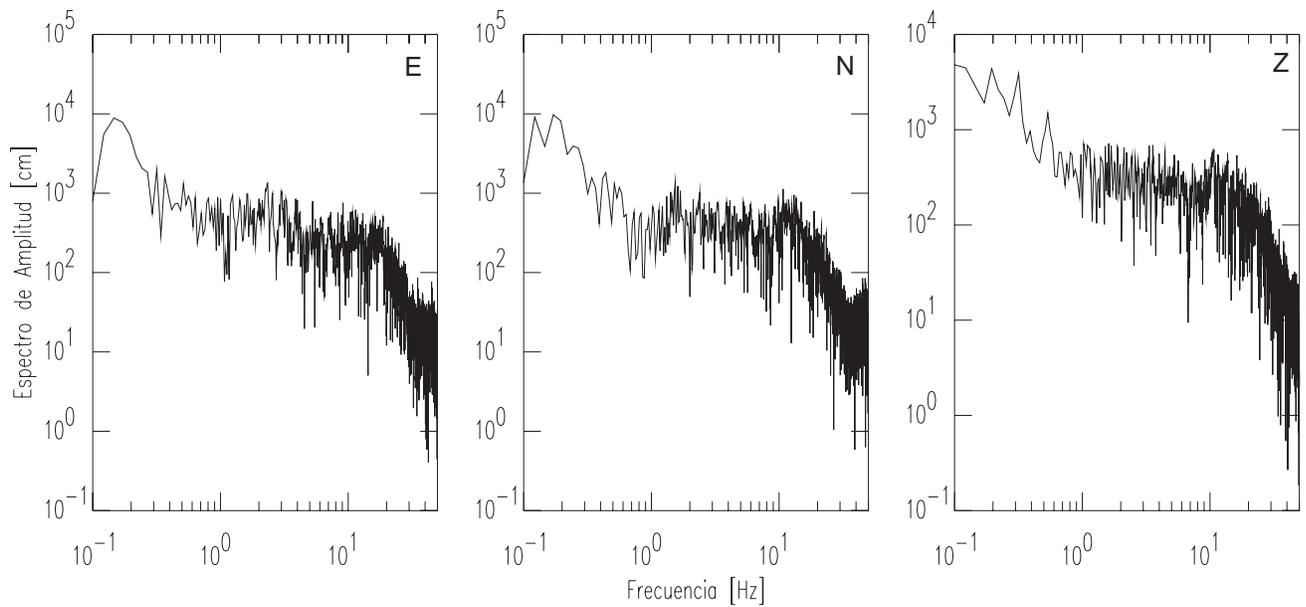
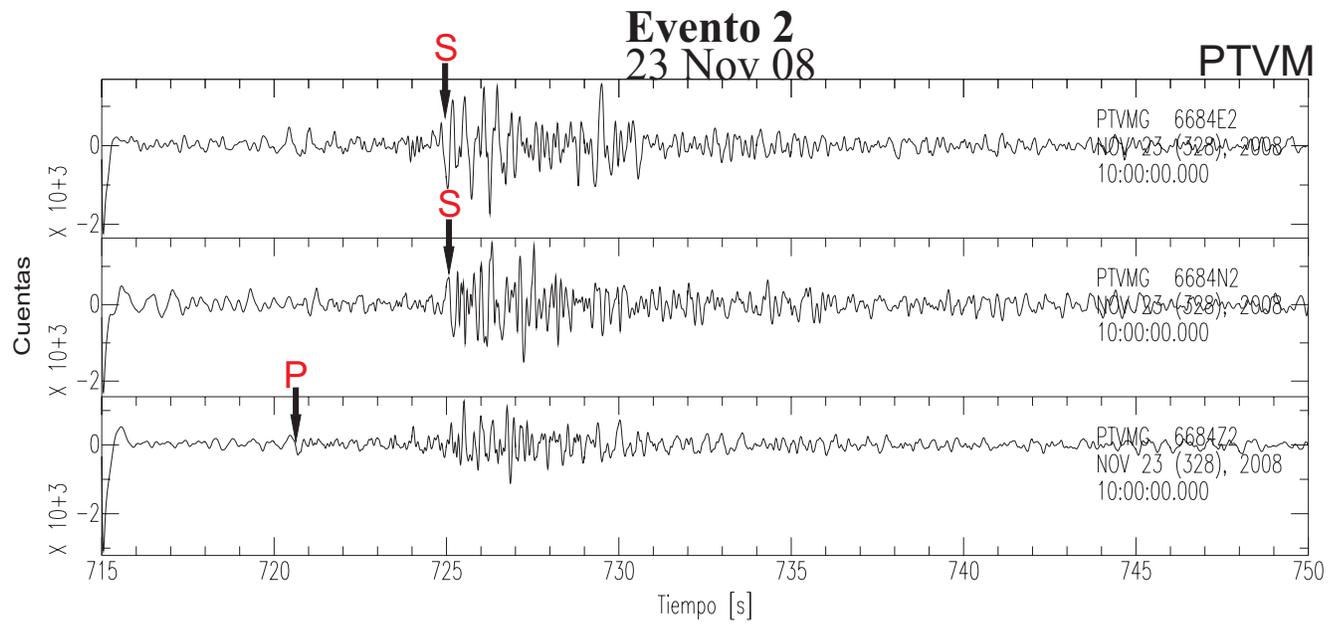




Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.



Evento filtrado con un filtro tipo Butterworth pasabanda de 2 polos en un rango de frecuencias de 1 y 8 Hz.

REFERENCIAS

Cárdenas-Soto, Martín, Chávez-García, Francisco, J. (2007), "*Earthquake ground motion in Mexico City: An analysis of data recorded at Roma array*" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 475 – 486

Chavacán Ávila, M. (2003), "*Parámetros de fuente asociados a la sismicidad del sistema de fallas de la Sierra del Chichinautzin*", UNAM

Cserna, Zoltan de; de la Fuente-Duch, Mauricio; Palacios-Nieto, Miguel; Triay, Leonardo; Mitre-Salazar, L.M.; y Mota-Palomino, Reynaldo, (1988), "*Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones geotectónicas regionales de la Cuenca de México*". Instituto de Geología. Boletín 104, 71 p

Delgadillo Peralta Margarita (2001), "*Un estudio de sismicidad en el Valle de México durante el periodo de 1996 al 2000*" Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM., pp. 18 – 29, 47 – 49.

García-Palomo, Armando; Zamorano, J.J.; López-Miguel, Celia; Galván-García, A.; Carlos-Valerio, V.; Ortega, R.; Macías, J.L., (2008). "*El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central*". Revista Mexicana

Havskov, J. (1982). "*The earthquake swarm of february 1981 in Mexico City*". Geof. Int. Vol.21-2, 1982. Mexico D.F

Havskov, J.; Macías, M., (1983) "*A coda-length magnitude scale for some Mexican stations*", Revista de la Unión Geofísica Mexicana. Vol.22 Num.3

Huesca-Pérez, Eduardo (2008), "*Sismicidad y el campo de esfuerzos en la Cuenca de México*" Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM.

Ishiyama, Yuji (1989), "*Análisis de Riesgo en el Diseño de Hospitales en Zonas Sísmicas*" Organización Panamericana de la Salud, OPS, 203 pag.

Lugo-Hubp, José; Cordero-Estrada, Maricarmen; Zamorano-Orozco, José J. (1995), "*Relieve, Litología y Riesgos en la zona urbana de la delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, México*", Revista mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 12, num. 1. Universidad Nacional Autónoma de México.

Montalvo Arrieta, J. C., Reinoso Angulo, E. y Sánchez Sesma, F. J. (2003). "*Observations of strong ground motion at hill zone sites in México City from recent earthquakes*". Geofísica Internacional. 42, 205-217.

Mooser, Federico; Montiel, Arturo; Zuñiga, Ángel, (1996), "*Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla, Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos*", Comisión Federal de Electricidad, CFE, México.

"*Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Álvaro Obregón*", (1995), <http://www.asambleadf.gob.mx/informac/legisla/programa/alvaro.htm>

Santoyo-Villa, E; Ovando-Shelley, E; Mooser, F; León-Plata, E. (2005). "*Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*". TGC.

UNAM and CENAPRED Seismology Group (1995). "*The Milpa Alta earthquake of January 21, 1995*". Geofísica Internacional, Vol. 34, Num. 4, pp.355-362.