



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Fallamiento asociado a la sismicidad
mayor ocurrida en el Valle de
México durante 2017**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

José Francisco Mendoza Zúñiga

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Luis Quintanar Robles



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

Dedicatoria

A toda mi familia, principalmente y especialmente para mi mamá y mi papá.

Para mis sobrinos: Brandon, Fernanda, Natalia, Emiliano y Santiago,
por ser parte fundamental de mi inspiración día con día.

Agradecimientos

A mi Mamá y a mi Papá. Agradezco todo lo que han hecho por mí, por darme la educación necesaria para convertirme en lo hasta el día de hoy soy, por brindarme su apoyo, por darme tanto cariño y tanto amor, por su motivación, por sus enseñanzas. Gracias por siempre.

A mis hermanos, Saúl y Nayeli. Gracias por sus consejos que me han brindado a lo largo de mi trayecto, gracias por ser mis compañeros y guías en mi vida.

A mis tíos y tías (Rosario, Leticia, Gloria, Alberto, Isabel, Julio) por todo el apoyo brindado, sobretodo por esa enorme confianza que han tenido en mí, muchas gracias por estar ahí cuando más lo necesitaba. Gracias por su cariño, sus enseñanzas y sus consejos.

A mis abuelitos por abrirme las puertas de su casa, por contemplarme día con día en sus oraciones, un agradecimiento muy especial para mi abuelita por todos aquellos desvelos y aquellas ocasiones que tuvo que levantarse temprano, gracias por ser el pilar más importante de la casa.

A Carlos Huitzil y Luis Eduardo por ese apoyo, esa compañía y esos momentos de risas interminables.

Agradezco al Dr. Luis Quintanar por brindarme la oportunidad de poder participar en este trabajo, agradezco su paciencia, la ayuda y conocimientos para elaborar este trabajo, al igual que agradezco la oportunidad de poder conocer más de cerca el Servicio Sismológico Nacional.

Agradezco a la Mtra. Delia Bello y a los analistas del SSN, gracias por su ayuda en la instalación del software requerido y por ayudarme en la aclaración de ciertas dudas.

Agradezco los miembros del jurado por sus observaciones y comentarios, al Dr. Enrique González Torres, al Ing. José Luis Arcos, a la Dra. Ana Lillian y al Dr. Sergio Rodríguez, gracias por tomarse el tiempo y compromiso para revisar mi trabajo.

Al M. en C. Bernardo García Amador por su valiosa y dedicada ayuda, agradezco cada una de sus observaciones, agradezco sus importantes consejos, por su confianza y por su enorme motivación en el proceso de la realización de mi tesis.

A la Dra. Valerie Pompa Vera por ser más que una profesora, por ser una gran amiga. Gracias por sus sabios consejos, gracias por toda esa ayuda que me ha brindado.

A mi querido y gran amigo Hugo. Gracias por esa valiosa amistad de más de once años, tiempo donde hemos compartido tantas cosas, donde he aprendido tantas cosas, y sobre todo donde he conocido a un gran amigo y una grandiosa persona.

A mi compañero de mil batallas, Juan Manuel. Gracias por esa amistad, la Facultad y el fútbol me dieron un gran amigo, agradezco cada uno de esos consejos, por la valiosa ayuda brindada y por esas sacudidas en mis momentos de locura.

Agradecimientos

Al Mtro. Victor Daniel por ser un gran amigo, por ser mi consejero académico, por esas salidas y pláticas interesantes desde el día que nos conocimos.

A Karen por convertirse en una persona especial y estar ahí cuando más lo necesitaba, por ser mi compañera de desvelos e intercambio de ideas en la madrugada.

A Abigail por tantos años compartiendo historias y risas, agradezco cada uno de esos kilómetros recorridos en esas largas caminatas que se convirtieron en agradables charlas. También agradezco la ayuda brindada, especialmente con aquellos ejercicios de álgebra, gracias por esas alegrías, ¿y sabes una cosa?.

A lo largo de mi trayectoria académica y personal he conocido grandes personas, las cuales se convirtieron en amigos y han sido parte importante en mi vida. Quisiera poner el nombre cada uno, pero la lista sería enorme y no acabaría pronto, agradezco a cada uno de mis amigos y amigas, que aunque no vean su nombre por aquí saben muy bien lo especial e importante que han sido para mí, gracias por su valiosa amistad, gracias por tanto cariño, gracias por sus consejos y ayuda. Los amigos son como las estrellas, no siempre los puedes ver pero sabes que están ahí.

Por último, pero no menos importante, agradezco mi amada Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi casa, por darme el privilegio de estudiar y pertenecer a una de las mejores universidades a nivel mundial. Gracias por brindarme los conocimientos y la mejor educación para convertirme en Ingeniero. Gracias por cada uno de los recursos brindados, gracias por darme la oportunidad de conocer tantas personas importantes. Agradezco a mi amada Facultad de Ingeniería, gracias por tantas alegrías, por esos desafíos encontrados y por esas amistades encontradas en los salones de clases (compañeros y profesores). ¡Gracias por tanto, querida Alma Máter, UNAM!

EN MEMORIA †
En memoria de mi Padre,

Hoy recuerdo todo lo que cabalgamos juntos por la vida
y te agradezco tu educación, tus valores, tu paciencia
pero sobre todo tu amor, lo logramos.
Tu ausencia me duele pero tu recuerdo siempre me hará sonreír.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iv
1. Introducción	1
2. Marco Geológico	3
Faja Volcánica Transmexicana	3
Cuenca de México	4
Origen	4
Marco Estratigráfico	6
Sistema de Fallas	17
Zonificación de la Ciudad de México	24
3. Antecedentes sísmicos	26
Sismología	26
Ondas sísmicas	27
Magnitud e Intensidad	30
Fallas	31
Mecanismos Focales	33
4. Metodología	38
Red Sísmica del Valle de México	38
Metodología	39
5. Resultados	46
5.1 Localización de los sismos (2017)	46
5.2 Resultados de los mecanismos focales	47
5.3 Relación de los sismos con las fallas	49
6. Discusión de resultados	53
6.1 Los mecanismos focales y las fallas cartografiadas	53
6.2 Sismicidad de la Cuenca de México y su relación con los sismos > 6.0	54
6.3 La sismicidad y su relación con la subsidencia en la Ciudad de México	55
6.4 Recurrencia de sismicidad de la Cuenca de México	57
7. Conclusiones	58
Referencias	61
Apéndice	64

RESUMEN

México se ubica en una región sísmicamente activa debido a la interacción de cinco placas tectónicas: Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe. La mayoría de los sismos ocurren a lo largo de la costa del Pacífico en donde se extiende la zona de subducción. Mientras que a diario se presentan sismos de magnitudes pequeñas por todo el territorio mexicano, en algunas zonas son más frecuentes que otras. Particularmente, durante el año 2017 se registró un alto número de eventos sísmicos en la Cuenca de México, que al compararlo con los registros sísmicos de los últimos años se puede observar una diferencia entre la cantidad de sismos totales. Dicha eventualidad ha motivado entender el fenómeno de la alta sismicidad de la Ciudad de México para ese año y su posible relación con la actividad tectónica de la región. En este trabajo se determina el tipo de fallamiento en la sismicidad local de la Cuenca de México en 2017, indagando en las probables causas del origen y del aumento de esa sismicidad, como un objetivo general.

Los primeros capítulos establecen el área de estudio y las características geológicas de la Cuenca de México, destacando la estratigrafía, las fallas geológicas y la información geotécnica del subsuelo. Posteriormente, se presenta una recopilación de las señales sísmicas, la cuales fueron obtenidas de la Red Sísmica del Valle de México (RSVM) y de algunas estaciones de la red del Servicio Sismológico Nacional (SSN).

Los resultados muestran que la magnitud de los 44 eventos sísmicos registrados para el 2017 es baja, en un rango de 1.3 a 3.3 Mc, considerados sismos someros por su poca profundidad, en un rango de 1 a 15 km. Los sismos se distribuyen por toda la zona de estudio, aunque en el suroeste de la Ciudad de México es donde se encuentran el mayor número de eventos (14). Con los sismogramas de los eventos registrados, todos ellos con origen en la Cuenca de México, cuya señal fuera clara, que no presentaran mucho ruido y se distinguiera la llegada de la onda P, se realizó un análisis detallado. Dichos eventos se analizaron mediante el método de los primeros arribos; de esta manera se determinó el mecanismo focal de cada uno de los eventos. Finalmente, se realizó un análisis donde se hace una comparación entre la orientación de los planos de falla de los sismos con la orientación de las fallas localizadas en la Cuenca de México. Los diferentes tipos de mecanismos focales obtenidos corresponden a fallas de tipo normal, tipo inverso y tipo transcurrente, siendo este último el que presenta mayor cantidad de registros.

Los resultados evidencian que la sismicidad está relacionada directamente con sistemas de fallas existentes en la zona, lo que nos indica la presencia de fallas activas en la Cuenca de México. En este trabajo, los mecanismos focales obtenidos son fundamentales, ya que con estos resultados se encontraron correlaciones con la orientación de algunas fallas cartografiadas previamente, siendo las fallas que se localizan en la Sierra de las Cruces (occidente de la Cuenca) las que presentan mayor similitud con la orientación de los mecanismos obtenidos.

Asimismo, también se concluye que la ocurrencia de sismos de magnitud ≥ 6 Mc producidos fuera de la Cuenca de México, es uno de los posibles factores que dieron origen al aumento de los eventos sísmicos en el área de estudio.

ABSTRACT

Mexico is located in a seismically active region due to the interaction of five tectonic plates: North America, Cocos, Pacific, Rivera and Caribbean. Most earthquakes occur along the Pacific coast where the subduction zone extends. While earthquakes of small magnitudes occur daily throughout the Mexican territory, in some areas they are more frequent than others. In particular, during the year 2017 a high number of seismic events were registered in the Mexico Basin, which when compared with the seismic records of recent years, a difference between the number of total earthquakes can be observed. This eventuality has motivated the understanding of the phenomenon of the high seismicity of Mexico City for that year and its possible relationship with the tectonic activity of the region. In this work, the type of faulting in the local seismicity of the Mexico Basin in 2017 is determined, investigating the probable causes of the origin and the increase of this seismicity, as a general objective.

The first chapters establish the area of study and the geological characteristics of the Mexico Basin, highlighting stratigraphy, geological faults and geotechnical information of the subsoil. Subsequently, a compilation of the seismic signals is presented, which were obtained from the Seismic Network of the Valley of Mexico (RSVM) and from some stations of the National Seismological Service (SSN) network.

The results show that the magnitude of the 44 seismic events recorded in 2017 is low, in a range from 1.3 to 3.3 M_c , considered shallow earthquakes due to their shallow depth, in a range from 1 to 15 km. The earthquakes are distributed throughout the studied area, although in the southwest of Mexico City is where the greatest number of events are found (14). With the seismograms of the recorded events, all of them originating in the Mexico Basin, whose signal was clear, that did not present much noise and the arrival of the P wave could be distinguished, a detailed analysis was carried out. These events were analyzed using the first arrivals method; In this way, the focal mechanism of each of the events was determined. Finally, an analysis was carried out where a comparison is made between the orientation of the fault planes of the earthquakes with the orientation of the faults located in the Mexico Basin. The different types of focal mechanisms obtained correspond to failures of the normal type, inverse type and strike-slip type, the last being the one with the largest number of records.

The results show that seismicity is directly related to existing fault systems in the area, which indicates the presence of active faults in the Mexico Basin. In this work, the focal mechanisms obtained are fundamental, since with these results correlations were found with the orientation of some

previously mapped faults, being the faults located in the Sierra de las Cruces (western Basin) which they present greater similarity with the orientation of the mechanisms obtained.

Likewise, it is also concluded that the occurrence of earthquakes of magnitude ≥ 6 Mc produced outside the Mexico Basin is one of the possible factors that gave rise to the increase in seismic events in the studied area.

1. Introducción

La Cuenca de México se encuentra conformada por tres entidades federativas: el estado de México, el estado de Hidalgo y la Ciudad de México, la zona de estudio de este trabajo es el Valle de México, aunque en términos geológicos esa definición no es correcta, pero coloquialmente se utiliza ese término para llamar al área metropolitana que se conforma por la Ciudad de México y por ciertos municipios que se encuentran a su alrededor. Para ser más precisos, la zona de estudio de este trabajo se enfoca particularmente en la región que comprende las siguientes coordenadas: 19°00'–19°45' Norte y 98°45'–99°20' Oeste.

Como ya se mencionó, la estructura principal que constituye a la Cuenca de México es la Ciudad de México, dicho lugar es una de las ciudades con mayor importancia en la República Mexicana, siendo así la capital del país. La Ciudad de México tiene una de las mayores concentraciones humanas del mundo, característica que la hace ser catalogada como una de las diez ciudades más pobladas a nivel mundial.

Con el paso de los años la actividad sísmica se ha convertido en uno de los fenómenos naturales que más ha preocupado a la población mexicana, ya que ha sido un tema muy importante por su ocurrencia y su riesgo. Dicho tema ha atraído la atención de mucha gente por querer saber cuándo y en dónde va a ocurrir algún sismo, sin embargo, no existe algún mecanismo predictivo que permita alertarnos ante la inminencia de un temblor. Debido a la ubicación tectónica y a la formación de la Cuenca de México se encuentra expuesta a ciertas amenazas por fenómenos naturales, de las cuales una de las más importantes son los sismos.

A través del tiempo se han registrado cierto número de eventos sísmicos con epicentro en la zona de estudio seleccionada, de los cuales no se han desarrollado muchos trabajos para conocer la causa de esos sismos y el aumento de la sismicidad si es que existe. Haciendo una comparación del número de sismos en los últimos diez años, como se observa en la **Figura 1** los datos estadísticos arrojados en dicha comparación muestran que la cantidad de sismos que se registraron durante el año 2017 ha sido la

más alta en los últimos 10 años. Los datos muestran una notable diferencia entre el número de eventos ocurridos, haciéndose notar el aumento de sismos en ese año.

Este trabajo tiene como propósito precisar los factores que han influido en el origen de los sismos. Para ello, se realizará una recopilación de los eventos registrados para hacer un análisis detallado y, con los resultados obtenidos, se realizará una asociación con las fallas activas que se encuentran en la Cuenca de México. Este análisis será de vital importancia para determinar el peligro sísmico en la zona político-económica más importante de México. Para alcanzar el objetivo principal propuesto, es necesario establecer las características geológicas de la zona de estudio, discutiendo de manera breve la importancia de la relación con la sismicidad de la zona.

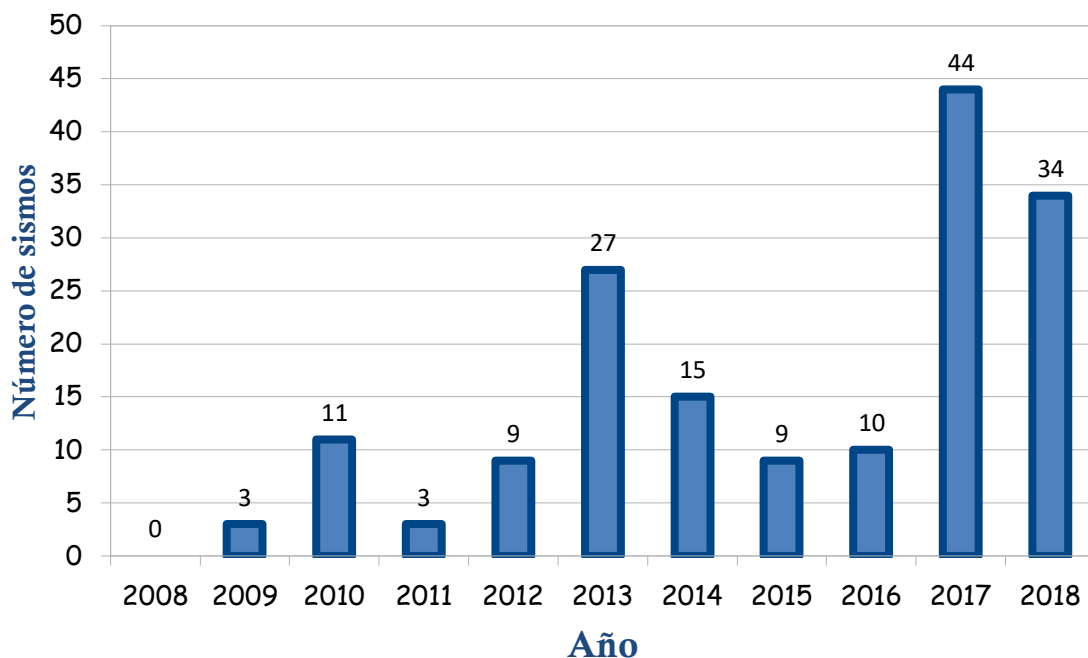


Figura 1.- Comparación de la cantidad de sismos ocurridos en la zona de estudio entre los años 2008 – 2018. Fuente: Datos tomados del SSN, 2019

Dicho trabajo podría ser una herramienta importante para que en un futuro se puedan realizar mapas de riesgo más acertados que ayuden a conocer zonas de mayor peligro sísmico. Dicho sea de paso, también se busca erradicar la mala información que en ocasiones se llega a manejar por los medios o las redes sociales.

2. Marco Geológico

Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), también conocida como el Eje Neovolcánico se encuentra en la parte central de México comprendiendo una superficie de 160,000 km² y una longitud de aproximadamente 1000 km, presentando una orientación Oeste-Este, la cual va desde las costas del Océano Pacífico hasta las costas del Golfo de México, abarcando los estados de Nayarit, Colima, Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Querétaro, Hidalgo, México, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Veracruz y la Ciudad de México. La FVTM se caracteriza por ser un arco magmático continental activo debido a que ocurre como resultado del proceso de subducción de la Placa de Rivera y la Placa de Cocos a lo largo de la Trinchera de Mesoamericana (Middle America Trench) por debajo de la placa de Norteamérica Debido a las diferencias del tipo de vulcanismo y composición química la Faja Volcánica Transmexicana se divide en tres partes: el sector occidental, el sector central y el sector oriental (Gómez-Tuena et al., 2005; Ferrari et al., 2012). La Cuenca de México se encuentra ubicada en el sector oriental de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 2).

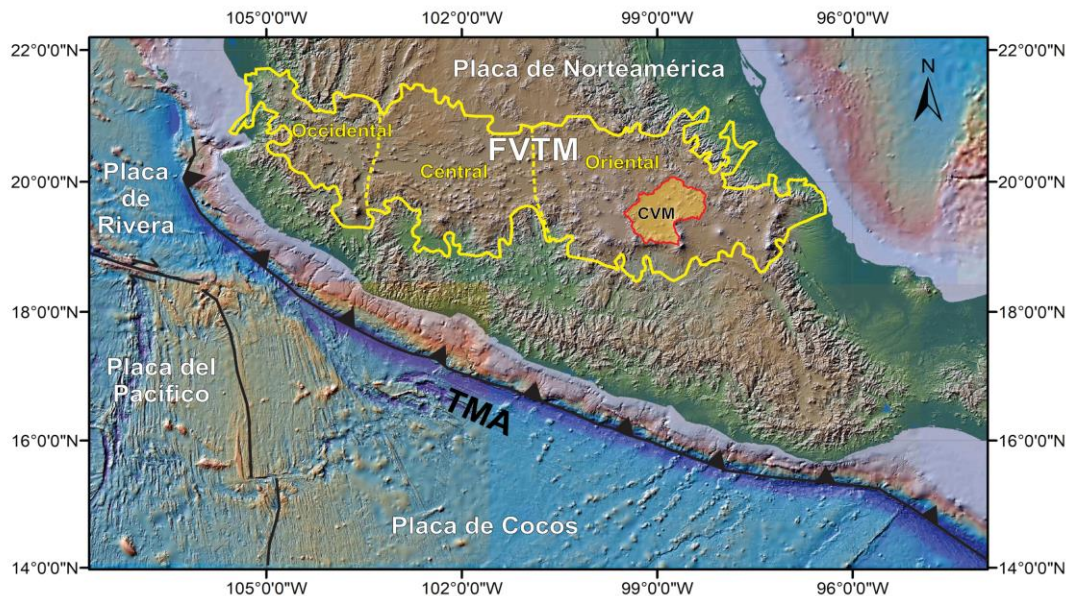


Figura 2.- Ubicación de la Cuenca de México.

CVM: Cuenca de México, FVTM: Faja Volcánica Transmexicana, TMA: Trinchera Mesoamericana

Cuenca de México

La Cuenca de México se encuentra ubicada entre los paralelos 19°00' y 20°00' Norte y los meridianos 98°40' y 99°20' Oeste. La Cuenca comprende aproximadamente una superficie de 7,700 km², de los cuales unos 2,600 km² corresponde a campos volcánicos monogenéticos. Al ser una cuenca que se formó al cerrarse el antiguo Valle de México, se clasifica como una cuenca endorreica de desagüe artificial, en la **Figura 3** se presenta un mapa de elevación de la Cuenca de México donde se visualiza su forma. Los límites geográficos de la Cuenca son: al norte con la Sierra de Pachuca, al oeste por el Volcán Ajusco y la Sierra de las Cruces, al este por la Sierra del Río Frío y la Sierra Nevada y al sur por la Sierra Chichinautzin (De Cserna et al., 1988).

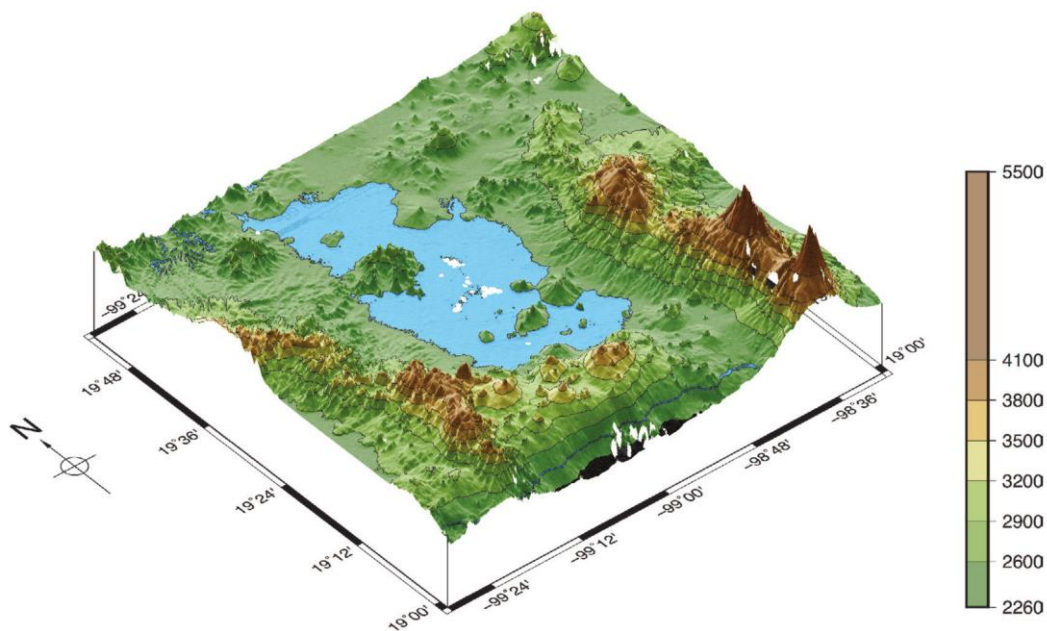


Figura 3.- Mapa de elevación de la Cuenca de México. Tomado de Ruíz-Angulo et al., 2015.

Origen

La evolución geológica de la Cuenca de México comienza en el Cretácico con las rocas depositadas de las Formaciones Morelos y Mexcala. A principios del Paleógeno se ejercieron esfuerzos tectónicos de extensión los cuales ocasionaron que originara un fracturamiento, por las cuales ascendió magma hasta la superficie, y estos flujos de lava formaron grandes aparatos volcánicos. Se han realizado estudios para analizar el

contenido petrográfico de los materiales desplazados hacia la superficie el cual es muy variado. En la Sierra de Xochitepec, que se encuentra al oeste de Xochimilco y al pie del volcán Ajusco se pueden encontrar depósitos típicos del Paleógeno. Afloramientos de este tipo aparecen en la parte inferior de las Sierra que limitan la cuenca al Este y Oeste, así como en el núcleo de la Sierra de Guadalupe. La actividad volcánica decreció a finales del Mioceno. A juzgar por la superficie final que se destaca en la Sierra de las Cruces, a una altura de 1000 metros sobre el fondo de la zona se interpreta que continuó un período de erosión intensa, la cual regularizó el relieve (Marsal et al., 2016).

Durante el Plioceno se inició una nueva etapa de actividad volcánica en la región de Pachuca y la Sierra de Guadalupe, la cual fue caracterizada por emitir grandes masas de material volcánico, las cuales se encuentran localizadas actualmente en la cima de las sierras, particularmente en el Cerro del Chiquihuite. Posteriormente aparecen los derrames andesíticos de la Sierra Nevada y de la Sierra de las Cruces, las cuales se encuentran cubiertas por lavas del Iztaccíhuatl y del Ajusco. En el Cerro del Peñón de los Baños, el Tigre y las prominencias al Sureste de la Sierra de Guadalupe también hay presencia de restos visibles (Marsal et al., 2016).

Al extinguirse estos volcanes, la actividad se manifiesta en la parte septentrional de la cuenca con potentes derrames de andesitas basálticas que interrumpen toda conexión directa con el norte. También durante este periodo se registra un mecanismo tectónico que se encuentra ligado a la Falla Clarión que disloca la corteza en grandes bloques a lo largo de fracturas dirigidas de NNW a SSE. También se producen fuertes emisiones de nubes ardientes, cuyos testigos son los depósitos de piedra cantera que se observan rodeando al Cerro de El Guajolote, al norte del Santuario de los Remedios. Durante el Plioceno Tardío debido al clima semiárido y lluvias torrenciales ocurre una erosión al relieve abrupto, que depositaron en los flancos poniente y oriente de la Cuenca, extensos abanicos aluviales integrados por fragmentos andesíticos, produciendo la destrucción de los complejos volcánicos del Paleógeno. En este periodo se encuentra la Formación Tarango, cuya característica que sobresale es la ausencia de lavas. Se le considera posterior al vulcanismo del Plioceno. Posteriormente, siguieron

desarrollándose abanicos aluviales hasta el Pleistoceno Temprano, en el cual no se tiene registro fósil (Marsal et al., 2016).

El periodo Pleistoceno es el último ciclo de vulcanismo, cuyas manifestaciones aún persisten en nuestros días. Las fracturas por las que surgieron las lavas están orientadas de SW a NE. El clima húmedo y frío de este período y las formaciones de grandes glaciares en el Iztaccíhuatl y el Popocatépetl causaron la destrucción de gran parte de los depósitos de la Formación Tarango, labrando profundas barrancas y los dos valles principales que desaguaban por el sur, en el río Amacuzac (Marsal et al., 2016).

Marco Estratigráfico

La estratigrafía de la Cuenca de México puede resumirse brevemente a partir del Cretácico Superior con las rocas calcáreas de la Formación Morelos, hasta finalizar con los depósitos lacustres del Cuaternario. A continuación, se presenta un resumen de las formaciones que conforman el marco estratigráfico de la Cuenca de México, dichas formaciones geológicas que se describen se logran visualizar de mejor manera en la columna estratigráfica de la **Figura 4**.

Cretácico

Formación Xochicalco

La Formación Xochicalco es una secuencia de rocas calizas de tipo calcilutíticas y calcilimolíticas del Cretácico Inferior que se componen en capas de tamaño delgado a medianas que presentan laminación fina, también presentan un contenido carbonoso variable y abundantes vetillas de calcita. Hacia la parte de arriba de la Formación aumenta el contenido de capas laminares y los contenidos de nódulos de pedernal. Es la unidad más antigua que se ha reconocido, dicha Formación se encuentra en el límite sudoccidental de la Cuenca de México. La Formación Xochicalco presentan un espesor que excede los 500 m, su base no está expuesta, y está cubierta por la Formación Morelos, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Formación Morelos

Esta Formación está constituida por una interestratificación de capas gruesas de rocas calizas y dolomías diagenéticas, donde en la parte basales se encuentran anhidritas laminares. La Formación Morelos se encuentra al sur de la Sierra Chichinautzin con un espesor máximo de 900 m, su grosor se hace menor hacia el oriente y poniente. Su edad de depósito fue durante el Albiano Medio – Cenomaniano Inferior en un ambiente de plataforma marina extensa, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Formación Cuautla

En esta formación se identificaron tres facies, las cuales son de cuenca, de plataforma y de litoral, dichas facies presentan una edad que van del Cenomaniano Tardío al Turoniano Tardío. Las facies que más predominan son las de plataforma, que afloran al sur de la Sierra Tepoztlán (a una altura promedio de 1,500 msnm) y al norte de Zumpango (a una altura promedio de 2,400 msnm).

La Formación Cuautla se encuentra conformada por calcarenitas que presentan estratificación gruesa con abundantes biostromas de rudistas. Dicha Formación es concordante con la Formación Mexcala, que se encuentra suprayaciéndola y, esta a su vez se encuentra cubierta discordantemente en algunas zonas por el Grupo Balsas y por rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario.

De los estudios de sísmica de reflexión (Pérez-Cruz, 1988) realizados en la Cuenca de México arrojaron que la cima de esta unidad en el subsuelo se encuentra distribuida en el sector meridional de la cuenca junto con la Formación Morelos, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Formación Mexcala

Esta Formación se encuentra dominada por calizas arcillosas de color gris oscuro, las cuales presentan abundantes foraminíferos planctónicos, calcisferúlidos y radiolarios, la cual hay una interestratificación gradual rítmica de grauvacas, limolitas y lutitas con un

espesor máximo de 1500 m. La edad definida de dicha Formación es del Turoniano-Maestrichtiano y aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y en el cerro La Palma, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Paleógeno

Granito Colotepec

Se ubica en el extremo sudoccidental intrusionado a la Formación Xochicalco en el núcleo del anticlinal de Colotepec. Se describe como una monzonita cuarcífera por **Fries (1960)** y a partir de relaciones estratigráficas se le da una edad entre el Cenomaniano Tardío y el Turoniano, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Grupo Balsas

Son depósitos continentales con una edad que va del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano, dicho grupo se encuentra por debajo de la cuenca, eso se sabe por algunas muestras encontradas en las perforaciones profundas (PEMEX, 1987) (Vázquez-Sánchez et al., 1989; Arce et al., 2019).

El Grupo Balsas consta de un conglomerado oligomítico de caliza compacto de una matriz limo-arcillosa cementada por calcita y óxidos de hierro, de estratificación masiva y un espesor máximo de 500 m, estas capas se interdigitan y se encuentran cubiertas por una secuencia que tiene un espesor de entre 800 a 2,000 m que se compone de capas deleznales de arcilla, limo y arena. Localmente estos depósitos contienen interestratificaciones de yeso y caliza lacustre lenticulares, además de derrames basálticos y en la parte superior hay presencia de intercalaciones de toba riolítica, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Rocas volcánicas del Mioceno Temprano

Esta secuencia de rocas volcánicas se agrupa mediante sus características líticas, relaciones estratigráficas y su edad, las cuales se diferencian de las rocas extrusivas del Grupo Balsas y aquellas del Mioceno Medio-Tardío. La composición de esta secuencia varía de andesítica a riódacítica, aunque en los pozos de Copilco -1, Mixhuca -1 y Roma -1 se describen derrames lávicos basálticos. Las perforaciones profundas realizadas por PEMEX (1987) y SHCP (1969) han arrojado como resultado que estas rocas atraviesan espesores variables entre 390 m y 1,750 m. Dichas rocas afloran profundamente erosionadas y fracturadas en la Sierra de Xochitepec, en el cerro Picacho, el cerro Púlpito del Diablo y otras localidades.

Los fechamientos radiométricos que se le han realizado a través de los años han arrojado como resultado que las rocas volcánicas fueron formadas por varios períodos magmáticos durante el Oligoceno Tardío y Mioceno Temprano, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Rocas extrusivas del Mioceno Tardío

Son rocas que presentan una intercalación de depósitos de lavas, piroclásticos y lahares que varían en su composición desde andesitas hasta dacitas. Dicha unidad se encuentra distribuida por toda la cuenca en áreas pequeñas, en las cuales la mayoría de los casos se encuentra cubierta por los materiales volcánicos más recientes. En la porción sur de la Cuenca se encuentran principalmente en los cerros El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños y en la base de la Sierra de Guadalupe, la base de la Sierra de Las Cruces, el cerro Patlachique y en algunos afloramientos en el norte de Texcoco. En la porción norte se encuentra ampliamente distribuidos en pequeños afloramientos, de los cuales destaca la base en la Sierra Tepetzotlán, están constituidos por tobas, brechas volcánicas y lavas predominantemente andesíticas que en algunos lugares se encuentran interestratificadas con brechas volcánicas, esta unidad aflora en el pozo Texcoco-1, en el Pozo Roma-1, Mixhuca-1, en el Tulyehualco y en el pozo Copilco-1 en distintas profundidades (Vázquez-Sánchez et al., 1989; Arce et al., 2019).

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano

Los flujos lávicos que son más máficos presentan exfoliación regular horizontal con vesículas alargadas en dirección del derrame, lo cual nos podría indicar que son regímenes de flujo laminar con alto contenido de volátiles. Los flujos lávicos que son más ácidos tienen incipiente estructura fluidal y los domos presentan bandeamiento fluidal irregular; las lavas son de grano fino a medio. Estas rocas afloran en los flancos de las Sierras de Las Cruces, Zempoala y Río Frío, y en cerros aislados en el resto de la cuenca, también coronan las Sierras de Guadalupe y Tepetzotlán, los afloramientos de estas rocas exponen espesores del orden de 650 m. La edad tentativa que se maneja para este grupo de rocas volcánicas es del Plioceno Temprano, debido a sus relaciones estratigráficas, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Formación Otomí

En esta Formación se agruparon los productos volcánicos emitidos durante el principio del Plioceno Tardío, los cuales se encuentran ubicados al occidente de la Cuenca de México, en lo que se conoce como Sierra de Monte Alto. Dicha unidad se caracteriza por estar formada en su mayor parte de depósitos piroclásticos, los cuales se presentan como flujos lobulados. Se encuentran depósitos de oleadas piroclásticas ricas en cristales, seguidas por flujos piroclásticos de ceniza ya sea cristalina o vítrea. En ocasiones hay presencia de estructuras lenticulares de surgencias intercaladas en los depósitos de flujos piroclásticos, también se encuentran brechas volcánicas; la mayor parte de estos depósitos se encuentran cubiertos por depósitos de ceniza vítrea con abundantes líticos accidentales. A esta unidad se le estima un espesor de aproximadamente de 300 m y su edad considerada es del Plioceno Tardío, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

Rocas volcánicas máficas del Plioceno Tardío

Esta unidad se encuentra compuesta por rocas máficas, las cuales se localizan ampliamente distribuidas en la región septentrional formando mesetas de lava y conos aislados. Estas rocas están constituidas por derrames de lava interestratificados con capas de poco espesor de brechas volcánicas y/o piroclastos que se consideran como depósitos piroclásticos y clastos aluviales del Plioceno. La composición varía de basáltica a andesítica. A partir de fechamientos isotópicos de K-Ar a las rocas se le ha asignado una edad entre 2.5 y 1.5 Ma, por lo que su edad queda dentro del Plioceno Tardío a la parte inicial del Pleistoceno, ([Vázquez-Sánchez et al., 1989](#)).

Sierra de Las Cruces

La Sierra de las Cruces es una cadena volcánica de 11 km aproximados de longitud, cuya orientación es NNW-SSE, se distribuye en el límite sudoccidental de la Cuenca de México. Consiste en estructuras volcánicas que van de norte a sur, como La Catedral, La Bufa, Iturbide, Chimalpa, Salazar, San Miguel, Ajusco, La Corona, Zempoala, así como otras estructuras pequeñas. Cada estructura volcánica ha producido flujos de lava y domos que se construyeron las partes más altas de estas, mientras que, en las partes bajas, se constituye por depósitos piroclásticos que se encuentran con intercalaciones de lahares y detritos de depósitos de avalancha. Las rocas de la Sierra de las Cruces presentan una composición variable entre andesita y dacita ([Arce et al., 2019](#)).

Dicha Formación cubre en discordancia erosional a las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío y a las rocas volcánicas del Plioceno Temprano. Mientras que la Formación se encuentra cubierta por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario, derrames lávicos y piroclásticos de las Sierras Chichinautzin y El Pino.

Se estima que la Formación de la Sierra de Las Cruces tiene una edad que corresponde al Plioceno Tardío, eso mediante los resultados arrojados por los fechamientos isotópicos, ([Vázquez-Sánchez et al., 1989](#)).

Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno

A los depósitos no diferenciados relacionados genéticamente con la actividad piroclástica y fluvial de todo el Plioceno se le asigna esta clasificación, estos depósitos afloran al poniente de Cuautla.

En el sector septentrional se forman extensas llanuras y piedemontes aluviales. El espesor máximo es de 400 m y se constituye de gravas, arenas, limos y arcillas de constitución volcánica.

En el subsuelo de la porción meridional de la cuenca, dichos depósitos constan de tobas, brechas volcánicas y aglomerados, con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas, se encuentran cubiertos discordantemente por aluvión del Cuaternario y están acumulados por fosas tectónicas (graben de Chalco) y rellenando amplios valles surcados en rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno; el espesor máximo es de 750 m. La edad de estos depósitos es del Plioceno, eso sugerido por sus relaciones estratigráficas, ([Vázquez-Sánchez et al., 1989](#)).

Cuaternario

Sierra Nevada

La Sierra Nevada se encuentra ubicada en la porción oriental de la Cuenca de México, cuya orientación es N-S. Se conforma de estratovolcanes de norte a sur, que son Tláloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl. La composición química de las rocas de Sierra Nevada varía entre andesita y riolita para las estructuras de Tláloc y Telapón, mientras que la composición que presentan los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl se extiende desde andesita hasta dacita. En esta sierra también se conforma por flujos de lava y domos, interpuestos con depósitos piroclásticos en la parte alta, en la parte baja de los complejos volcánicos se encuentran intercalaciones de depósitos piroclásticos y epiclásticos, así como detritos de depósitos de avalancha. Parte del material que se encuentra en estos abanicos rellenan porción de la zona oriental de la Cuenca ([Arce et al., 2019](#)).

Formación El Pino

Esta Formación la conforman las rocas volcánicas, las cuales son principalmente máficas. Las que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla, Gordo y otros cerros que se encuentran aislados, así como los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba. Su representación geomorfológica es de conos cineríticos terminales, de volcanes escudo y de amplias coladas lávicas, principalmente en bloques, presentando un espesor del orden de 750 metros. Estas rocas se encuentran constituidas por flujos de lavas con intercalaciones delgadas de tefra no consolidada, con características de un volcanismo estromboliano. Los derrames lávicos son de andesita-basáltica de olivino y los andesíticos de anfíbol; los flujos lávicos son de grano fino a medio. Esta Formación cubre discordantemente unidades volcánicas del Oligoceno, Mioceno, Plioceno; se le tiene asignada una edad de entre 0.9 y 0.7 millones de años, ([Vázquez-Sánchez et al., 1989](#)).

Formación Tláloc

Dicha formación cubre discordantemente rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y del Plioceno Temprano y las formaciones El Pino y Llano Grande; esta formación se encuentra sobreyacida aparentemente con discordancia por las formaciones Chichinautzin e Iztaccíhuatl. La composición de esta formación consta de sucesiones andesítica, latítica y dacítica, en su base se caracteriza por pómez, líticos, surges, flujos de ceniza, de pómez y de bloques, intercalados cubiertos por derrames lávicos, dicha unidad forma parte de la sierra de Río Frío. La edad que se le asigna es entre 0.6 y 0.7 millones de años, ([Vázquez-Sánchez et al., 1989](#)).

Formación Iztaccíhuatl

Está constituido por varias secuencias principalmente efusivas, la cual su composición varía de andesita basáltica a dacítica, las secuencias se inician con derrames lávicos y

finalizan con extrusiones dómicas; el espesor total de esta unidad se desconoce, pero los afloramientos del volcán Iztaccíhuatl exponen un espesor aproximado de 2,500 metros. Dicha formación descansa con ligera discordancia encima de las formaciones Llano Grande y Tláloc, mientras que es suprayacida con ligera discordancia por las formaciones Chichinautzin y Popocatépetl, ([Vázquez-Sánchez et al., 1989](#)).

Formación Popocatépetl

Esta formación edifica el estratovolcán Popocatépetl en la zona sudoriental de la Cuenca de México. Se conforma esta unidad por cuatro secuencias eruptivas; la primera secuencia se inicia con un “blast” piroclástico de 8 m de espesor, constituido por “surges” planares de “sand wave” u olas de arena, ricos en cristales y líticos accidentales tamaño ceniza y lapilli; la segunda secuencia consiste en andesitas básicas ricas en olivino, andesitas ácidas con olivino, piroxenos, andesitas y dacitas; la tercer secuencia la forma el volcán El Fraile, que se inicia con efusiones andesíticas y prosigue con tres periodos explosivos, las cuales se principian con pómez y cenizas plinianas, “surges”, flujos no soldados de cenizas con bloques pumíticos; el cuarto periodo eruptivo inicialmente fue efusivo y posteriormente explosivo, con sucesiones piroclásticas, con contenido de derrames lávicos intercalados, ([Vázquez-Sánchez et al., 1989](#)).

Sierra Chichinautzin

Este complejo volcánico se ubica en la porción sur de la Cuenca de México. La composición química de las rocas de la Sierra Chichinautzin indican un amplio rango, siendo la composición andesita basáltica la de los productos con mayor presencia, también hay basaltos, andesitas e incluso dacitas. Las diferencias que se encuentran entre las edades de las rocas, en la geoquímica y en la orientación de emplazamiento definen que este campo volcánico se encuentra conformado por cuatro grupos diferentes ([Jaimes-Viera et al., 2018](#)).

El vulcanismo más antiguo se encuentra en el Grupo Volcánico Monogenético El Peñón (PMVG), este se inició en la parte norte del área con el volcán Peñón del Marqués y en el sur fue donde ocurrió la última erupción. Después de esta actividad, el vulcanismo monogenético se detuvo aproximadamente 527 mil años, posteriormente se reactivó con el nacimiento del volcán Tezoyuca 1, así dando inicio al segundo grupo, siendo el Grupo Volcánico Chichinautzin Antiguo (Older CMVG). Después de la última erupción, el vulcanismo se detuvo de nueva cuenta, ahora por aproximadamente 60 mil años. Hace aproximadamente 35 mil años, la actividad comenzó de nueva cuenta, ahora en la parte este (cerca del volcán Popocatepetl), con la erupción del volcán Zitlaltépetl, dando inicio al Grupo Volcánico Chichinautzin Joven (Younger CMVG). La Sierra de Santa Catarina (SSC) se encuentra en la parte norte de la Sierra Chichinautzin, en el antiguo lago de Chalco ([Jaimes-Viera et al., 2018](#)).

Depósitos aluviales

Esta unidad la componen el material clástico fluvial acumulado con sedimentos lacustres y depósitos volcánicos del Cuaternario. Afloran al norte y sur de la Cuenca formando llanuras aluviales, se encuentran extensamente distribuidos, relleno de valles socavados en depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno. Los espesores máximos son aproximadamente de 500 m, se encuentran en el centro de las depresiones y se adelgazan hacia los márgenes de la llanura, ([Vázquez-Sánchez et al., 1989](#)).

Depósitos Lacustres

En esta unidad se agrupan sedimentos clásticos y productos piroclásticos que se relacionan con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre. Dichos depósitos forman una altiplanicie lacustre, la cual presenta una altitud promedio de 2,200 m, extendiéndose desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec, sus espesores varían entre los 30 y 300 m, los mayores se presentan en los centros de las planicies de la Ciudad de México y disminuyen hacia los márgenes de las planicies. El origen de

estos depósitos está relacionado con la obstrucción definitiva del desagüe de la Cuenca de México, (Vázquez-Sánchez et al., 1989).

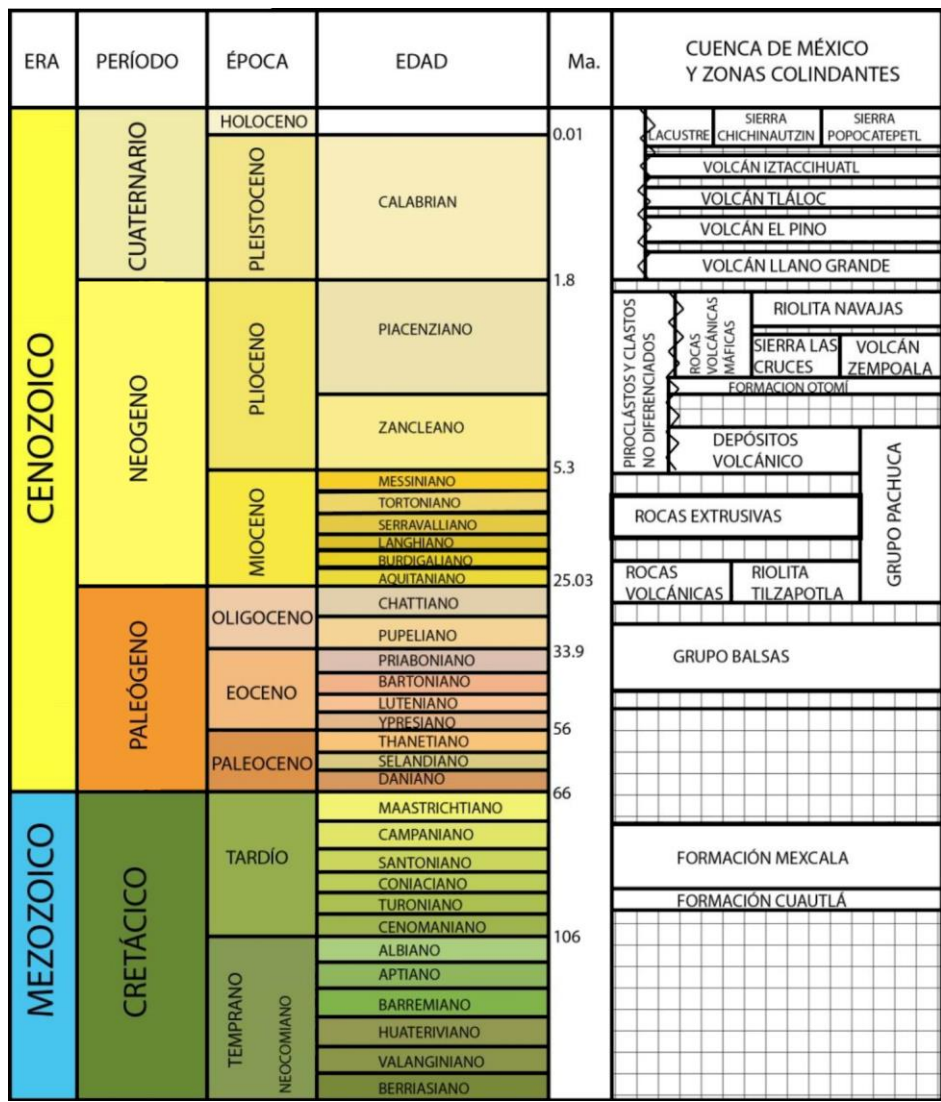


Figura 4.- Columna estratigráfica de la Cuenca de México. Tomado y modificado de Vázquez-Sánchez et al., 1989 y López Capir, 2020.

Sistema de Fallas

Durante años se han realizado estudios geológicos y geofísicos para conocer más acerca de las fallas que se encuentran en la Cuenca de México, el mapa realizado por Arce et al., (2019) se considera como uno de los más completos y por lo tanto se emplea con unas modificaciones (**Figura 5**) en este trabajo para ubicar los sistemas de fallas de la Cuenca de México. A continuación, se describen sus características:

Sistema de Fallas Las Cruces

El límite septentrional de esta estructura mayor corresponde a la barranca del Río Hondo y meridional a la barranca del Río Magdalena. Entre estas dos barrancas mayores se pudo inferir la localización de un total de ocho fallas mayores con rumbo general N 55° E y con una longitud promedio de 11 km, trazable en la superficie desde el contacto occidental de los depósitos aluviales de la Cuenca hacia el sur poniente. Este sistema de fallas se representa con el número 1 en la **Figura 5**.

Falla Río Hondo: Es la falla más septentrional de las fallas inferidas de la barranca de dicha zona. El rumbo del tramo suroccidental de esta falla al poniente-sur poniente de Loma del Carmen es N 60° E, mientras que su tramo nororiental a partir de este punto es N 40° E. Su longitud superficial es de 14 km.

Falla Hipódromo: Dicha falla se encuentra hacia el suroriente de la zona, la cual se extiende desde la altura de la Universidad Anáhuac hasta el Hipódromo de las Américas. Su traza es de 6 km de longitud y tiene trayectoria rectilínea que sigue un rumbo N 53° E.

Al sur de la Falla Hipódromo, el siguiente rasgo estructural del Sistema de Fallas Las Cruces está formado por dos fallas inferidas, que al parecer están relacionadas entre sí (Falla Santa Fe y Contadero).

Falla Santa Fe: El tramo noroccidental de esta falla es la más septentrional de las dos fallas, al sur poniente del fraccionamiento Vista Hermosa tiene un rumbo de N 45° E,

mientras que desde ese punto hasta la terminación abrupta contra la Falla Contadero es de N 80° E. La longitud de este tramo noroccidental es de 10 km.

Falla Contadero: Es la estructura de desarrollo longitudinal mayor, con 17 km, del Sistema de Fallas Las Cruces y su trayectoria es ligeramente convexa hacia el norponiente. El rumbo de casi todo su tercio suroccidental es de N 40° E, mientras que hacia el nororiente de este punto es de N 60° E.

Falla Atzoyapán: Es la siguiente falla del Sistema hacia el suroriente y tiene una longitud superficial de casi 11 km, con rumbo de N 60° E.

Falla Puente Colorado: Esta falla se extiende desde Santa Rosa Xochiac hacia el nororiente hasta la Barranca del Muerto, con una longitud de 10 km. El tramo suroccidental de esta falla tiene un rumbo de N 60° E, mientras que el nororiental de N 65° E.

Falla Texcalatlaco: Traza superficial de dicha falla se extiende desde las cercanías de San Bernabé Ocotepc hasta la Presa Tarango, con una longitud cercana a los 7 km y trayectoria convexa hacia el norponiente. Su mitad suroccidental tiene un rumbo de N 40° E, mientras que la nororiental es de N 60°E.

Falla Contreras: Es la falla más suroriental que fue incluida en el Sistema de Fallas Las Cruces, la cual se localiza a lo largo del Río Magdalena (también se le conoce como Barranca de Contreras). La falla presenta como un alineamiento prominente con longitud superficial de unos 13 km, que extiende desde las cercanías del Cerro de Las Palmas hacia el nororiente hasta Contreras. La dirección de este alineamiento es de N 55° E, (De Cserna et al., 1988).

Sistema de Fallas de la Sierra de Guadalupe

En este Sistema de Fallas se localizan siete fallas de las cuales dos, la Falla de Tenayuca y la Falla Chiquihuite son las mayores y muestran una alineación con las fallas Río Hondo e Hipódromo. Este sistema de fallas se representa con el número 2 en la parte norte del mapa de la **Figura 5**.

Falla Tenayuca: Dicha falla se extiende desde el Cerro de Tenayuca hasta el Picacho El Fraile. Desde este último punto hacia el nororiente se infiere su traza por su expresión topográfica. El rumbo de esta falla es de N 40° E y su desarrollo longitudinal es de unos 8 km.

Falla Chiquihuite: Esta falla se puede seguir la traza desde las cercanías de Ticomán hacia el nororiente, con una trayectoria ligeramente convexa hacia el norponiente, a través de toda la Sierra de Guadalupe hasta Guadalupe Victoria. Su tramo meridional, extenso con el Cerro Chiquihuite tiene un rumbo de N 20° E por una distancia de unos 2 km. Desde este punto hacia el nororiente, su rumbo es N 40° E con un desarrollo longitudinal de unos 12 km, (De Cserna et al., 1988).

Sistema de Fallas Tizayuca

En este sistema de fallas se presenta una expresión morfológica débil pero es rastreable por la visualización de la alineación de domos y volcanes: domo del Calvario (3,050 m), domo del Cerro Gordo (1,560 m), domo del Picacho (2950 m) y el volcán Chiconautla. El sistema de fallas tiene 50 km de largo y 10 km de ancho. En el área de Tlaquilpan se observan brechas, fallas, estructuras sigmoidales y superficie de fricción. La falla tiene un rumbo con orientación al NE y un buzamiento con dirección al NW, con un desplazamiento vertical de aproximadamente 2,400 m (García-Palomo et al., 2018). Este sistema de fallas se representa con el número 3 en la **Figura 5**.

Sistema de Fallas Texcoco

Este sistema se encuentra ubicado en la parte nororiente de la Ciudad de México cercana al municipio de Texcoco, en la **Figura 5** se visualiza con el número 4. Tiene un escarpe lineal inferido de rumbo N40° E y buzando hacia el NW. Es un sistema de 15 km de largo y 2 km de ancho. La falla es localmente cóncava hacia el NW y se asocia a fracturas y fallas con una tendencia promedio de N35° E. La alineación de los domos de dacitas Miocenas y conos de escoria Cuaternaria también sugieren la presencia de la

falla. La falla cruza rocas piroclásticas y domos del volcán Tlaloc, inclinándolas 27° - 30° al SE produciendo el colapso de estructuras volcánicas, y el desplazamiento de unidades estratigráficas. Se observan localmente facetas triangulares, fracturas conjugadas, superficie de fricción y estructuras sigmoidales. Su componente vertical es mayor que 2,000 m. La falla está segmentada en dos porciones por el reciente emplazamiento de un flujo basáltico de lava andesita emitida por el cono de escoria El Cuello. El primer segmento consiste en la alineación de aproximadamente 20 volcanes monogenéticos, la mayoría de ellos, colapsados en dirección del bloque de pared colgante, mientras que el segundo segmento se caracteriza por la alineación de al menos cuatro domos conocidos como Jihuingo ([García-Palomo et al., 2018](#)).

Sistema de Fallas Apan-Tlaloc

Este sistema de fallas presenta una expresión morfológica que sobresale en la parte central de la zona, donde presenta 25 km de largo y 4.6 km de ancho ([Mooser et al., 1987](#)). De manera morfológica se visualiza que es un sistema de fallas lineales que desarrolla localmente escarpas convexas con facetas salientes y triangulares. El tiro de la falla es de aproximadamente 500 m de altura en su parte central, disminuyendo hacia las puntas de la falla. La falla de Apan-Tlaloc pasa de 2,000 a 1,300 m al NW, causada por fallas secundarias sintéticas y la zona de falla se compone de un complejo patrón de fracturas y fallas generalmente tendencia $N25^{\circ}$ E, $N45^{\circ}$ E y $N65^{\circ}$ E con estructuras romboédricas, imbricación y lenticulares. La falla tiene un buzamiento de $70-90^{\circ}$ a la NW ([García-Palomo et al., 2018](#)). Este sistema de fallas se encuentra representada con el número 5 en la parte noroeste en la [Figura 5](#).

Sistema de Fallas del Área de Tepetlaoxtoc

En esta área se localizan tres fallas, de las cuales la de mayor desarrollo longitudinal alcanza unos 11 km y corresponde a la Falla Hacienda La Flor. La trayectoria de esta falla es curvilínea convexa hacia el nororiente y su tramo occidental tiene un rumbo E-W, el central $N 85^{\circ}$ W y el suroriental $N 50^{\circ}$ W. Paralelamente a la Falla Hacienda La Flor se

presentan dos fallas más, una hacia el nororiente y la otra hacia el surponiente de ésta, a la altura del poblado de San Juan Totolapan, en la **Figura 5** se encuentra representada por el número 6. Las dos fallas tienen un desarrollo longitudinal de 6 y 3 km, respectivamente, con un rumbo promedio de N 50° W, los bloques hundidos están en el nororiente, ([De Cserna et al., 1988](#)).

Sistema de Fallas del Área de El Tezoyo

Esta área se localiza al sur-suroriente de Coatepec y nororiente de Chalco, en la región limítrofe suroriental de la Cuenca de México, en la **Figura 5** se encuentra este sistema representado por el número 7.

En esta área se localizan cuatro fallas mayores, burdamente paralelas entre sí, cuyo rumbo general es N 70-75 E. La más meridional es la Falla Mirador, con desarrollo longitudinal de 10 km. La siguiente al norte es la Falla La Cañada, con 7 Km de longitud. La tercera, también hacia el norte, es la Falla El Tezoyo con 5 km de longitud. La última es la Falla El Olivar con 9 km de longitud, ([De Cserna et al., 1988](#)).

Sistema de Fallas Iztapalapa

El primer sistema de fracturas presenta una orientación principal NE–SW delimita de manera general el borde de la Sierra de Santa Catarina. Entre el reclusorio Oriente y El Deportivo Santa Cruz Meyehualco, se presenta como fracturas con desplazamiento normal (desde decímetros a un máximo de 2 metros) preferentemente con caída del bloque hacia el NW localizadas en una zona relativamente angosta de deformación. El segundo sistema de fracturas tiene una orientación general WNW-ESE que sigue de manera general la orientación de la Calzada Zaragoza, con desplazamientos verticales que caen hacia el NE. Este sistema puede tener una posible relación con el límite lacustre de la Laguna de Texcoco debido a la trayectoria que seguía en el año de 1857. El tercer sistema de fracturas corresponde a fracturas de tensión que bordean el edificio volcánico del Peñón del Marqués, pero estas fracturas coexisten con el sistema NE-SW

que le da su forma elíptica. El cuarto sistema de fracturamiento se encuentra en la Colonia San Lorenzo Tezonco con una dirección variable entre NE-SW y NS, ([Carreón-Freyre, 2011](#)), dicho sistema se ubica con el número 8 en la [Figura 5](#).

Falla Xochimilco

La Falla Xochimilco se encuentra al Sur de la Ciudad de México, en la [Figura 5](#) se encuentra con el número 9, esta falla tiene una longitud de aproximadamente 13.5 km. Se cataloga como una falla de tipo normal con una orientación de Este – Oeste y la dirección del buzamiento es hacia el Norte ([García-Palomo, 2008](#) y [Campos-Enríquez, 2015](#)).

Falla Xicomulco

La Falla Xicomulco también se localiza en el Sur de la Ciudad de México, en la [Figura 5](#) se encuentra con el número 10 al norte de la Falla Xochimilco, dicha falla tiene una longitud de 14.2 km aproximadamente. Es una falla de tipo normal con una orientación de Este – Oeste y con la dirección de buzamiento hacia el Norte ([García-Palomo, 2008](#) y [Campos-Enríquez, 2015](#)).

Zonificación de la Ciudad de México

La Ciudad de México se divide en tres zonas con base al tipo de suelo que se presentan, en la **Figura 6** se muestran.

➤ Zona de Lomas:

Esta zona es denominada así por su altitud relativa. Esta zona presenta generalmente condiciones favorables para cimentar estructuras, la capacidad de carga del terreno es elevada y no existen capas de arcillas compresibles que pueden ser causa de asentamientos diferenciales de gran magnitud ([Marsal et al., 2016](#)).

➤ Zona de Transición:

Esta zona se encuentra entre las serranías del poniente y el fondo del Lago de Texcoco. Se tienen superficialmente depósitos arcillosos o limosos orgánicos de la formación Becerra, cubriendo a estratos de arcilla volcánica muy compresibles y de espesores variables, intercalados con capas de arena limosa compacta o arena limpia, los cuales descansan sobre potentes mantos en los que el material predominante es la grava y la arena ([Marsal et al., 2016](#)).

➤ Zona de Lago:

Se le llama a esta zona a las fronteras interiores de la Zona de Transición, se han fijado tomando como base la formación típica de la parte centro y oriente de la ciudad construida sobre el fondo del Lago de Texcoco, En la zona se exhiben los siguientes estratos en la superficie del terreno:

Depósitos areno-arcillosos o limosos, con abundancia de restos arqueológicos, o bien rellenos artificiales que en algunos puntos de la ciudad llegan hasta 10 m de profundidad.

Arcillas volcánicas extraordinariamente compresibles, de variados colores y consistencias comprendidas entre blanda y media, intercalada con pequeñas capas o lentes de arena. Su grosor varía entre 15 a 32 m ([Marsal et al., 2016](#)).

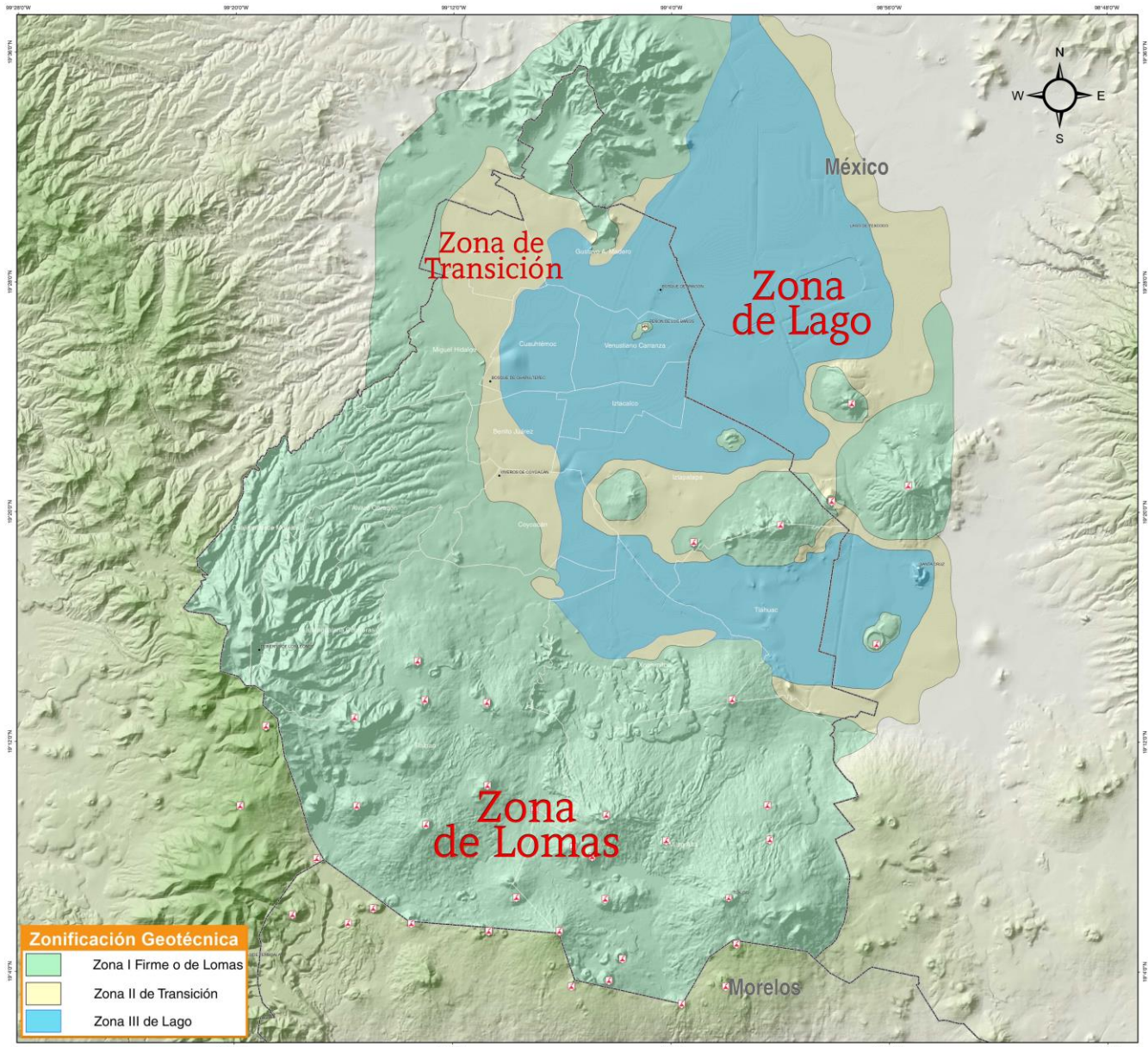


Figura 6.- Zonificación geotécnica. Modificado de Protección Civil Ciudad de México, Mapa Zonificación Geotécnica (Julio 2017).

3. Antecedentes sísmicos

Sismología

La sismología es la ciencia que estudia todo lo referente a los sismos. Estudia la fuente que los produce (localización, mecanismos, tamaño, orientación, etc.), las ondas elásticas que generan (modo de propagación, dispersión, amplitudes, etc.) y el medio físico que atraviesan dichas ondas ([Nava, 2011](#)). Los sismos, también llamados terremotos son las vibraciones de la Tierra producida por una rápida liberación de energía.

Los sismógrafos son instrumentos esenciales para el estudio de los temblores, los cuales son aparatos que dan como resultados registros llamados sismogramas, que proporcionan mucha información relativa al comportamiento de las ondas sísmicas ([Tarbuck et al., 2005](#)).

Tipo de sismos

Los sismos tectónicos son los que se ocasionan por la ruptura súbita de la corteza terrestre producida por la acción de los esfuerzos tectónicos cuando éstos superan la resistencia del material. Estos esfuerzos están relacionados con el movimiento de las placas litosféricas. Por esta razón la mayoría de los sismos están concentrados en los bordes de las placas; estos reciben el nombre sismos interplaca ([Ugalde, 2009](#)). No todos los sismos se originan en las propias zonas de contacto entre placas litosféricas adyacentes; muchos se originan en fallas geológicas que son producto del tectonismo local. No obstante, las fallas locales también están asociadas indirectamente al movimiento relativo entre placas litosféricas, pues los procesos tectónicos que las originan están relacionados con la interacción entre placas. A los eventos que se originan en fallas geológicas locales se le denomina también sismos corticales, mientras que los que suceden en el interior de las placas, se les llama sismos intraplaca ([Sauter, 1989](#)).

También existen los sismos de origen volcánico, los cuales ocurren en zonas donde se presenta actividad volcánica, principalmente los ocasiona el fracturamiento de rocas debido al movimiento del magma.

Otro tipo, son los sismos por colapso, los cuales son causados por el hundimiento de zonas con un estado local de esfuerzos diferentes al entorno debido a la existencia de cavidades o áreas de baja densidad con huecos sometidos a cargas, sobre todo verticales ([Vidal, 1994](#)).

Los sismos tectónicos ocurren con mayor frecuencia y son de magnitud muy superior, comparados con los sismos de origen volcánico o los sismos por subsidencia.

Foco y epicentro de un sismo

Se le denomina foco sísmico (también conocido como hipocentro) al lugar del interior de la Tierra donde tiene origen un temblor, el estudio de dicho foco es de gran importancia, mientras que el epicentro es el punto de la superficie ubicado directamente por encima del foco ([Ugalde, 2009](#)).

Profundidad de los sismos

Para sismos con una profundidad menor a los 60 kilómetros se consideran someros; mientras que los sismos con más de 300 kilómetros de profundidad se les considera profundos y los de profundidad intermedia son los sismos que presentan una profundidad entre los 60 y 300 kilómetros ([Nava, 2011](#)).

Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son manifestaciones de la propagación de energía liberada por un sismo. Se clasifican de dos maneras, en ondas internas y ondas superficiales.

Las ondas internas son aquellas que se propagan en el interior desde su origen hasta la superficie de la Tierra, que se subdividen en ondas P y ondas S (Espíndola, 1994).

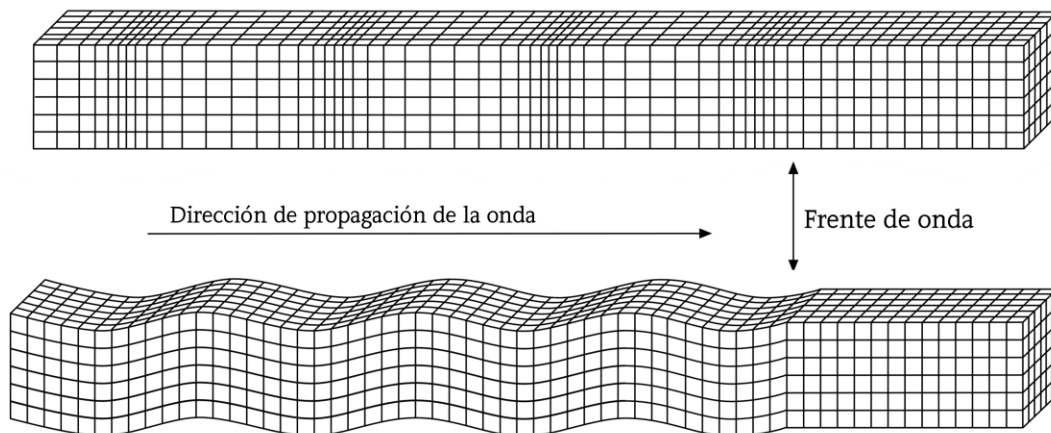
➤ Ondas P

El primer tipo de onda se le conoce como onda Primaria u onda P, también se le denomina ondas longitudinales o de compresión, porque consiste en la transmisión de compresiones y refracciones como en el caso de la transmisión del sonido; en este caso las partículas del medio se mueven en el mismo sentido en que se propaga la onda, estas ondas son las primeras en arribar (Figura 7a).

➤ Ondas S

El segundo tipo de onda se le conoce como onda Secundaria u onda S, ondas transversales o de cizallamiento; las partículas se mueven ahora en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda de estas ondas en un bloque sólido (Figura 7b).

a) Ondas P



b) Ondas S

Figura 7.- Ondas P y ondas S. Modificado de Stein et al., 2003.

Las ondas superficiales son aquellas ondas que se propagan por la superficie terrestre en forma análoga a como se propagan las ondas sobre el agua; el movimiento producido por las ondas superficiales está restringido a la parte superior de la corteza, a una profundidad de unos 30 km. Las ondas de superficie a su vez se dividen en dos tipos (Sauter, 1989):

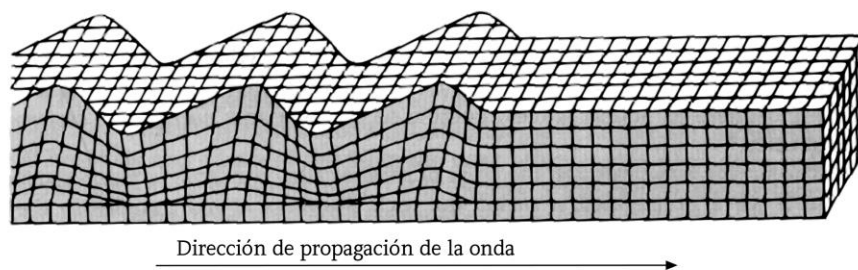
➤ Ondas L

Estas ondas se les conoce como onda L u onda Love, cuyo movimiento es similar al de las ondas S, haciendo vibrar la partícula horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación, sin movimiento vertical (Figura 8a).

➤ Ondas R

Estas ondas se les conoce como onda R u onda Rayleigh, cuyo movimiento es similar al de las ondas en la superficie del agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimiento elíptico horizontal y vertical simultáneamente (Figura 8b).

a) Ondas L



b) Ondas R

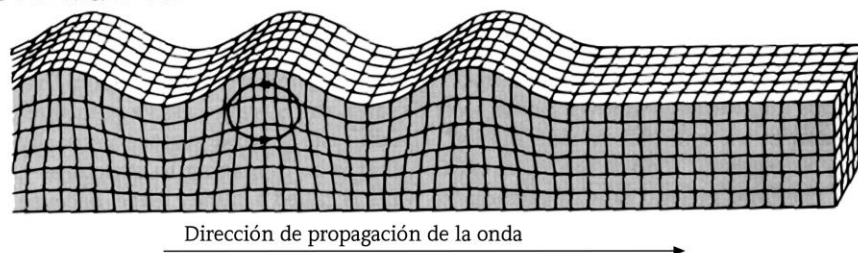


Figura 8.- Ondas L y ondas R. Modificado de Bolt, 1993.

Magnitud e Intensidad

Existen dos parámetros importantes para denominar el tamaño o el impacto que llega a presentar un sismo, los cuales son la magnitud y la intensidad. Ambos son necesarios e importantes debido a que miden aspectos diferentes de la ocurrencia de un sismo.

La magnitud de un sismo está relacionada con la energía liberada en forma de ondas sísmicas que se propagan a través del interior de la Tierra. Para calcular esta energía y determinar la magnitud de los sismos se realizan cálculos matemáticos que se basan en los registros que se obtienen por los sismógrafos de diferentes estaciones. En estos registros o sismogramas se miden algunas características de las ondas y la distancia a la que se encuentra la estación del epicentro. Estos valores son introducidos a una fórmula y de esa manera se obtiene la magnitud.

Existen distintas formas de medir la magnitud, lo cual significa que para poder calcular la magnitud se pueden emplear diferentes fórmulas matemáticas. Por ejemplo, en el SSN las magnitudes que se utilizan son: La magnitud de coda M_c , la magnitud de energía M_e , la magnitud de momento sísmico M_w , entre otras. Cada una de estas formas de calcular la magnitud tiene sus ventajas y sus limitaciones, en algunas formas son más rápidas de calcular, pero pueden ser menos precisas, en otras formas son más precisas pero su cálculo necesita más tiempo; algunas formas son más confiables para sismos pequeños y en otras para sismos grandes. Esta es una de las razones por la cual, para algunos sismos, la magnitud preliminar que es la primera que se reporta, a veces se cambia un tiempo después, cuando ya se pudo realizar el cálculo de su magnitud de manera más precisa. Actualmente ya no se usa la escala de Richter original, la cual es algo antigua y en su momento se hizo para ser utilizada con un tipo de sismómetro que ya no se usa y en otra región geográfica diferente a México ([SSN, 2020](#)).

La escala de intensidad se asigna en función a los daños o efectos causados al hombre y sus construcciones. Dicho parámetro nos permite describir de manera sucinta los efectos de un sismo, como por otra parte los daños causados por un sismo se concentran en las cercanías de la fuente sísmica, la distribución de intensidades permite estimar el epicentro de un temblor, aunque la escala es en gran medida subjetiva y no permite la comparación de los sismo entre sí, debido a que un sismo pequeño puede causar más daños a una población si está cercana al epicentro, mientras que uno sismo

grande puede causar daños pero a mayor distancia. Otra desventaja de la intensidad es que no proporciona información sobre la energía u otra variable física liberada en el sismo. Se propusieron escalas para clasificar el tamaño de los sismos, la cual es la escala de Mercalli, no es la única pero sí la que más se utiliza. Dicha escala consta de 12 grados de intensidad, en la cual se denota por números romanos del I al XII, donde se describen las características de cada grado ([Espíndola, 1994](#)).

Fallas

Los movimientos súbitos a lo largo de las fallas son la causa de la mayoría de los sismos. Una falla es cualquier superficie o zona estrecha con desplazamiento de corte visible a lo largo de la zona, sería una definición simple y tradicional. Cada una de las zonas o ámbitos que resultan de una superficie de ruptura se denominan bloque; si la superficie de ruptura es horizontal o inclinada, al volumen que queda arriba de la superficie se denomina bloque de techo y al volumen inferior bloque de piso ([Arellano et al., 2002](#); [Fossen, 2010](#)). Sin embargo, la gran mayoría de las fallas son inactivas, se denominan fallas activas aquellas en que han ocurrido desplazamientos durante los últimos miles de años. En contraposición, fallas inactivas son aquellas en que no se observa actividad sísmica ni rasgos morfoestructurales y en las que se puede determinar que no han ocurrido desplazamientos durante los últimos 10,000 a 40,000 años ([Sauter, 1989](#)).

Tipo de fallas

Se resaltan tres tipos característicos de fallas ([Sauter, 1989](#)):

➤ Falla Normal

En este tipo de falla el plano de falla es oblicuo respecto al horizonte. En una falla normal los bloques están sometidos a fuerzas de tensión; el bloque superior o techo desciende respecto al bloque inferior o piso y se desliza hacia abajo siguiendo la dirección de la recta de máxima pendiente del plano de falla ([Figura 9a](#)).

➤ Falla Inversa

En este tipo de falla es igual que la falla normal, el plano de falla es oblicuo respecto al horizonte. Es una falla en la que los bloques están sometidos a fuerzas de compresión perpendiculares a la falla, y el bloque superior es forzado a deslizarse en dirección de la recta máxima pendiente (hacia arriba) y asciende respecto al bloque inferior (**Figura 9b**).

➤ Falla Transcurrente

También llamada falla lateral, son fallas donde el movimiento de los bloques se da en dirección del rumbo del plano de falla, pueden ser lateral izquierda o lateral derecha. La falla es lateral derecha cuando el observador se para en uno de los bloques e identifica que el bloque de enfrente se desplaza hacia la derecha (dextral), y es lateral izquierda cuando dicho bloque se desplaza hacia la izquierda (sinistral). (**Figura 9c**).

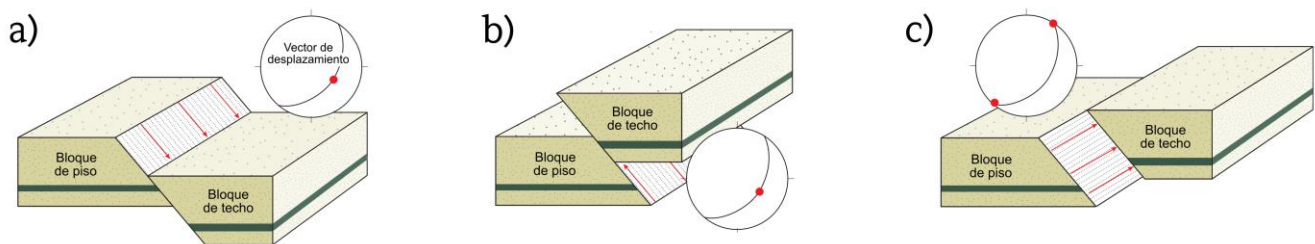


Figura 9.- Tipo de fallas: **a)** Falla normal, **b)** Falla inversa, **c)** Falla transcurrente. Modificado de Fossen, 2010.

También cabe definir otro tipo de falla que es importante mencionar en este trabajo, la cual es la falla de desplazamiento oblicuo.

➤ Falla Oblicua

En una falla cuyo vector de desplazamiento está buzando en un ángulo menor que el del buzamiento de la falla, es decir, es una combinación del movimiento tanto normal o inverso como sobre el rumbo (**Fossen, 2010**).

Mecanismos Focales

La determinación de un mecanismo focal de un sismo consiste en obtener a partir de los sismogramas, los parámetros que definen la ruptura. En el caso más simple, sólo se determina la orientación del plano de falla, mientras que los métodos más complejos se calculan otros parámetros como la historia de la ruptura en el tiempo, variación del estado de esfuerzos, comienzo y parada de la ruptura. El fundamento de todos los modelos del foco sísmico es la ecuación del movimiento en un medio elástico con el que se representa la Tierra. Según esta ecuación, los desplazamientos en un medio elástico, infinito y homogéneo se pueden expresar en términos de las constantes elásticas del medio, la densidad y las fuerzas por unidad de volumen que actúan en el medio. Los primeros modelos buscaron representar el proceso en el foco por ciertos sistemas de fuerzas y resolver después la ecuación para los desplazamientos. Estos sistemas de fuerzas deben representar el proceso de fractura, por lo que reciben el nombre de fuerzas equivalentes. En el caso más sencillo, se considera que el foco sísmico no tiene dimensiones y se representan por fuerzas que actúan en un punto (foco puntual). En el caso más sencillo, se reduce a calcular la orientación del plano de falla definido por el azimut, buzamiento y ángulo de deslizamiento. El plano de falla (AA'BB') intersecta la superficie horizontal del suelo definiendo la traza de la falla (AA'). El ángulo que forma la traza de la falla con el norte geográfico medido en la dirección de las manecillas del reloj es el azimut del plano de falla (Ugalde, 2009).

El ángulo formado entre el plano de la falla y el plano horizontal se llama buzamiento (o echado) de la falla, éste va de 0° a 90° . El ángulo que se forma entre el rumbo de la falla y el vector de desplazamiento es nombrado *pitch* o *rake* (en inglés), éste va de 0° a 90° (o de 0° a 180° , dependiendo de la convención). Éste último es un indicador del grado de oblicuidad que tiene una falla, cómo se logra apreciar en la **Figura 10**.

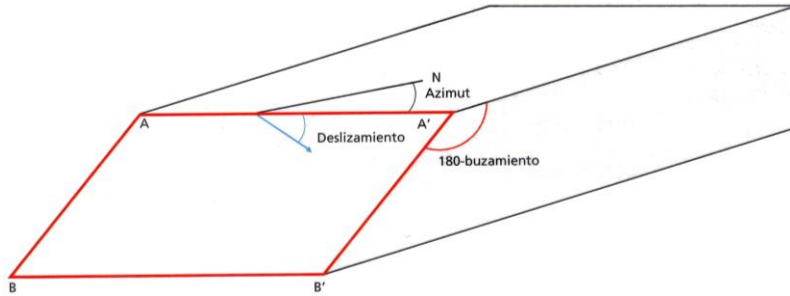


Figura 10.- Parámetros que definen la orientación del plano de falla. Tomado de Ugalde, 2009.

La caracterización completa de un mecanismo focal nos proporciona bastante información útil e importante, la cual incluye el tiempo de origen, la ubicación del epicentro, la profundidad focal, el momento sísmico, la magnitud y la orientación espacial de los 9 componentes del tensor de momento. Con la información proporcionada por el tensor de momento se puede obtener la orientación y sentido del manteo o buzamiento (dip) de la falla.

Así como el tensor de tensión y tensor de deformación, el tensor de momento también se puede describir en términos de tres ejes ortogonales: **P** (eje de compresión), **T** (eje de tensión), y **N** (eje nulo). La orientación y magnitud de estos ejes para un sismo se determina utilizando datos registrados por una cantidad de sismómetros que están distribuidos alrededor del epicentro. La orientación de los ejes del tensor de momento es de gran interés debido a que el plano de falla en el cual un sismo fue generado a lo largo de este, está a 45° desde los ejes P y T, y contiene a T.

Para cualquier tensor de momento existen dos posibles planos que cumplen estos criterios. Los dos planos son llamados planos nodales y están en ángulos rectos uno del otro y se intersectan a largo del eje N. Uno de los planos es el plano de falla, y el otro se llama plano auxiliar y no tiene un significado geológico-estructural. Se puede decir con referencia sólo al tensor de momento de que un sismo fue generado en uno o el otro plano nodal (Miller, 2017).

Asumiendo que el plano de falla puede ser diferenciado del plano auxiliar, la solución de un mecanismo focal proporciona la orientación del plano de falla, la dirección del deslizamiento del techo (hanging-wall) y por lo tanto el tipo de falla involucrada en el sismo, la cual puede ser transcurrente, inversa, normal y oblicua. Al generarse un número de réplicas de un evento principal y al realizar un análisis de esta secuencia nos permite mapear el “parche” de deslizamiento y evaluar más que los sismos generados por una falla durante una secuencia. Un análisis cuantitativo más sofisticado de los mecanismos fuentes de sismos pueden algunas veces identificar la dirección de propagación de la falla.

Los diagramas de pelota de playa (beachball diagrams) de los mecanismos focales son proyecciones estereográficas que muestran dos cuadrantes negros y dos blancos, separados por un arco de un gran círculo orientado a 90° uno del otro. Los grandes círculos son los planos nodales. El rumbo de la falla está indicado por una línea que conecta dos puntos en el diagrama de las pelotas de playa, es decir, donde el plano de falla (un gran círculo) intersecta al círculo primitivo; es la línea segmentada en la **figura 11**. La dirección del manteo está a 90° del rumbo, en la dirección indicada por la flecha negra desde el centro hacia la mitad del gran círculo, se aprecia de manera clara en la **figura 11** (Miller, 2017).

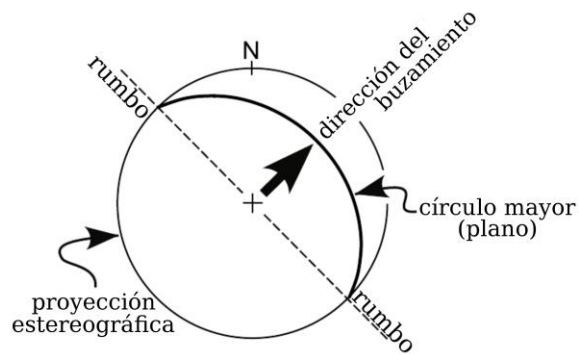


Figura 11.- Proyección del rumbo y buzamiento. Modificado de Miller, 2017.

En el siguiente ejemplo se utiliza la **figura 12**, donde en el inciso a) el mecanismo focal tiene sus planos auxiliares verticales Norte-Sur y Oeste-Este. En el instante en que ocurre un sismo, el movimiento de la onda P a través del material alrededor del foco

causa que las partículas que están en el cuadrante negro se alejen del foco, mientras que las partículas que están en los cuadrantes blancos se acercan al foco, dicho lo anterior se logra visualizar en el inciso b) de la **figura 12**. Mientras que en los incisos c) y d) se muestran cuáles podrían ser las dos posibles fallas.

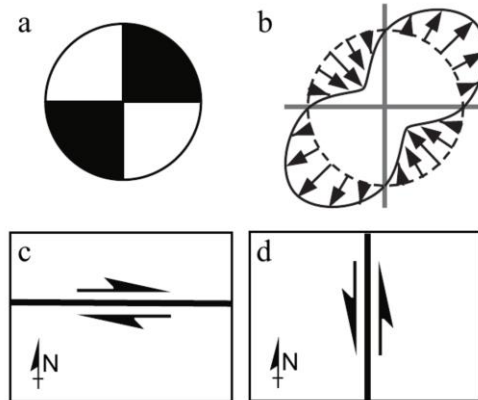


Figura 12.- a) Mecanismo Focal, b) Patrón de radiación, c) y d) Fallas posibles.
Modificado de Miller, 2017.

Continuando con los ejemplos de los diferentes tipos de falla se utilizará como ejemplo la siguiente figura donde se va a interpretar el sentido de deslizamiento a lo largo de un plano de falla, el cual es un mecanismo transcurrente (también conocido como mecanismo con deslizamientos en el rumbo), en la **figura 13** se asume que la línea gris es el plano de falla. Nos ubicamos en uno de los dos hemisferios que divide el plano de falla (mirando perpendicular al plano de falla) e imaginemos que el cuadrante negro equivale a la punta de una flecha lo cual indica el sentido del deslizamiento. Para este ejemplo si la flecha apunta hacia la derecha, el mecanismo focal representará una falla transcurrente-dextral y si la flecha es hacia la izquierda, este representará una falla transcurrente-sinestral (Miller, 2017).

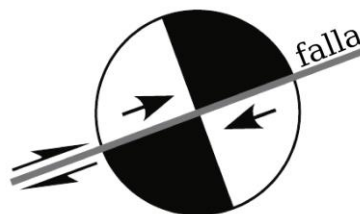


Figura 13.- Mecanismo focal de una falla dextral. Modificado de Miller, 2017.

Tal como se observan en las **figuras 14** para los mecanismos normales e inversos (mecanismos con deslizamiento puro en el buzamiento), sólo tres cuadrantes de los cuatro se pueden observar en un diagrama de playa. En la **figura 14** inciso a) se representa una falla normal, donde el centro del mecanismo focal se representa de color blanco, mientras que en la **figura 14** inciso b) nos muestra una falla inversa, donde el centro del mecanismo focal se representa de color negro (Miller, 2017).

Los mecanismos oblicuos tienen aporte de las dos componentes de deslizamiento, es decir, deslizamiento en el rumbo y deslizamiento en el manteo (buzamiento). Los cuatro cuadrantes son apreciables en los diagramas de pelotas de playa. Si el centro del mecanismo está en un cuadrante de color blanco, se determina que es un mecanismo oblicuo con componente normal, sin tener en cuenta de cuál de los dos planos nodales es el plano de falla, como se muestra en la **figura 14** inciso c). Si el centro del mecanismo focal se encuentra de color negro, este es un mecanismo oblicuo con componente inverso, como en la **figura 14** inciso d) (Miller, 2017).

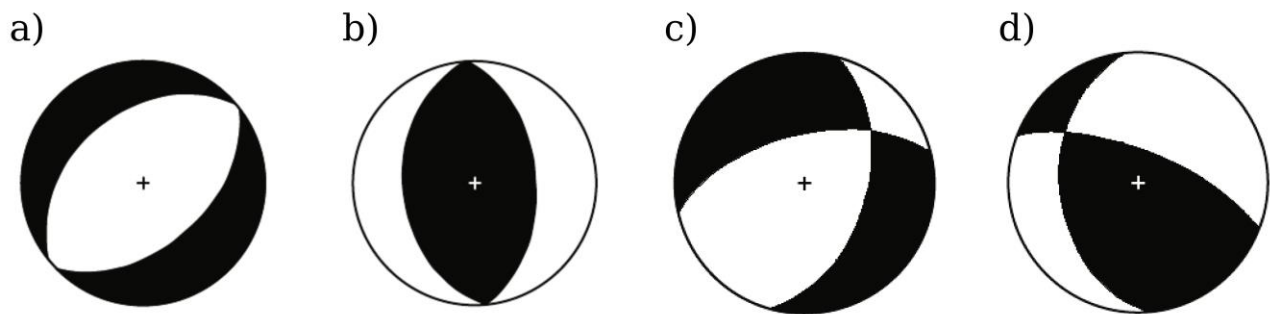


Figura 14.- a) Mecanismo Focal Normal, b) Mecanismo Focal Inversa, c) Mecanismo focal oblicuo con componente normal y d) Mecanismo focal oblicuo con componente inverso.

4. Metodología

Red Sísmica del Valle de México

La Red Sísmica del Valle de México (RSVM) es una red regional digital establecida por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Comenzó en 1996 con algunos instrumentos verticales de período corto dispersos por todo el valle, que desde 2006 fueron reemplazados gradualmente por instrumentos de período intermedio de tres componentes y más recientemente instrumentos acelerográficos. La red sismológica llamada Red del Valle de México se encuentra integrada por un total de 30 estaciones de monitoreo sísmico, en la **Figura 15** se muestra un mapa donde se visualiza la ubicación de las estaciones de la RSVM, donde los triángulos de color rojo son estaciones equipadas con sensores de velocidad y aceleración, los pentágonos de color azul son estaciones con sensores de velocidad y los diamantes de color amarillo son estaciones de la red sísmica nacional con sensores de banda ancha ([Quintanar et al., 2018](#)).

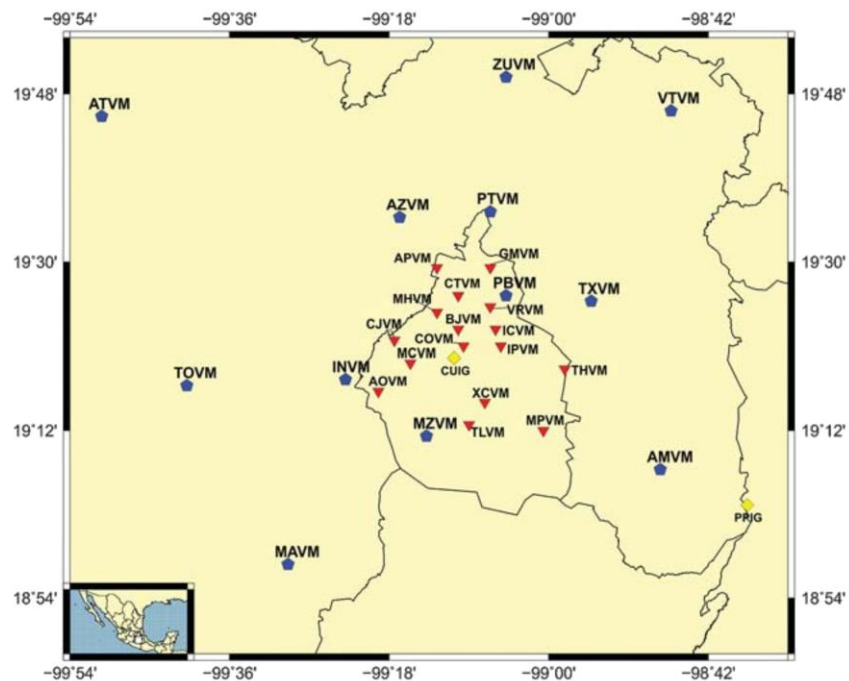


Figura 15.- Mapa de las estaciones de la RSVM. Tomado de Quintanar et al., 2018.

Metodología

Se recolectó información acerca de los sismos con epicentro en la zona de estudio seleccionada de la Cuenca de México que ocurrieron en el año 2017, para así poder elaborar un catálogo con su respectiva información como la fecha, la hora, la magnitud, la profundidad y las coordenadas de la ubicación de cada uno de los eventos que ocurrieron (Tabla 1).

Posteriormente, mediante solicitud al Servicio Sismológico Nacional, se obtuvieron las señales sísmicas de los eventos seleccionados.

Tabla 1.- Registro de los sismos con epicentro en el área de estudio de la Cuenca de México durante el año 2017.

Se representa con una estrella de color rojo (★) a los eventos que su lectura fue buena y se les pudo hacer el análisis completo para obtener su mecanismo focal.

Evento	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud	
1★	1/03/2017	00:57:36	19.3508	-99.1373	4.6	2.5	Colonia: Country Club Churubusco, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
2★	1/03/2017	02:47:13	19.3502	-99.1488	5.0	2.4	Colonia: San Mateo, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
3★	1/03/2017	09:56:51	19.3400	-99.1403	5.0	2.6	Colonia: Campestre Churubusco, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
4★	1/03/2017	09:57:21	19.3428	-99.1322	3.7	2.3	Colonia: Campestre Churubusco, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
5★	2/03/2017	02:27:12	19.3390	-99.1450	5.1	1.8	Colonia: Ciudad Jardín, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
6	2/03/2017	13:01:45	19.3390	-99.1450	5.1	1.5	Colonia: Ciudad Jardín, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
7★	2/04/2017	03:50:23	19.4212	-98.8823	15.8	3.1	Municipio: San Vicente Chicoloapan de Juárez, Estado de México.
8	3/04/2017	10:03:12	19.4210	-98.8820	4.0	2.2	Municipio: San Vicente Chicoloapan

							de Juárez, Estado de México.
9	3/04/2017	10:40:40	19.4210	-98.8820	4.0	2.3	Municipio: San Vicente Chicoloapan de Juárez, Estado de México.
10	4/04/2017	07:24:35	19.4210	-98.8820	4.0	2.4	Municipio: San Vicente Chicoloapan de Juárez, Estado de México.
11	4/04/2017	12:01:28	19.3855	-98.9517	4.2	2.6	Municipio: Los Reyes Acaquilpan (La Paz), Estado de México.
12★	5/04/2017	02:54:28	19.4062	-98.9392	5.5	2.8	Barrio Santa María Nativitas, Municipio: Chimalhuacán, Estado de México.
13★	19/04/2017	21:22:31	19.0637	-99.0408	3.0	2.9	Municipio: Tlalnepantla, Estado: Morelos.
14★	15/05/2017	12:58:04	19.3458	-99.2348	9.3	2.6	Colonia: Lomas de las Águilas, Delegación: Álvaro Obregón. Ciudad de México.
15★	16/06/2017	11:43:07	19.3932	-99.1357	5.0	2.4	Colonia: Moderna, Delegación: Benito Juárez. Ciudad de México.
16	14/07/2017	01:57:14	19.2035	-99.1040	5.7	2.2	Pueblo Santa Cecilia Tepetlapa, Delegación: Xochimilco. Ciudad de México.
17	16/07/2017	19:04:58	19.3963	-99.3900	3.0	1.7	Municipio: Huixquilucan de Degollado, Estado de México.
18	24/08/2017	17:56:19	19.5292	-99.1597	2.2	1.3	Municipio: Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
19	27/08/2017	18:42:16	19.6675	-99.2087	2.0	2.8	Municipio: Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
20★	10/09/2017	02:54:12	19.3160	-99.1793	6.1	2.7	Ciudad Universitaria, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
21	20/09/2017	05:14:00	19.2612	-99.1943	7.8	1.7	Colonia: San Andrés Totoltepec, Delegación: Tlalpan. Ciudad de México.
22	20/09/2017	05:25:27	19.3170	-99.2265	3.9	1.3	Colonia: San Jerónimo Aculco, Delegación: La Magdalena Contreras. Ciudad de México.
23	20/09/2017	08:03:53	19.3445	-99.2778	2.0	1.0	Colonia: San Mateo Tlaltenango, Delegación: Cuajimalpa. Ciudad de México.
24	20/09/2017	09:32:54	19.2388	-99.2177	3.3	1.3	Colonia: San Miguel Ajusco, Delegación: Tlalpan. Ciudad de

							México.
25★	21/09/2017	08:47:32	19.0410	-98.8210	3.0	2.0	Municipio: Tepetlixpa, Estado de México.
26★	25/09/2017	22:26:10	19.0830	-99.2820	5.2	2.5	Municipio: Huitzilac, Estado: Morelos.
27	29/09/2017	03:10:20	19.3318	-99.3053	2.0	1.7	Pueblo San Mateo Tlaltenango, Delegación: Cuajimalpa. Ciudad de México.
28	29/09/2017	05:36:15	19.0087	-98.8950	11.3	3.5	Municipio: Totolapan, Estado: Morelos.
29★	05/10/2017	23:54:29	19.0682	-98.7510	5.6	3.3	Municipio: Atlautla de Victoria, Estado de México.
30★	10/10/2017	06:17:34	19.0295	-98.8218	3.9	3.2	Municipio: Tepetlixpa, Estado de México.
31★	13/10/2017	07:30:59	19.0773	-98.8338	9.5	2.9	Municipio: Juchitepec, Estado de México.
32	16/10/2017	06:04:31	19.3298	-99.1517	2.0	2.3	Pueblo La Candelaria, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
33	16/10/2017	06:05:30	19.3373	-99.1595	3.9	2.1	Pueblo de Los Reyes, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
34	17/10/2017	07:00:26	19.3148	-99.1702	4.5	1.2	Ciudad Universitaria, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
35★	28/10/2017	06:52:35	19.2138	-99.2060	2.5	2.5	Colonia: San Miguel Ajusco, Delegación: Tlalpan. Ciudad de México.
36	07/11/2017	15:10:33	19.3873	-99.1582	3.0	1.0	Colonia: Narvarte Poniente, Delegación: Benito Juárez. Ciudad de México.
37★	09/11/2017	10:10:35	19.3187	-99.1737	8.3	1.5	Ciudad Universitaria, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
38★	09/11/2017	10:11:33	19.3458	-99.1523	7.0	1.3	Barrio San Lucas, Delegación: Coyoacán. Ciudad de México.
39★	09/11/2017	10:12:07	19.3618	-99.1828	7.7	2.0	Colonia: Florida, Delegación: Álvaro Obregón. Ciudad de México.
40★	14/11/2017	11:27:02	19.0330	-99.0008	10.5	2.8	Municipio: Tlalnepantla, Estado: Morelos.
41	15/11/2017	11:25:44	19.2963	-99.2312	17.7	1.8	Colonia: Pedregal de San Nicolás 1a Sección, Delegación: Tlalpan. Ciudad

							de México.
42★	27/11/2017	00:07:56	19.6647	-99.0035	6.7	2.5	Ojo de Agua, Municipio: Tecamac, Estado de México.
43★	14/12/2017	06:50:12	19.0663	-98.7982	5.0	3.0	Municipio: Ozumba de Alzate, Estado de México.
44★	29/12/2017	07:38:56	19.3885	-99.1715	1.0	2.0	Colonia: Del Valle Centro, Delegación: Benito Juárez. Ciudad de México.

Una vez elaborado el catálogo con la base de datos de los sismos y que se obtuvieron los archivos con las señales sísmicas, se utilizó el software llamado SEISAN ([Ottemöller et al., 2013](#)), con el cual se llevaron a cabo los análisis de los mecanismos focales con los sismogramas. Para la determinación de los mecanismos focales se utilizó el método del análisis de polaridades de las señales, en el cual se indica la polaridad de los primeros arribos de la onda P en la componente vertical en cada uno de los registros. Los eventos registrados por las estaciones sísmicas constan de tres componentes, en dicho trabajo se ocuparon las componentes verticales Z de los sismogramas, lo primero que se hizo fue localizar la llegada de las ondas P ([Fig. 16](#)), como se ha mencionado anteriormente, el método utilizado para determinar los mecanismos focales fue mediante la identificación de la polaridad del primer arribo de la onda P. Una vez localizada la llegada de la onda P se marcó, poniendo el cursor en donde inicia la onda P, se presiona la tecla correspondiente (C o D) y en automático se marca con una línea roja como se observa en la [Figura 16](#).

En un sismograma si el registro en la componente vertical, el primer pulso tiene la dirección hacia arriba es una compresión, de lo contrario, si el pulso tiene la dirección hacia abajo es una dilatación. Una vez identificada la dirección de la onda, se procedió a marcar su polaridad. Si al identificarla se determinó que fue compresión, se le marcó con la letra C. De igual modo, si se determinó que fue dilatación se le marcó con la letra D. En la [Figura 16](#) se logra visualizar que la onda P presenta una dirección hacia arriba, por lo cual es una compresión y se observa la letra C.

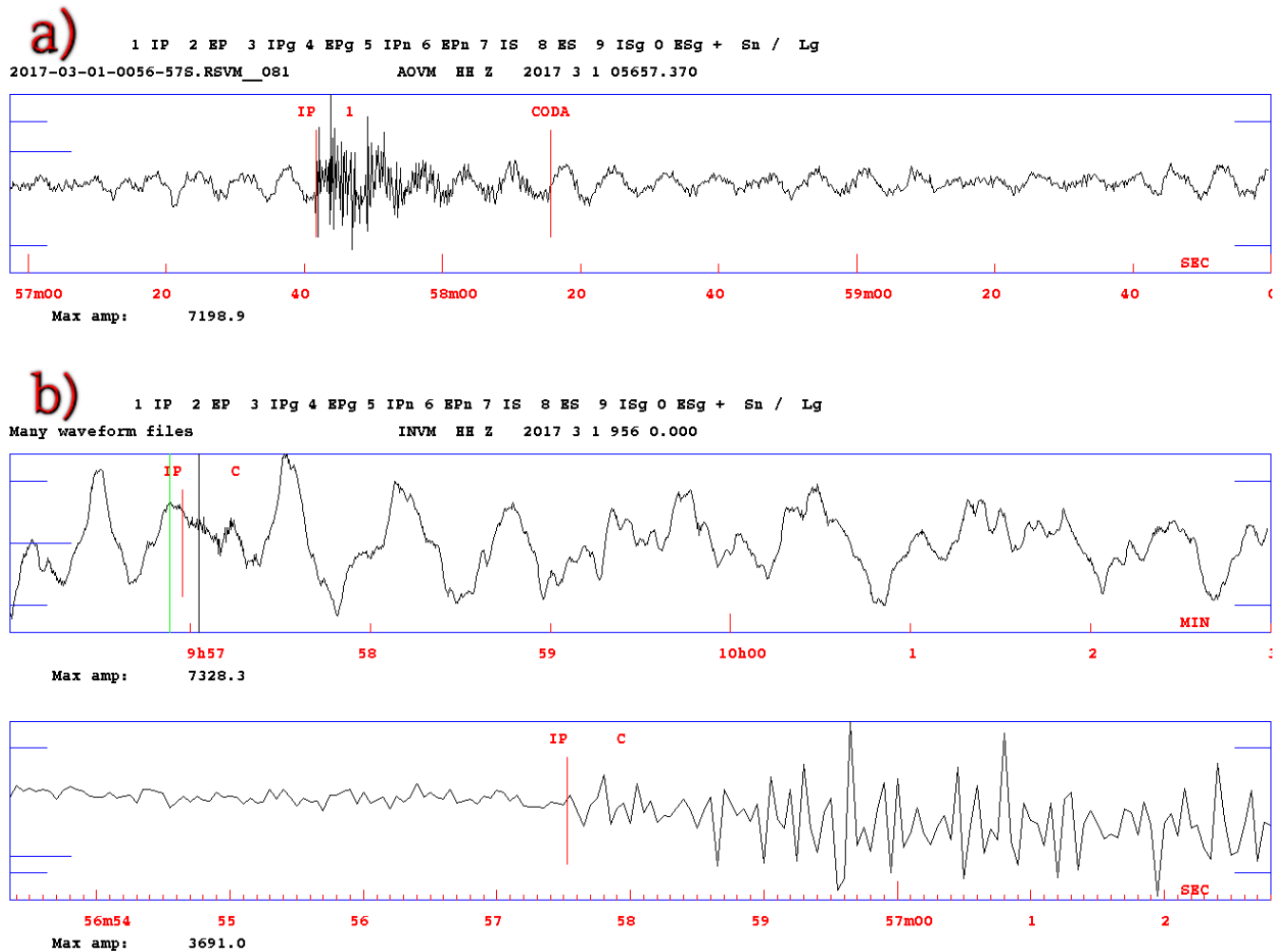


Figura 16.- Identificación de la polaridad de las ondas. *a)* Evento sísmico del día 1 de Marzo del2017 a las 00:57 hrs registrado en la estación AOVN. *b)* Evento sísmico del día 1 de Marzo del2017 a las 09:56 hrs registrado en la estación INVM.

También existieron sismogramas cuya lectura fue algo complicada o no fue posible identificar la polaridad, como se puede apreciar en la **Figura 17**, se muestra una forma de onda que presenta mucho ruido y eso impide tener una buena lectura de la polaridad de la onda P.

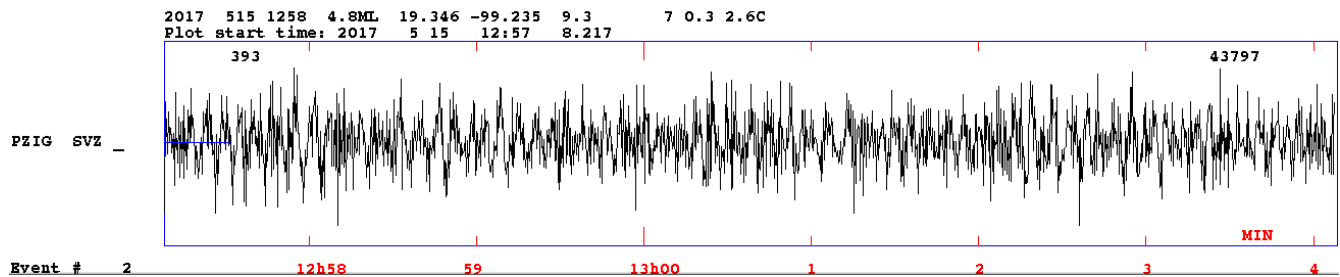


Figura 17.- Ejemplo de una forma de onda a la que no se le puede identificar la polaridad debido al exceso de ruido.

Una vez identificadas las polaridades del primer impulso de la onda P de cada uno de los sismogramas de los eventos en sus estaciones disponibles, se procedió a calcular el mecanismo focal en el cual se utilizó la subrutina FocMec del software SEISAN (Ottemöller et al., 2013). Mediante una serie de comandos se realizó la lectura de los datos y nos arrojó un número de soluciones posibles, posteriormente se seleccionó una solución y nos abrió una nueva ventana (Fig. 18) donde nos grafica la solución seleccionada con el mecanismo focal del sismo. Dicha solución son representaciones estereográficas, una se encuentra en color verde, las cuales muestran los planos determinados por FocMec, mientras que en color azul son los planos determinados por FPFIT.

SEISAN incluye ciertos complementos que sirven para estimar la solución del plano de falla, en este caso son FocMec y FPFIT. FocMec determina los mecanismos focales al introducir la polaridad de las señales sísmicas y/o relaciones de amplitud. FPFIT encuentra la solución de plano de falla de doble par (modelo fuente) que mejor se ajusta a un conjunto dado de polaridades de primer movimiento observadas para un sismo.

En la figura 18 se muestra un ejemplo de la solución de uno de los mecanismos focales que nos arrojó SEISAN, en el Apéndice I se muestran todas las soluciones arrojadas. En la imagen de la figura 18 se observan círculos de color azul (○) que son notaciones que nos están indicando que se trata de una compresión, mientras que los triángulos de color rojo son notaciones que nos están indicando que se trata de una dilatación (Δ). Se aprecia el nombre de cada una de las estaciones sísmicas con su respectiva polaridad (letra C o D). Las letras **T** y **P** representan los ejes de tensión y de presión. También en

dicha solución nos indica los valores que el software nos da para los planos de falla, como se logra observar en la parte superior izquierda, donde se indican los valores del rumbo (strike), dip (echado) y slip (desplazamiento). Posteriormente todo esto se realizó para cada uno de los sismos con los suficientes registros para encontrar su mecanismo focal.

Es importante recalcar que este método nos da como resultado los planos que se encuentran separando las compresiones y dilataciones; posteriormente la elección del plano de falla se realizó con base a la geología local correspondiente a la Cuenca de México.

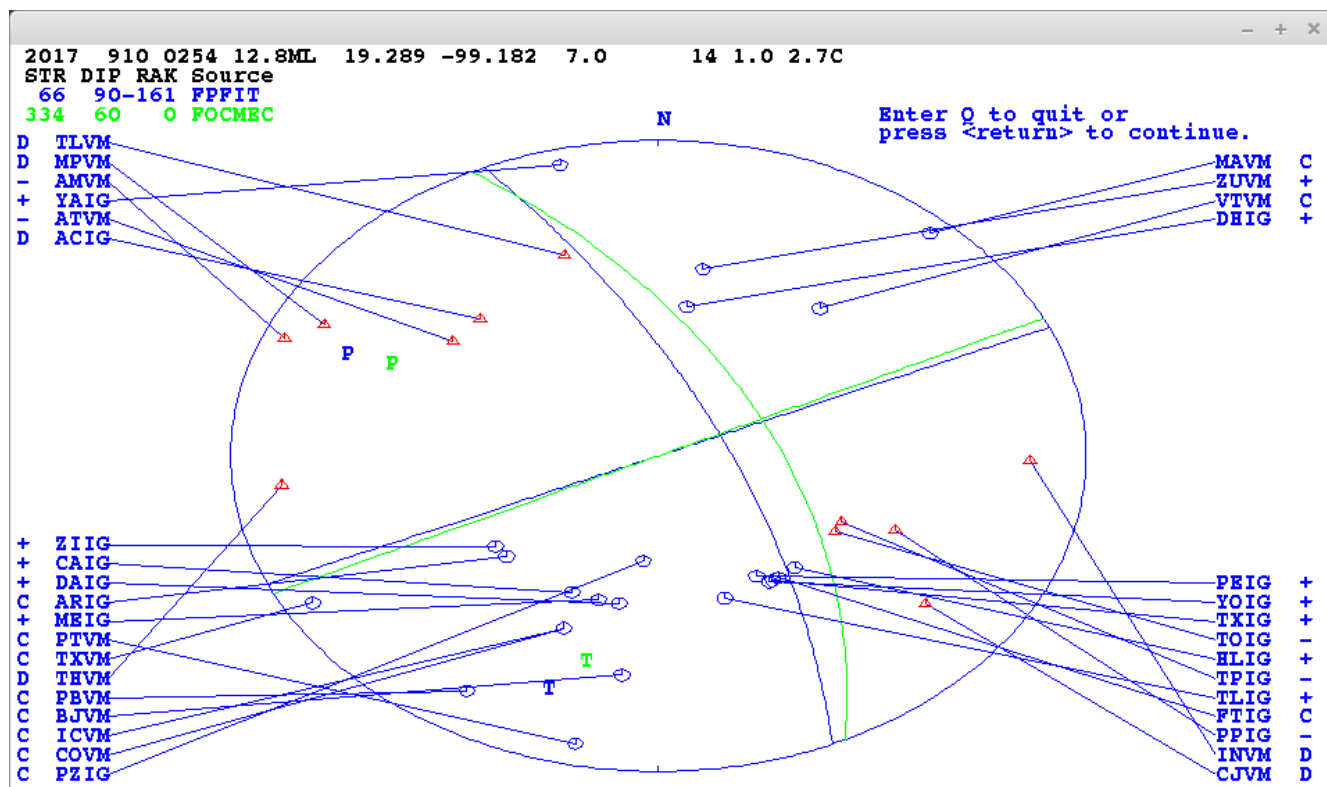


Figura 18.- Resultado del mecanismo focal generado por FOCMEC del evento sísmico del día 10 de septiembre del 2017 a las 02:54 hrs.

5. Resultados

5.1 Localización de los sismos (2017)

En la **Figura 19**, se muestra el mapa de la Cuenca de México con la ubicación geográfica de los cuarenta y cuatro sismos, cada círculo morado es la representación de un evento sísmico registrado, la mayor concentración de dichos eventos se encuentra en la zona sur, entre las alcaldías Benito Juárez y Coyoacán. Mientras que la siguiente concentración que presenta mayores números de sismos ocurridos se encuentra dispersa al suroeste de la Ciudad de México.

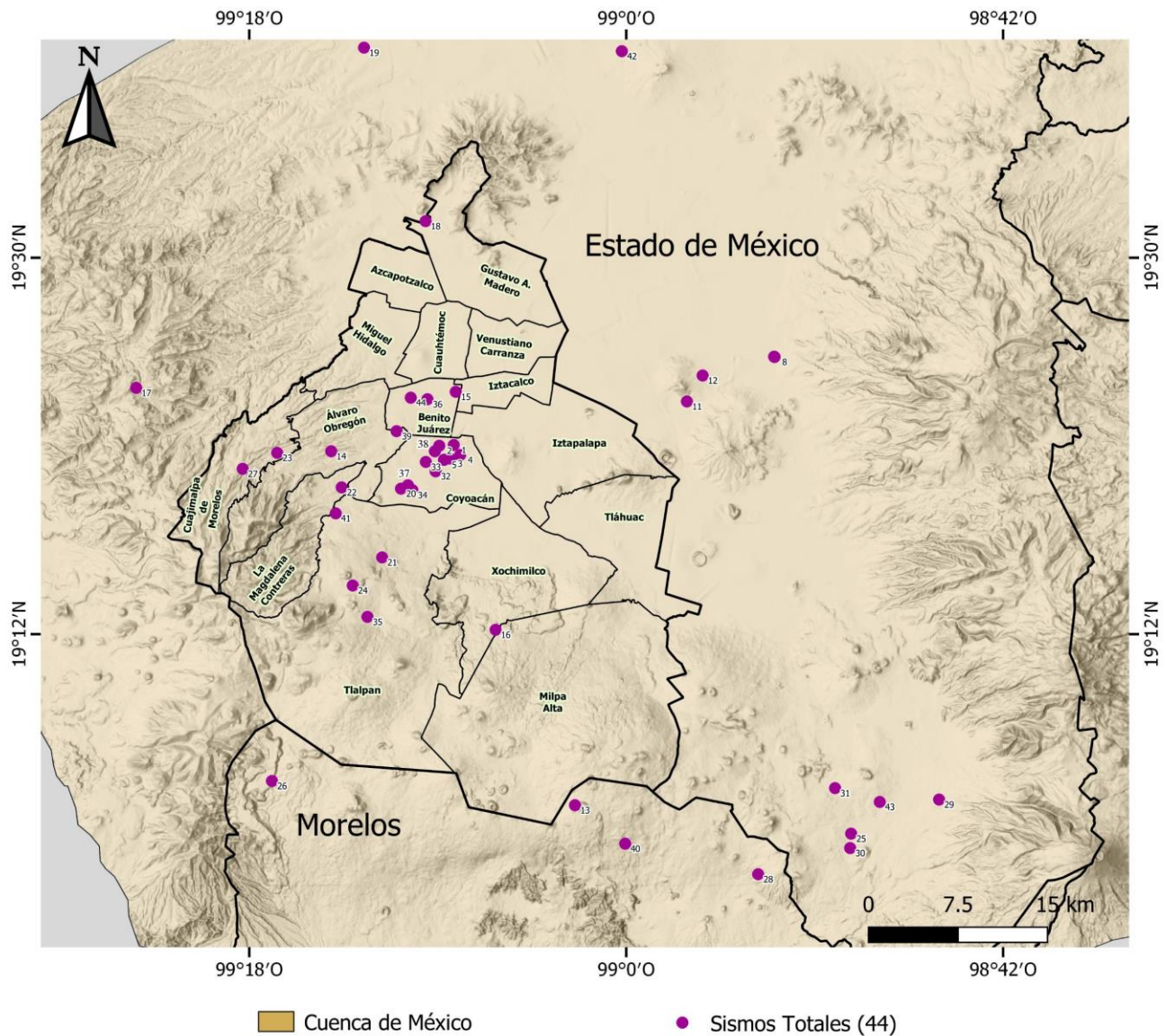


Figura 19.- Mapa de la Cuenca de México con la representación de los sismos ocurridos durante en el año 2017.

5.2 Resultados de los mecanismos focales

Como ya se mencionó anteriormente, de los cuarenta y cuatro sismos registrados solo a veinticuatro sismos se le pudieron obtener su mecanismo focal.

En la Tabla siguiente se muestran los valores del rumbo (STR), buzamiento (DIP) y ángulo de deslizamiento (RAK) que fueron obtenidos junto a las representaciones de los

mecanismos focales en SEISAN, también se muestran los valores complementarios de los parámetros de los sismos, los cuales fueron generados mediante el software Earthquake Focal Mechanism, y finalmente se muestra en la columna final el tipo de falla representada por el mecanismo:

Tabla 2.- Registro de los parámetros sísmicos.

Evento	Fecha	Hora	Plano 1			Plano 2			Eje Presión		Eje Tensión		Tipo Falla
			STR	DIP	RAK	STR	DIP	RAK	Φ	δ	Φ	δ	
1	01/03/17	00:57	4	85	80	247.70	11.17	153.26	103.12	39.20	263.20	49.06	Inversa con componente lateral izquierda
2	01/03/17	02:47	160	7	45	25.21	85.06	94.96	110.64	39.86	300.64	49.71	Inversa con componente lateral
3	01/03/17	09:56	92	63	-30	196.69	63.54	-149.53	54.52	39.50	324.24	0.34	Transcurrente (oblicua con componente normal)
4	01/03/17	09:57	350	60	0	260	90	150	309.11	20.70	210.89	20.70	Transcurrente
5	02/03/17	02:27	320	35	-89	138.78	55.01	-90.70	45.93	79.98	229.28	10.00	Normal
7	02/04/17	03:50	119	52	27	11.58	69.04	138.75	68.85	10.51	328.71	43.50	Transcurrente (oblicua con componente inversa)
12	05/04/17	02:54	82	64	16	344.84	75.66	153.10	35.31	7.75	300.98	29.02	Transcurrente
13	19/04/17	21:22	41	64	-55	163.05	42.59	-139.62	357.74	56.16	106.49	12.16	Transcurrente (oblicua con componente normal)
14	15/05/17	12:58	264	11	63	111.43	80.21	95.04	197.08	35.02	27.58	54.52	Inversa con componente lateral
15	16/06/17	11:43	220	40	-89	38.69	50.01	-90.84	301.93	84.95	129.29	5.00	Normal
20	10/09/17	02:54	334	60	0	244	90	150	293.11	20.70	194.89	20.70	Transcurrente
25	21/09/17	08:47	186	28	43	56.53	71.33	111.25	130.31	23.45	355.72	58.29	Transcurrente (oblicua con componente inversa)
26	25/09/17	22:26	38	76	27	300.97	63.86	164.37	167.52	8.07	262.00	28.85	Transcurrente
29	05/10/17	23:54	298	30	-89	116.85	60.01	-90.58	25.27	74.99	207.27	15.00	Normal
30	10/10/17	06:17	97	71	69	326.70	28.03	136.14	203.00	23.20	337.81	58.69	Transcurrente (oblicua con componente inversa)

31	13/10/17	07:30	167	76	-26	263.73	64.83	-164.50	123.12	28.15	217.14	7.45	Transcurrente
35	28/10/17	06:52	212	81	60	106.84	31.20	162.42	326.00	29.62	91.60	45.68	Transcurrente (oblicua con componente inversa)
37	09/11/17	10:10	72	64	16	334.84	75.66	153.10	25.31	7.75	290.98	29.02	Transcurrente
38	09/11/17	10:11	60	67	46	307.97	48.54	148.57	180.03	11.07	282.63	48.12	Transcurrente (oblicua con componente inversa)
39	09/11/17	10:12	198	90	50	108	40	180	320.73	32.80	75.27	32.80	Transcurrente (oblicua con componente inversa)
40	14/11/17	11:27	166	76	27	68.97	63.86	164.37	295.52	8.07	30.00	28.85	Transcurrente
42	27/11/17	00:27	260	30	0	170	90	120	233.43	37.76	106.57	37.76	Transcurrente
43	14/12/17	06:50	299	40	-89	117.69	50.01	-90.84	20.93	84.95	208.29	5.00	Normal
44	29/12/17	07:38	316	54	-36	69.12	61.61	-138.07	286.19	48.75	190.98	4.55	Transcurrente (oblicua con componente normal)

5.3 Relación de los sismos con las fallas

En la sección siguiente se muestran los resultados de la relación de los sismos con las fallas, es decir, se hizo una comparación entre la orientación de los sismos y la orientación de las fallas existentes y cartografiadas de las cuales se realizó la recapitulación de dichos datos en los primeros capítulos. Cabe mencionar que no se tienen todos los valores de los parámetros de las fallas que hay en la Cuenca de México, así que se utilizó solamente los datos conocidos.

Para realizar la comparación se utilizaron diagramas de roseta y así poder facilitar la comparación, en la **Figura 20a** se muestra la orientación de las fallas de la Cuenca de México, al lado izquierdo se encuentran los planos de las fallas y al lado derecho se encuentran los diagramas de rosetas.

En color verde se representan los planos de las fallas de la Sierra de Guadalupe, en color azul las fallas de la Sierra de Las Cruces, en color rosa las fallas del área de Tepetlaoxtoc, en color naranja el área de El Tezoyo, en color rojo son las fallas que se encuentran cartografiadas en la parte norte – centro del mapa de Arce et al., 2019 y en color morado las fallas cartografiadas en la parte sur del mapa de Arce et al., 2019.

Mientras que en la Figuras 20b y 20c se muestra la orientación de los planos 1 y 2 de los sismos, respectivamente.

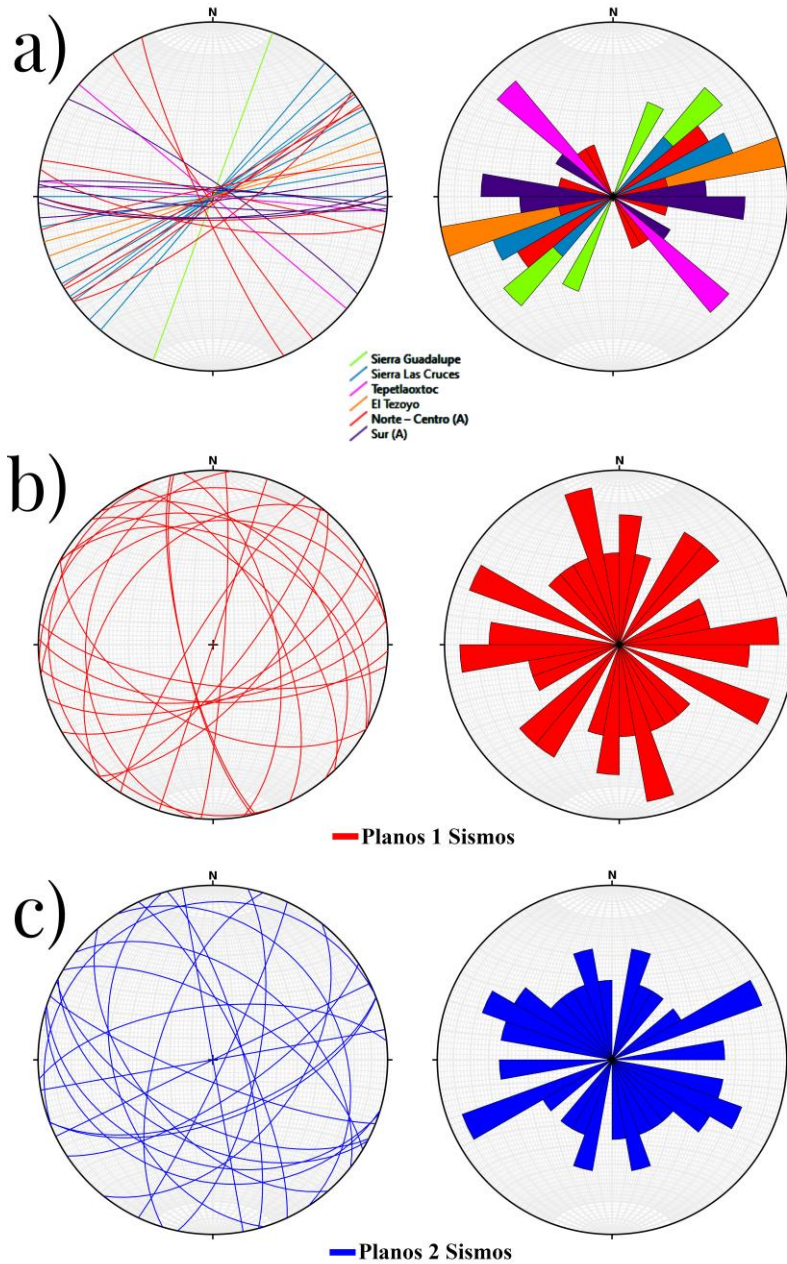


Figura 20.- Diagramas de rosetas: **a)** Roseta de la orientación de las fallas **b)** Roseta de la orientación del plano 1 de los sismos **c)** Roseta de la orientación del plano 2 de los sismos.

En la **Figura 21**, se puede observar un mapa más completo con la distribución espacial de los sismos con su respectivo mecanismo focal. También se visualizan los diagramas de rosetas de las zonas de fallas mencionadas anteriormente.

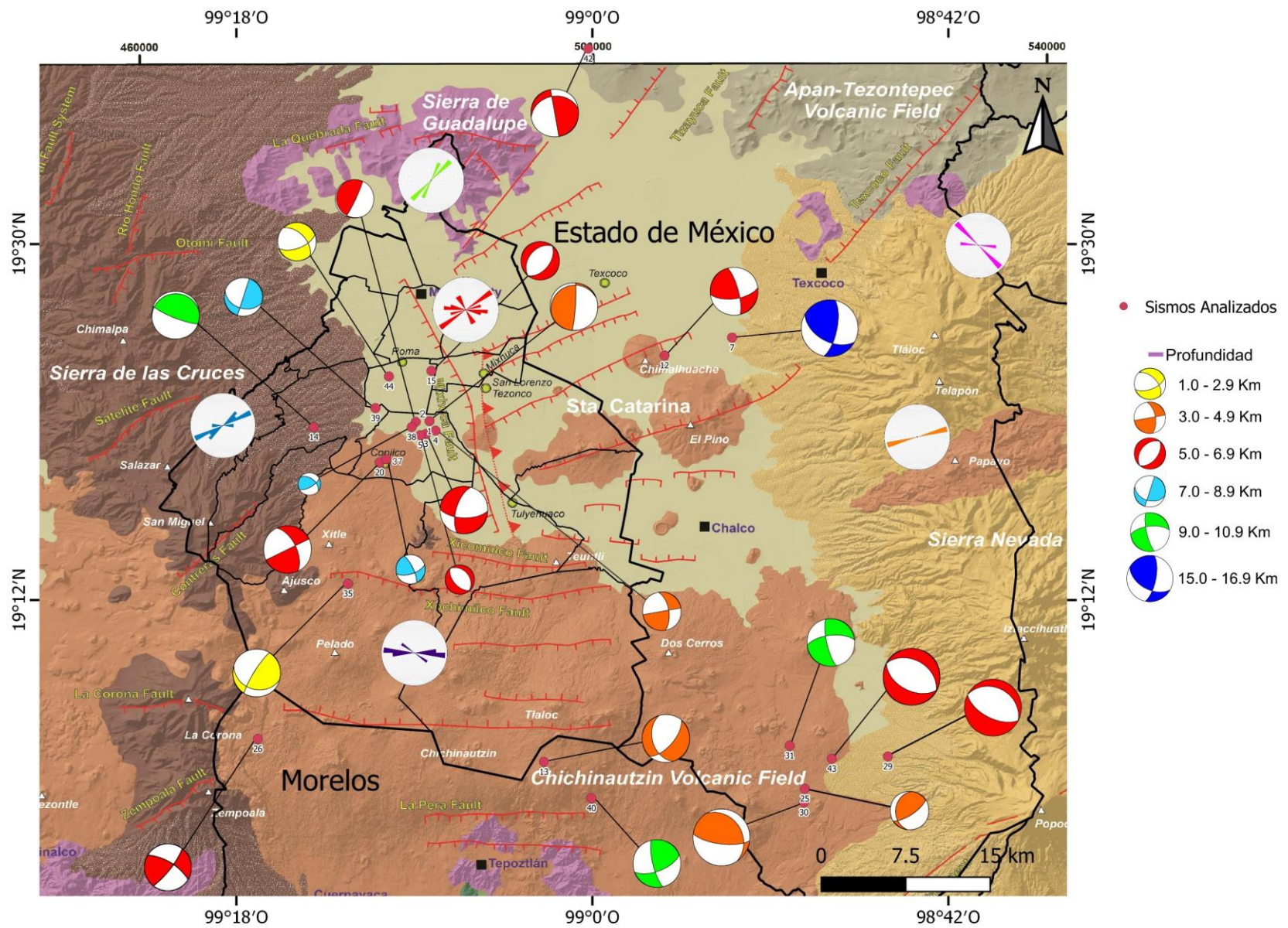


Figura 21.- Ubicación espacial de los mecanismos focales de los 24 sismos con epicentro en la Cuenca de México.

Continuando con la relación sismo–falla, en la **Tabla 3** se muestra una interpretación de a que falla le corresponde cada uno de los sismos.

Tabla 3.- Relación de la orientación de los planos de los sismos con alguna falla de la Cuenca de México.

Evento	Plano 1		Plano 2		Falla relacionada
	Strike	Dip	Strike	Dip	
1	4	85	247.70	11.17	Sistema de fallas Las Cruces
2	160	7	25.21	85.06	Sistema de fallas Sierra de Guadalupe
3	92	63	196.69	63.54	Sistema de fallas Sierra de Las Cruces, Tepetlaoxtoc, Norte (Arce), Sur (Arce)
4	350	60	260	90	Tepetlaoxtoc
5	320	35	138.78	55.01	Norte (Arce)
7	119	52	11.58	69.04	No se encontró alguna relación
12	82	64	344.84	75.66	Sistema de fallas Las Cruces, Sur (Arce)
13	41	64	163.05	42.59	Sistema de fallas Las Cruces, Sierra de Guadalupe
14	264	11	111.43	80.21	Sistema de fallas Las Cruces, Sur (Arce)
15	220	40	38.69	50.01	Sistema de fallas Las Cruces, Sierra de Guadalupe
20	334	60	244	90	Norte (Arce), sistema de fallas Las Cruces
25	186	28	56.53	71.33	Sistema de fallas Las Cruces, Norte (Arce)
26	38	76	300.97	63.86	Sur (Arce)
29	298	30	116.85	60.01	No se encontró alguna relación
30	97	71	326.70	28.03	Sistema de fallas Las Cruces, Tepetlaoxtoc, Norte (Arce), Sur (Arce)
31	167	76	263.73	64.83	Sistema de fallas Las Cruces, Sur (Arce)
35	212	81	106.84	31.20	Norte (Arce)
37	72	64	334.84	75.66	Norte (Arce), Sistema de fallas El Tezoyo
38	60	67	307.97	48.54	Sur (Arce)
39	198	90	108	40	Norte (Arce)
40	166	76	68.97	63.86	Sistema de fallas Las Cruces
42	260	30	170	90	Sistema de fallas Las Cruces, Sur (Arce)
43	299	40	117.69	50.01	No se encontró alguna relación
44	316	54	69.12	61.61	Tepetlaoxtoc, Sistema de fallas Las Cruces

6. Discusión de resultados

Se registró una alta incidencia de eventos sísmicos durante el año 2017, en total fueron 44 sismos los eventos que se registraron en la zona de estudio seleccionada, que es la porción sur de la Cuenca de México. Los primeros ocho meses se generaron 19 sismos, mientras que en los últimos cuatro meses se generaron 25 sismos. Los sismos registrados se caracterizan por ser poco profundos y de baja magnitud. Las profundidades son menores a los 18 km, mientras que la magnitud varía entre 1.0 a 3.5. Cabe destacar que la mayor concentración de sismos registrados se encuentra en la parte sur de la Ciudad de México.

6.1 Los mecanismos focales y las fallas cartografiadas

Como ya se mencionó anteriormente, en la zona de estudio se registraron cuarenta y cuatro sismos, en el cual se ha logrado calcular veinticuatro mecanismos focales, de los cuales cuatro son normales, tres inversos y diecisiete son transcurrentes, como puede observarse en la Tabla 2.

Los diferentes tipos de mecanismos focales que se obtuvieron corresponden a diversos sistemas de fallas existentes en la Cuenca de México, podemos notar que las fallas que más predominan son las de tipo transcurrente, mientras que las fallas normales e inversas son mínimas.

La relación de los sismos con respecto a la información de las fallas cartografiadas nos indica que la mayoría de los sismos si presentan una orientación parecida entre ambas. Al realizar la comparación de las orientaciones en algunos eventos se dieron como resultado más de una posible relación con una falla (Tabla 3). Cabe resaltar que los sismos se relacionan más con las fallas que se encuentran en la Sierra de las Cruces, por ejemplo, para los eventos 1, 3, 12, 13, 14, 15, 20, 25, 30, 31, 40, 42 y 44 presentan su orientación parecida a alguna falla que se encuentra en dicho sistema de fallas.

6.2 Sismicidad de la Cuenca de México y su relación con los sismos > 6.0

El Servicio Sismológico Nacional en su apartado de sismos fuertes, clasifica a los eventos de este tipo aquellos que presentan una magnitud igual o mayor a 6. En el 2017 en México ocurrieron cuatro sismos que se registraron con esa clasificación en su magnitud. Se hizo una comparación con el número de sismos ocurridos antes y después de los sismos fuertes registrados.

El primer evento de los cuatro ocurrió el día 14 de junio a las 02:29 horas con una magnitud de 7.0, el cual se localizó en las cercanías de Cd. Hidalgo, Chiapas. En dicho sismo no se aprecia un aumento de sismos en nuestra zona de estudio, por lo cual se descarta que este sismo haya tenido alguna consecuencia importante dentro de la Cuenca de México.

El siguiente evento mayor a 6, ocurrió el día 7 de septiembre a las 23:49 horas y fue un sismo con magnitud 8.2 localizado en el Golfo de Tehuantepec (a 133 km al suroeste de Pijijiapan, Chiapas). A pesar de ser el sismo que se registró con la más alta magnitud de los últimos años, al parecer tampoco tuvo tanta relación con los sismos originados en nuestra zona de estudio, después de este evento solo se registró un sismo en la Ciudad de México y fue días después, tal vez la lejanía de la ubicación fue el factor.

Posteriormente siguió el sismo del día 19 de septiembre a las 13:14 horas con una magnitud de 7.1 y con una localización en el límite estatal entre los estados de Puebla y Morelos. Este sismo es considerado como uno de los más importantes en los últimos años, tal vez su magnitud no es tan grande como el anterior pero sí fue el que más consecuencias trajo, después de este sismo se registraron cinco eventos sísmicos con origen en nuestra zona de estudio durante los tres días siguientes.

Finalmente, el último sismo clasificado como un sismo fuerte ocurrió el día 23 de septiembre a las 07:53 en las cercanías del municipio de Unión Hidalgo, Oaxaca con una magnitud de 6.1, después de este sismo ocurrieron varios eventos sísmicos en la porción seleccionada a estudiar de la Cuenca de México días más adelante.

Cómo ya se mencionó, el sismo del 19 de septiembre ha sido de los más importantes registrados y si hacemos una relación con nuestra zona de estudio que se seleccionó,

podemos ver claramente que antes de ese evento habían ocurrido un total de diecinueve sismos y después de la ocurrencia de ese evento se registraron veinticinco sismos más con epicentro en la Cuenca de México, para así tener un total de cuarenta y cuatro sismos, lo cual fue más de la mitad de los sismos ocurridos en los últimos cuatro meses del año.

Podríamos decir que tal vez el sismo del 19 de septiembre fue uno de los factores por los cuales hubo un aumento en la cantidad de sismos registrados. Aquí la importancia y diferencia con los otros sismos fuertes fue la cercanía de su epicentro a la Cuenca de México. Se consideraría como una hipótesis importante que los sismos ocurridos en la costa o en sus cercanías a la Cuenca de México hayan formado parte de la acumulación de tensión regional y al liberarse esa energía generar microsismicidad. Dicha hipótesis no se encuentra tan alejada de la realidad, anteriormente ya se ha reportado un caso parecido, donde la sismicidad local en la Cuenca de México se disparó luego de la ocurrencia de grandes sismos fuera de la zona de la Cuenca de México (Singh et al, 1998).

6.3 La sismicidad y su relación con la subsidencia en la Ciudad de México

La **Figura 22** es la representación de la ubicación de los sismos ocurridos durante el 2017 en el subsuelo de la Ciudad de México, se empleó el mapa de las zonas de zonificación geotécnica de la Ciudad de México, con el objetivo de conocer la distribución de los sismos en las tres importantes zonas geotécnicas.

La Ciudad de México forma parte de la Cuenca de México, por lo tanto, se encuentra en una zona donde hay presencia sísmica, derivada por su actividad microsísmica y también cuenta con alta densidad de población, lo cual la convierte en un área de riesgo geológico. El riesgo es mayor hacia la parte central y oriente de la Ciudad, precisamente en la parte aledaña a la zona de lago. En este tipo de suelo que consiste en depósitos lacustres blandos, lo cual favorece la amplificación de las ondas sísmicas y eso hace que sea la zona más riesgosa ante un sismo.

El objetivo de la **Figura 22** fue conocer la ubicación de los sismos respecto al mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México, por lo cual se superpusieron todos los sismos en el mapa, por lo cual se aprecia que del total de eventos son solo tres sismos (4, 15 y 36) los que se encuentran en la zona de lago y un evento (1) se encuentre entre el límite de la zona de lago y la zona transición. Mientras que el resto de los eventos sísmicos se encuentran posicionados en la zona de transición o en la zona firme de la Ciudad de México. Por lo tanto, con esta información podemos ir descartando la opción de que por lo menos en el caso de la actividad sísmica de 2017 en nuestra zona de estudio es debido al hundimiento que presentan ciertas zonas de la ciudad.

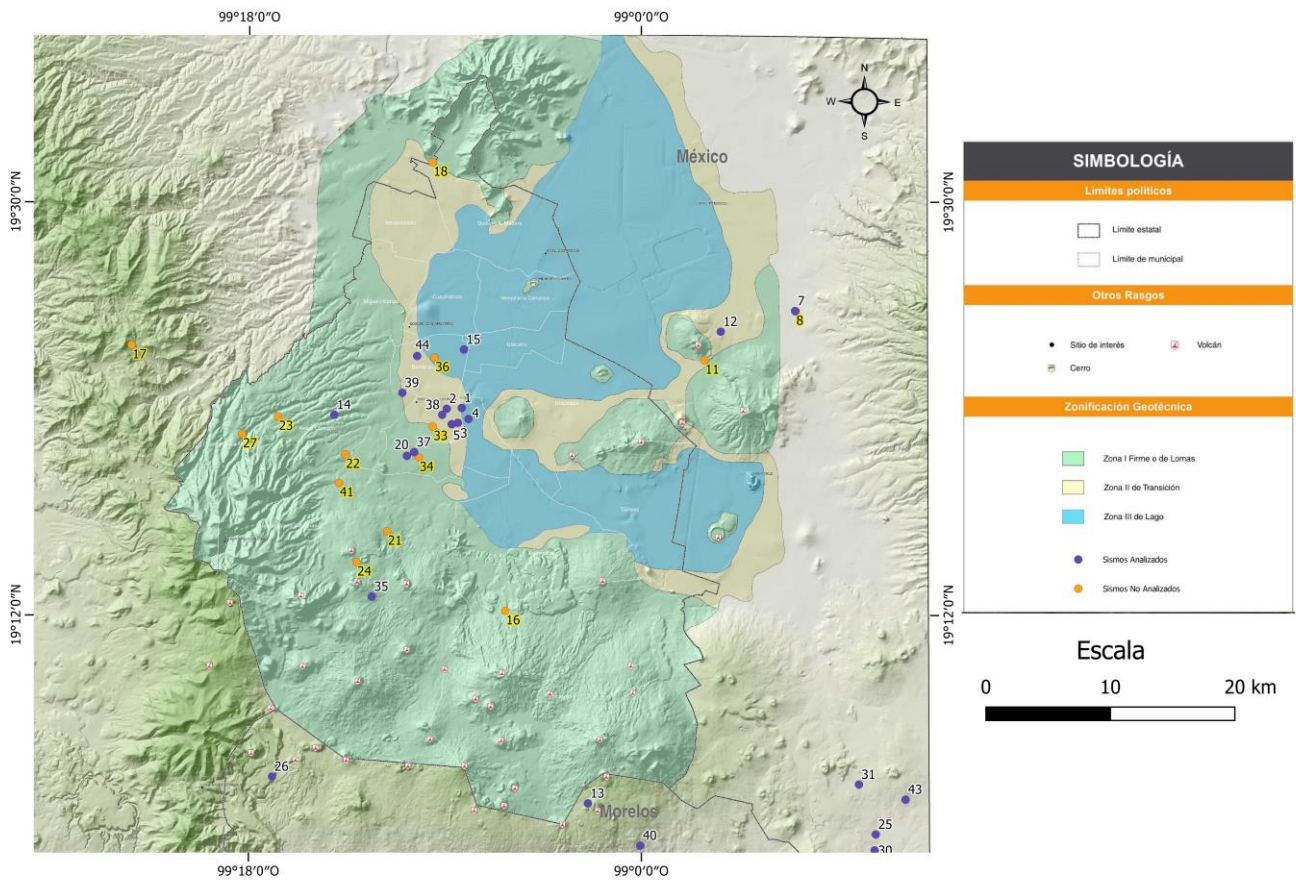


Figura 22.- Distribución de los sismos ocurridos durante el 2017 en el mapa de zonificación geotécnica.

6.4 Recurrencia de sismicidad de la Cuenca de México

Si bien no podemos desligar la actividad sísmica en la Cuenca de México de la tectónica regional como una consecuencia de la posible interacción y transferencia de esfuerzos entre las zonas de ocurrencia de grandes sismos y la Faja Volcánica Transmexicana, es posible observar, dentro de la propia cuenca, una mayor incidencia de eventos en las zonas donde los materiales geológicos poseen propiedades mecánicas que permiten la propagación de ondas sísmicas produciendo movimientos locales de menor intensidad.

La actividad sísmica en esta zona geográfica ha existido desde hace mucho tiempo, y en los últimos años se ha mantenido constante la cantidad de eventos sísmicos, han existido comentarios de la población acerca de que ahora tiembla mucho más que antes, pero eso no es verdadero, tal vez se debe a que ahora se cuenta con mayor facilidad de registros sísmicos con más equipos instalados y con mayor cobertura de red para poder comunicarnos y eso facilita la distribución de los eventos registrados. Por lo tanto, seguirán existiendo una cantidad de sismos en la Cuenca de México, como también en toda la República Mexicana por su interacción con cinco placas tectónicas.

7. Conclusiones

— Nuestra zona de estudio se encuentra sobre sistemas de fallas geológicas, así que tenemos presencia de fallas activas en el subsuelo, las cuales son la causa principal de que se originen sismos de baja magnitud. Los sismos ocurrieron sobre fallas preexistentes y para que ocurra un evento sísmico debe de existir alguna falla activa en el subsuelo.

— Después de comparar la orientación de las fallas con los mecanismos focales, se encontraron en la mayoría de los sismos analizados cierta similitud, lo cual nos está indicando que hay cierta correlación con los alineamientos de las estructuras geológicas cartografiadas en la Cuenca de México.

— Estas correlaciones resultan ser bastante interesantes, la cual nos lleva a un tema de vital importancia para determinar el peligro sísmico en la zona político-económica más importante del país.

— Es algo complicado determinar con exactitud qué fallas son las que se encuentran activas, pero al observar el análisis, se podría hacer una hipótesis que las fallas que se encuentran en la Sierra de las Cruces son las que presentan mayor índice de actividad.

— Debido a que las fallas Mixhuca, Chapultepec y Santa Catarina no son fallas completamente rectas no se tienen los valores precisos del rumbo y echado por lo que no se pudieron ingresar en los diagramas de rosetas, así que no podríamos destacar esas fallas como activas.

— Se sabe por la ley de escalamiento que el tamaño de un sismo está en relación directa con el tamaño de la falla involucrada, a lo cual mientras mayor sea la longitud de la falla, la magnitud del sismo podría ser mayor. Las fallas cartografiadas en la Cuenca de México son de longitudes pequeñas pero también hay fallas que exceden los 20 km de longitud, al tener fallas de esta longitud se esperarían sismos de magnitud de aproximadamente 6.0, pero en la Cuenca de México no se tienen registros de sismos con esa magnitud, los registros que se tienen han mostrado sismos de magnitud

pequeña, por lo tanto podría decirse que dicha ley no aplica en esta zona pero tampoco podría descartarse esa opción debido a la presencia de varias fallas que presentan una longitud superior a los 20 km y si llegara a ocurrir un sismo de tal magnitud sería un completo desastre para la Cuenca de México.

— Una de las causas importantes de que haya existido un aumento en el número de sismos con epicentro en la Cuenca de México a comparación de otros años, se explica por la ocurrencia de otros sismos de gran magnitud, en este caso fue por el sismo del 19 de septiembre del 2017, que fue de una magnitud importante y muy cerca de la Cuenca de México, por lo cual se resintió la llegada de las ondas sísmicas e hizo que se acumulara energía en las fallas, por lo tanto eso pudo haber provocado que las fallas preexistentes se hayan activado y que esa acumulación de energía se vaya liberando y eso haya ocasionado la alta cantidad de actividad sísmica.

— La zona de lago o zona lacustre no es la fuente principal que da origen a los sismos, pero si es la zona más vulnerable en la Ciudad de México por el material que compone a esa parte de la ciudad, por lo tanto, se descarta que la subsidencia sea la causa mayor del origen de los sismos.

— Las fallas que se encuentran en la Cuenca de México son de suma importancia en el marco tectónico, aunque cabe enfatizar que aún no han sido cartografiadas en su totalidad y varias de ellas no han sido estudiadas a detalle.

— Debido a la urbanización y a la alta densidad de población no es tan sencillo poder estudiar las fallas geológicas que hay en la Ciudad de México, así que como recomendación se sugiere llevar a cabo un mayor monitoreo de los sistemas de fallas mediante métodos geofísicos.

— Una recomendación que sería de gran utilidad es poder elaborar mayor cantidad de mapas de riesgo, los cuales ayuden a conocer las zonas que se encuentran con mayor riesgo sísmico en zonas que son más vulnerables de la Ciudad de México.

— Por la geología que se presenta en la Cuenca de México y por su ubicación tectónica, seguirá la ocurrencia de eventos sísmicos de magnitudes pequeñas en la zona. Una recomendación muy importante es difundir y compartir la información adecuada para la

población, las personas deben conocer las zonas sísmicas en las que se encuentran y conocer cuáles son las zonas con mayor riesgo sísmico. No podemos predecir los sismos, pero sí tomar medidas preventivas, como por ejemplo darles importancia a los simulacros.

— Otra de las recomendaciones sería mejorar el reglamento de construcciones, aunque más que nada sería darle la importancia necesaria que se merece y monitorear al máximo que se cumplan al pie de la letra las indicaciones en dicho reglamento, lo cual ayudaría demasiado a tener construcciones adecuadas en la Ciudad de México.

— La sugerencia más conveniente sería no construir ningún tipo de inmueble sobre las trazas principales de las fallas, aunque actualmente se cuenta con zonas habitadas en las fallas, por lo cual ahí la recomendación sería monitorear y observar periódicamente su comportamiento.

Referencias:

- Arce, J. L., Layer, P. W., Lassiter, J. C., Benowitz, J. A., Macías, J. L., & Ramírez-Espinosa, J. (2013). 40 Ar/39 Ar dating, geochemistry, and isotopic analyses of the quaternary Chichinautzin volcanic field, south of Mexico City: implications for timing, eruption rate, and distribution of volcanism. *Bulletin of Volcanology*, 75(12), 1-25.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., ... & Vásquez-Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320-332.
- Arce, J. L., Ferrari, L., Morales-Casique, E., Vasquez-Serrano, A., Arroyo, S. M., Layer, P. W., ... & López-Martínez, M. (2020). Early Miocene arc volcanism in the Mexico City Basin: Inception of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 408, 107104.
- Arellano Gil J., de la Lata Romero, R., Carreón Méndez, M. A., Morales Barrera, W. V. & Villareal Morán, J. C. (2002). *Ejercicios de Geología Estructural. México*, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2002, 166p.
- Bolt, B. A. (1993). Earthquakes WH Freeman. *New York*.
- Campos-Enríquez, J. O., Lermo-Samaniego, J. F., Antayhua-Vera, Y. T., Chavacán, M., & Ramón-Márquez, V. M. (2015). The Aztlán fault system: Control on the emplacement of the Chichinautzin range volcanism, southern Mexico Basin, México. Seismic and gravity characterization. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 315-335.
- Carreón-Freyre, D. (2011). Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal. *Ingeniería Geológica, Al México*, 3-9.
- Cruz Atienza, V. (2013). Los sismos, una amenaza cotidiana. Ciudad de México, México: La caja de cerillos ediciones.
- De Cserna, Z., De la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L. M., y Mota-Palomino, R. (1988). Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México. *Boletín 104*. (F. Ortega-Gutiérrez, Ed.) México, D.F, México: Instituto de Geología, UNAM.
- Ego F. y Ansan V. (2002). Why is the Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102° - 99°W) in transtensive deformation? *Tectonophysics*, 359
- Espíndola, J. M. (1994). *Terremotos y ondas sísmicas* (Vol. 1). UNAM.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92.

- Fries, C. Jr., 1960, Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín del Instituto de Geología, 60, 236.
- Fossen, H. (2010). Structural geology. *Cambridge University Press, New York, 1, 463.*
- García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., 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 de Ciencias Geológicas, 25(1), 158-178.*
- García-Palomo, A., Macías, J. L., Jiménez, A., Tolson, G., Mena, M., Sánchez-Núñez, J. M., ... & Lermo-Samaniego, J. (2018). NW-SE Pliocene-Quaternary extension in the Apan-Acocolco region, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 349, 240-255.*
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la faja volcánica transmexicana. *Boletín de la Sociedad geológica Mexicana, 57(3), 227-283.*
- González Torres, E. A., Morán Zenteno, D. J., Mori, L., & Martiny, B. M. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67(2), 285-297.*
- Jaimes-Viera, M. C., Del Pozzo, A. M., Layer, P. W., Benowitz, J. A., & Nieto-Torres, A. (2018). Timing the evolution of a monogenetic volcanic field: Sierra Chichinautzin, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 356, 225-242.*
- López Capir, C.O.C., 2020, Estudio de la estructura cortical somera del sureste de la cuenca de México (Xochimilco), con base en un estudio gravimétrico: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría.
- Marsal, R.J., Mazari, M. (2016). El Subsuelo de la Ciudad de México Vol. I. (Facultad de Ingeniería, Ed.) México, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Miller, M.R. (2017). Mecanismo Focal. Universidad de Concepción, Chile https://www.mttmllr.com/sismologia_files/513430sae_mf.pdf
- Mooser, F., & Ramírez, M.T., (1987). Faja Volcánica Transmexicana: Morfoestructura, Tectónica, y Vulcanotectónica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana XLVIII 75–80.*
- Nava, A. (2011). *Terremotos*. Fondo de cultura económica.
- Ottemöller, L., P. Voss, and J. Havskov (2013). Seisan Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSX: Users Manual, 244–249, available at: ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SEISAN/OLDER_VERSIONS/SEISAN_10.0/seisan.pdf

- PEMEX, 1988. Cortes litológicos y registros geofísicos de los pozos profundos exploratorios Roma-1, Mixhuca-1, Tulyehualco-1 y Copilco-1. Fundación Barros Sierra, A.C., México, D.F.
- Pérez-Cruz, G. A. (1988). *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, D.F.
- Protección Civil Ciudad de México, Mapa Zonificación Geotécnica (Julio 2017)
http://data.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/mapas_atlas_09000_Mapas_Zonificacion_Geotecnica.pdf
- Quintanar, L., Cárdenas Ramírez, A., Bello Segura, D. I., Espíndola, V. H., Pérez Santana, J. A., Cárdenas Monroy, C., ... & Rodríguez Rasilla, I. (2018). A seismic network for the Valley of Mexico: Present status and perspectives. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 356-362.
- Ruiz-Angulo, A., & López-Espinoza, E. D. (2015). Estimación de la respuesta térmica de la cuenca lacustre del Valle de México en el siglo XVI: un experimento numérico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 215-225.
- Santoyo-Villa, E., Ovando-Shelley, E., Mooser, F., & León, E. (2005). Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México: México. *DF, México, TGC Ediciones*.
- Sauter, F. (1989). *Introducción a la Sismología*. San José, Costa Rica: ET, 1989.
- Servicio Sismológico Nacional: www.ssn.unam.mx
- SHCP (Secretaría de Hacienda y Crédito Público), 1969, Proyecto Texcoco - Memoria de los trabajos realizados y conclusiones: México, D.F., Fiduciaria Nacional Financiera, S.A.
- Singh, S. K., Anderson, J. G., & Rodríguez, M. (1998). Triggered seismicity in the Valley of Mexico from major Mexican earthquakes. *Geofísica Internacional*, 37(1), 0.
- Stein, S., & Wysession, M. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. Blackwell Publishing.
- Tarbuck, E. J.; Lutgens, F. K., y Tasa, D. (2005). Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física. *Editorial Prentice Hall. Madrid, España*.
- Ugalde, A. (2009). *Terremotos: cuando la tierra tiembla* (Vol. 10). Editorial CSIC-CSIC Press.
- Vázquez-Sánchez, E., & Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 133-190.
- Vidal, F. (1994). Los terremotos y sus causas. *Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos*.

Apéndice I.- Resultados de los mecanismos focales generado por FocMec del software SEISAN.

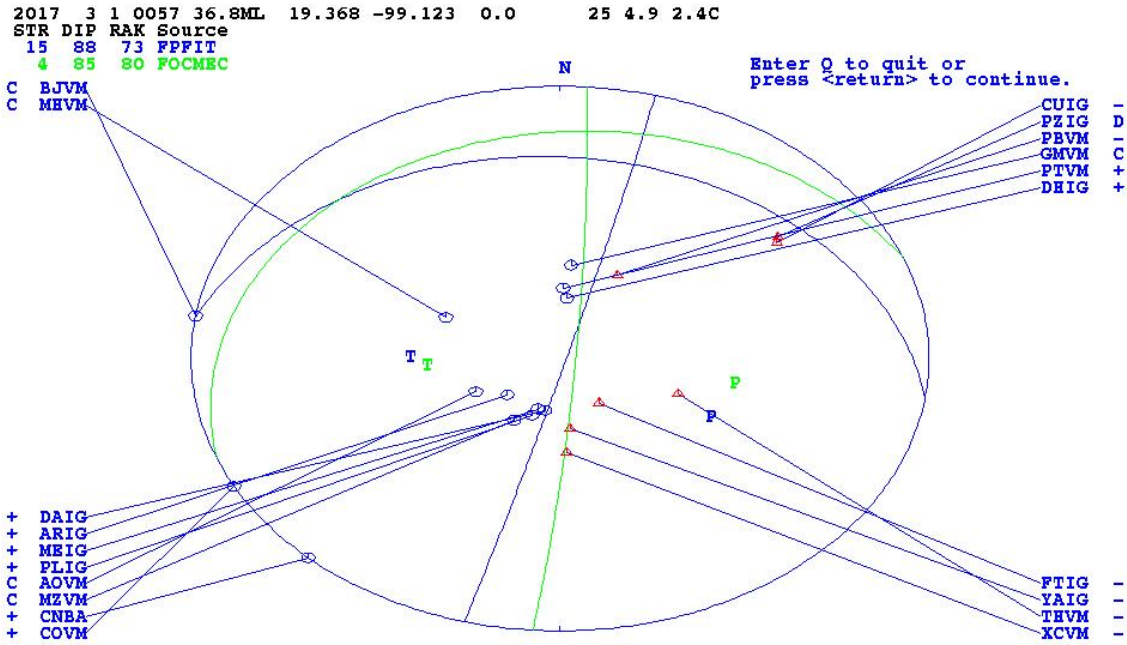


Figura 1.- Evento sísmico #1, 1 de marzo del 2017 a las 00:57 horas.

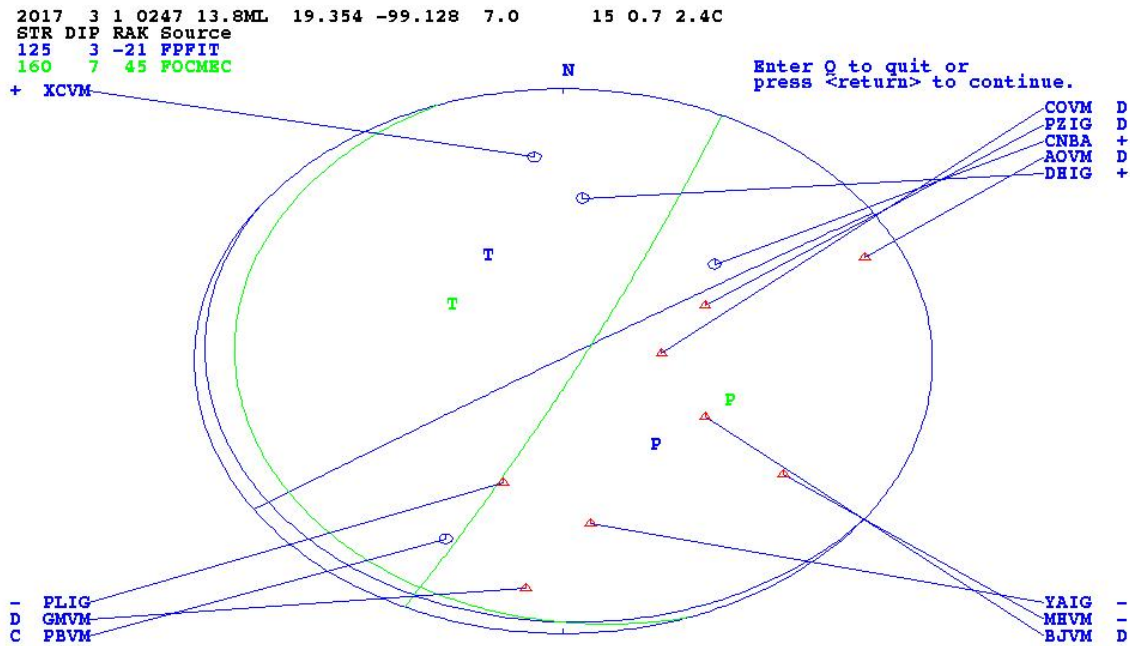


Figura 2.- Evento sísmico #2, 1 de marzo del 2017 a las 02:47 horas.

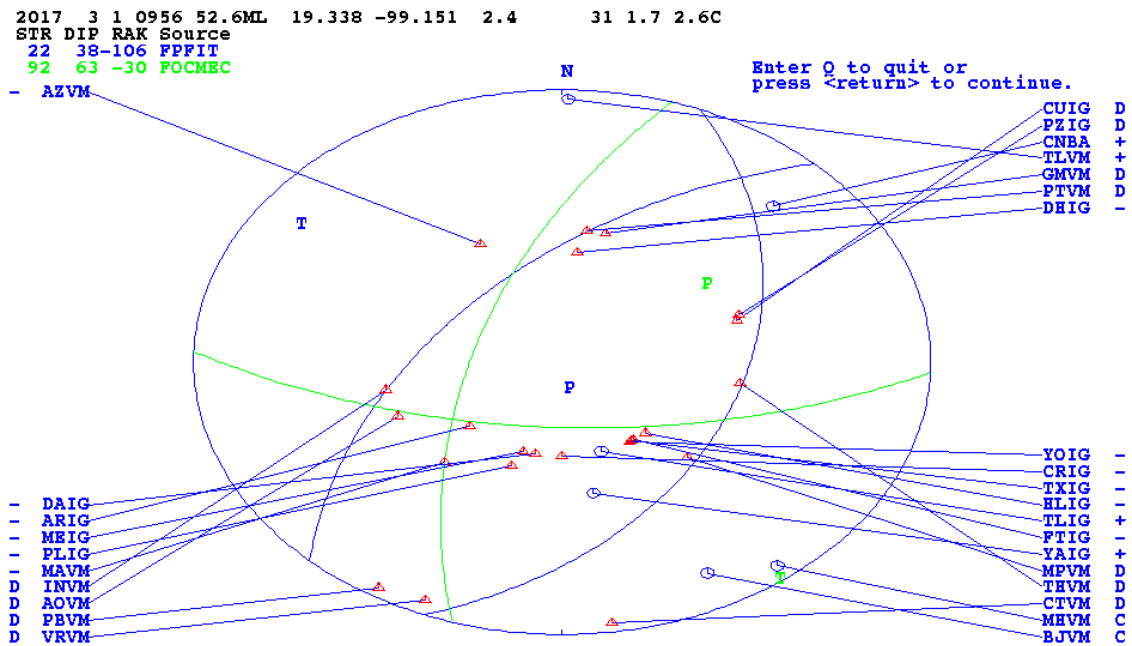


Figura 3.- Evento sísmico #3, 1 de marzo del 2017 a las 09:56 horas.

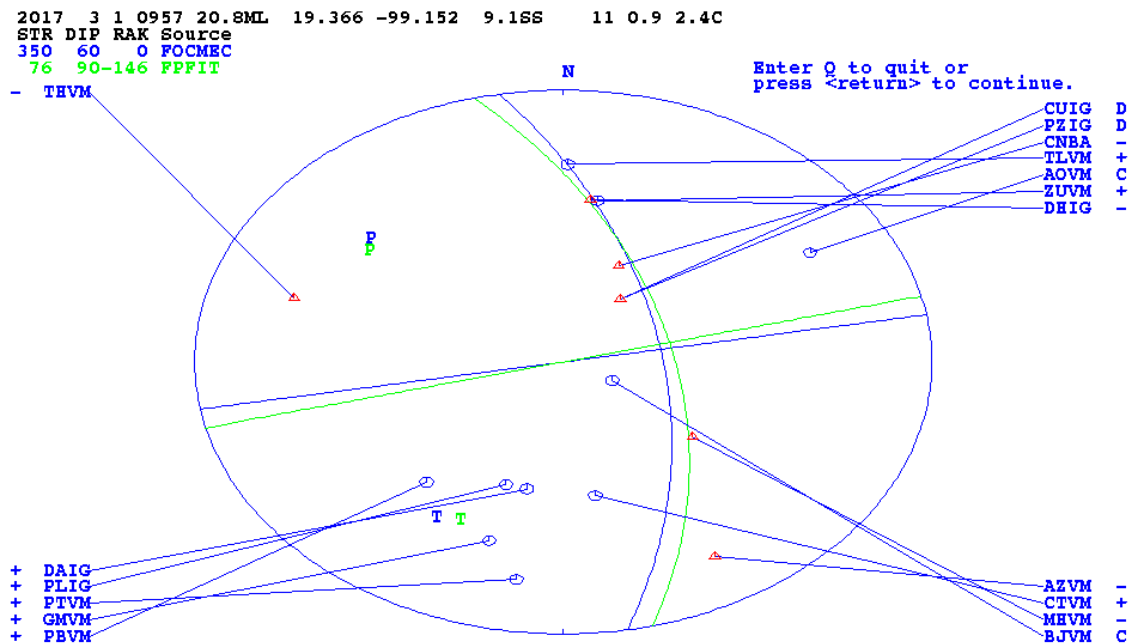


Figura 4.- Evento sísmico #4, 1 de marzo del 2017 a las 09:57 horas.

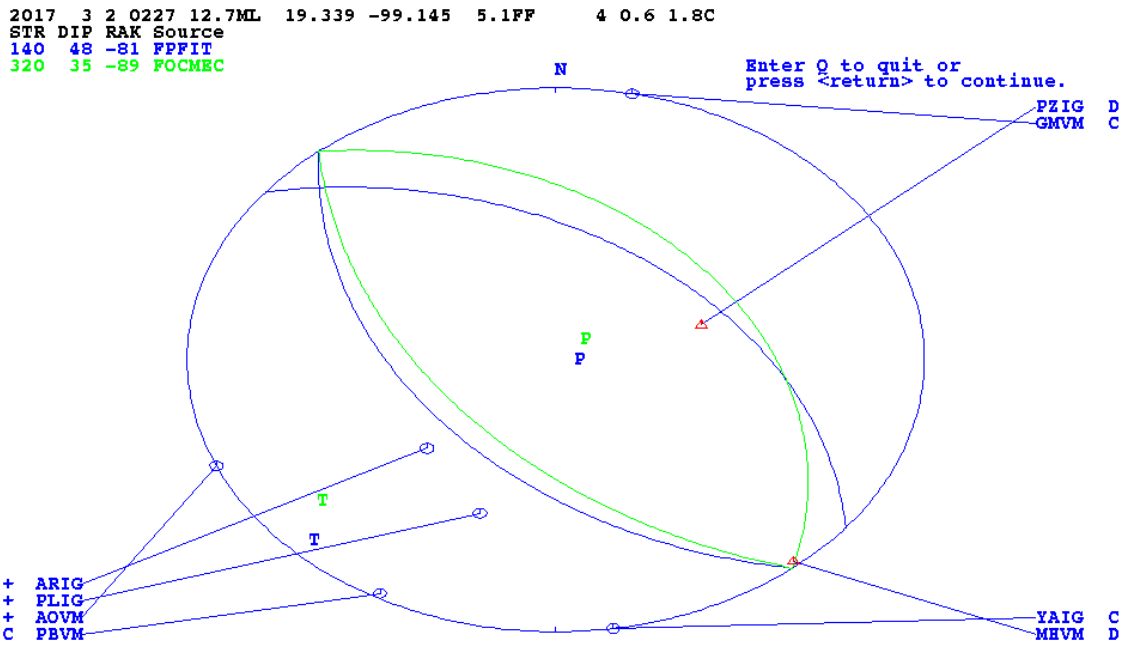


Figura 5.- Evento sísmico #5, 2 de marzo del 2017 a las 02:27 horas.

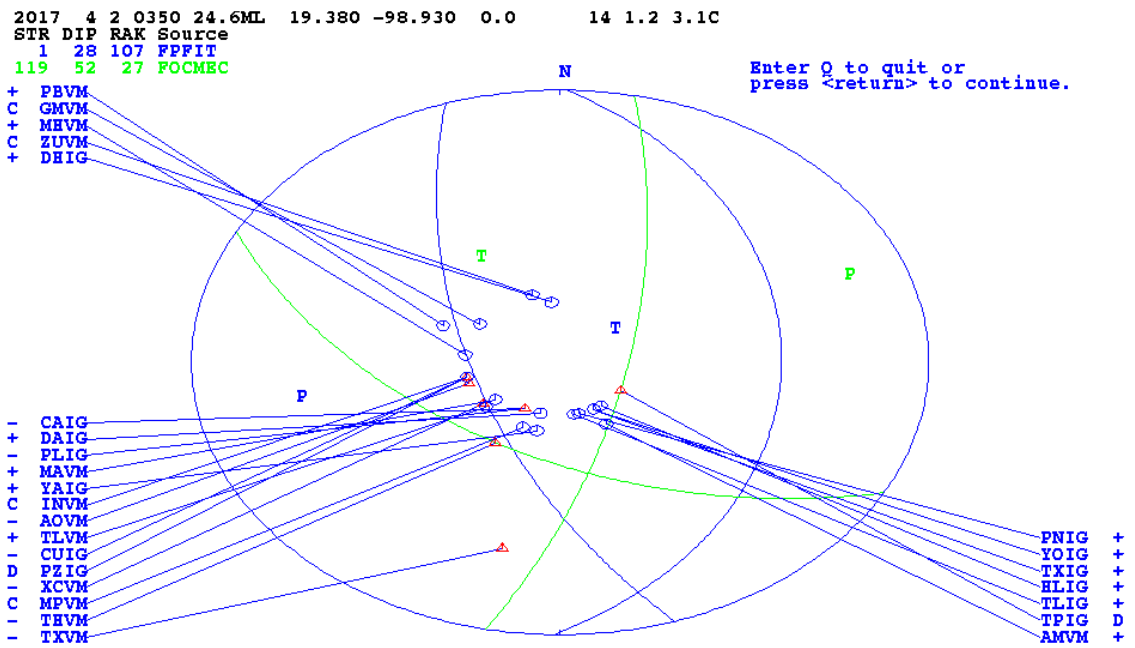


Figura 6.- Evento sísmico #7, 2 de abril del 2017 a las 03:50 horas.

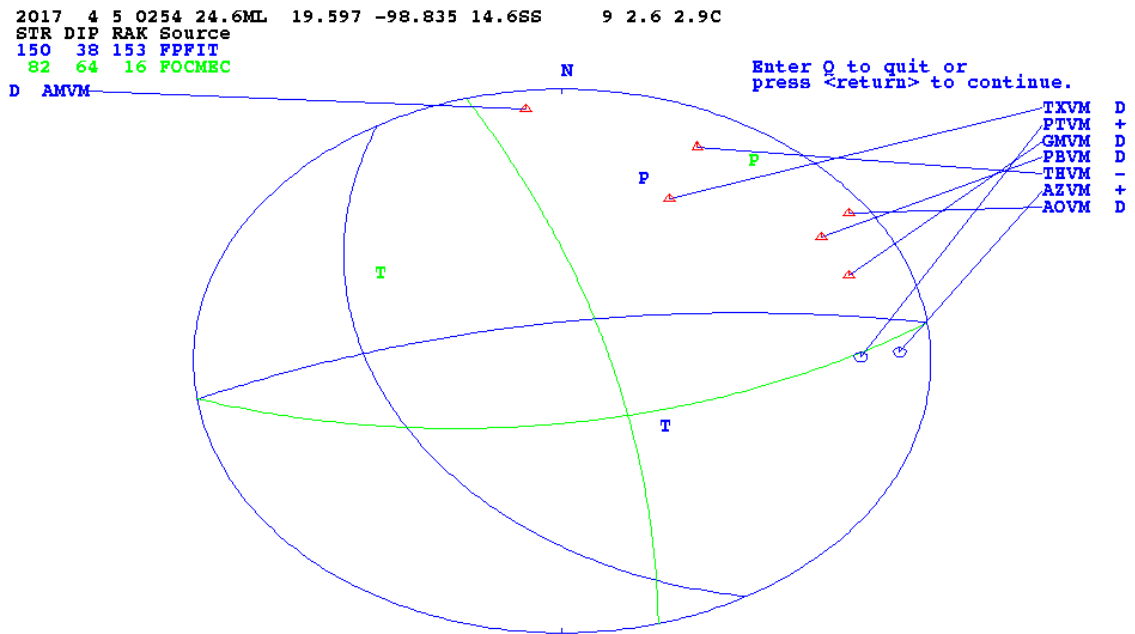


Figura 7.- Evento sísmico #12, 5 de abril del 2017 a las 02:54 horas.

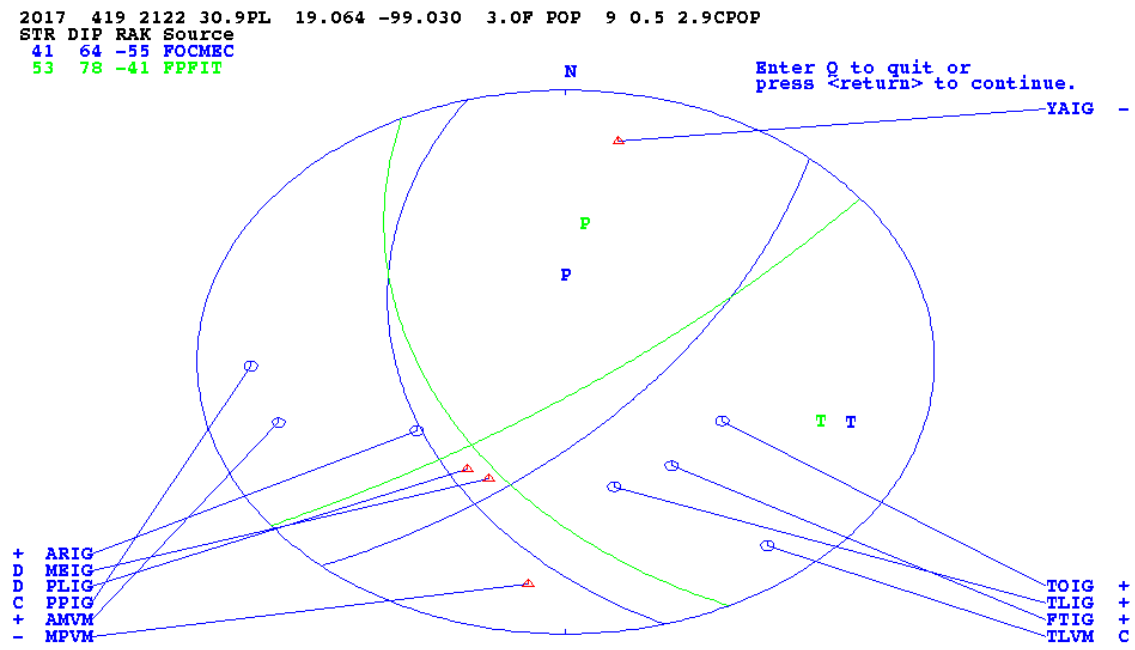


Figura 8.- Evento sísmico #13, 19 de abril del 2017 a las 21:22 horas.

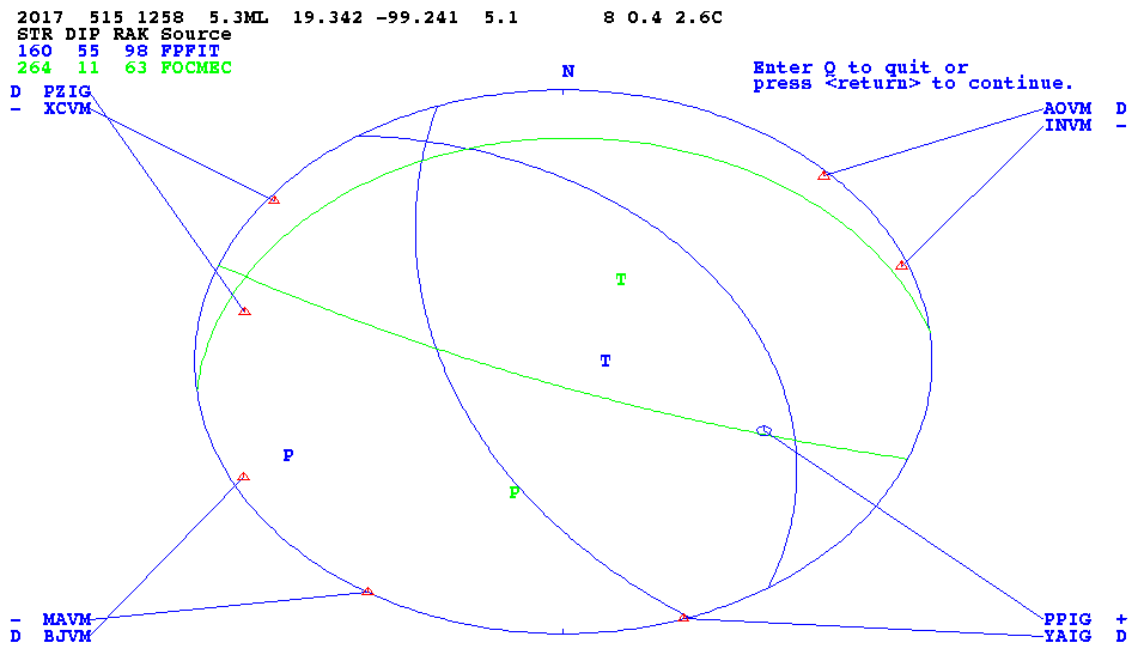


Figura 9.- Evento sísmico #14, 15 de mayo del 2017 a las 12:58 horas.

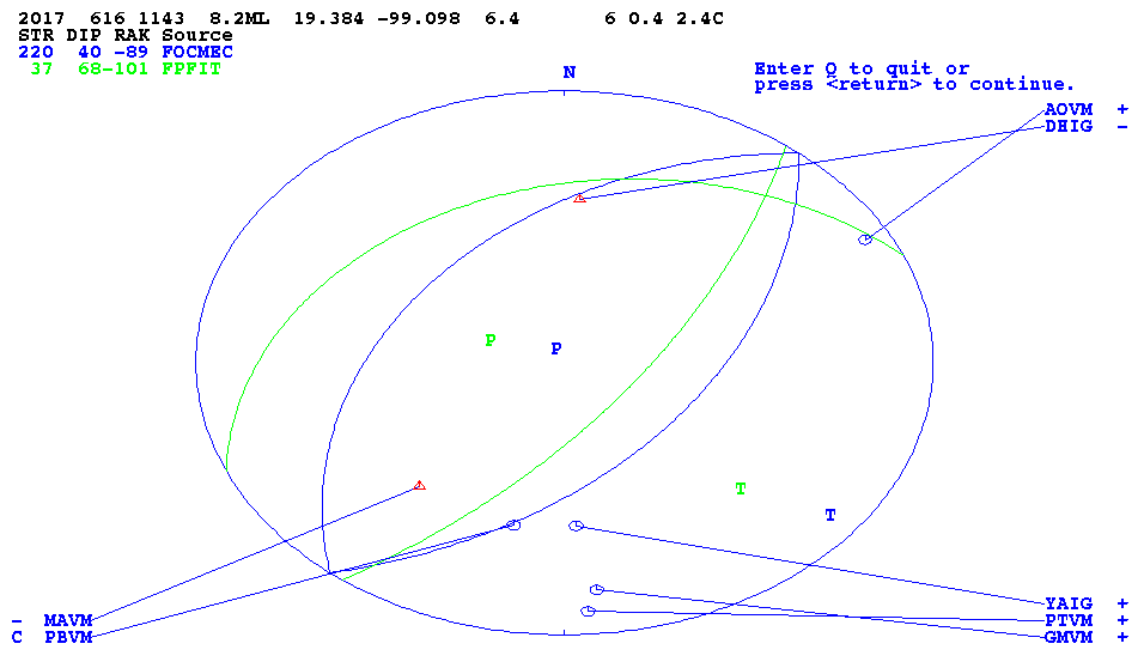


Figura 10.- Evento sísmico #15, 16 de junio del 2017 a las 11:43 horas.

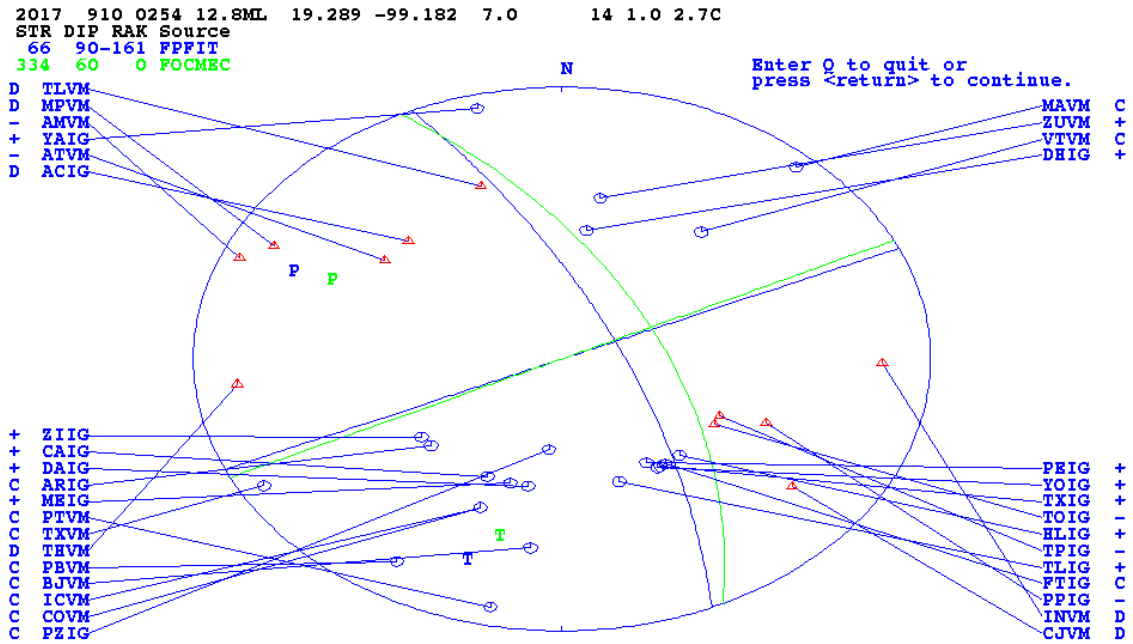


Figura 11.- Evento sísmico #20, 10 de septiembre del 2017 a las 02:54 horas.

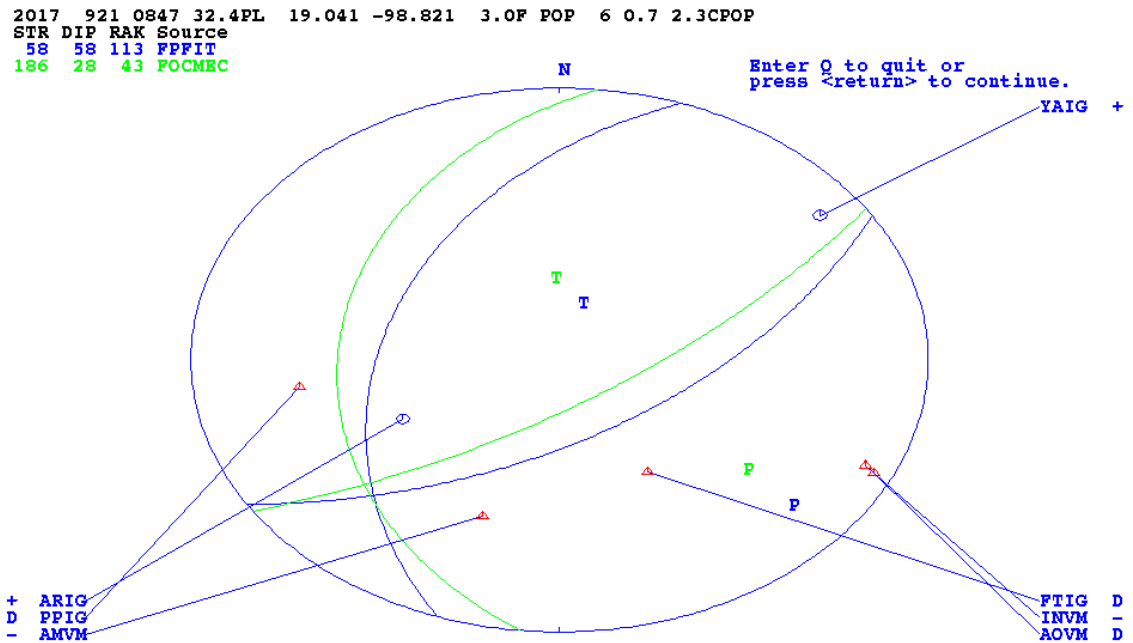


Figura 12.- Evento sísmico #25, 21 de septiembre del 2017 a las 08:47 horas.

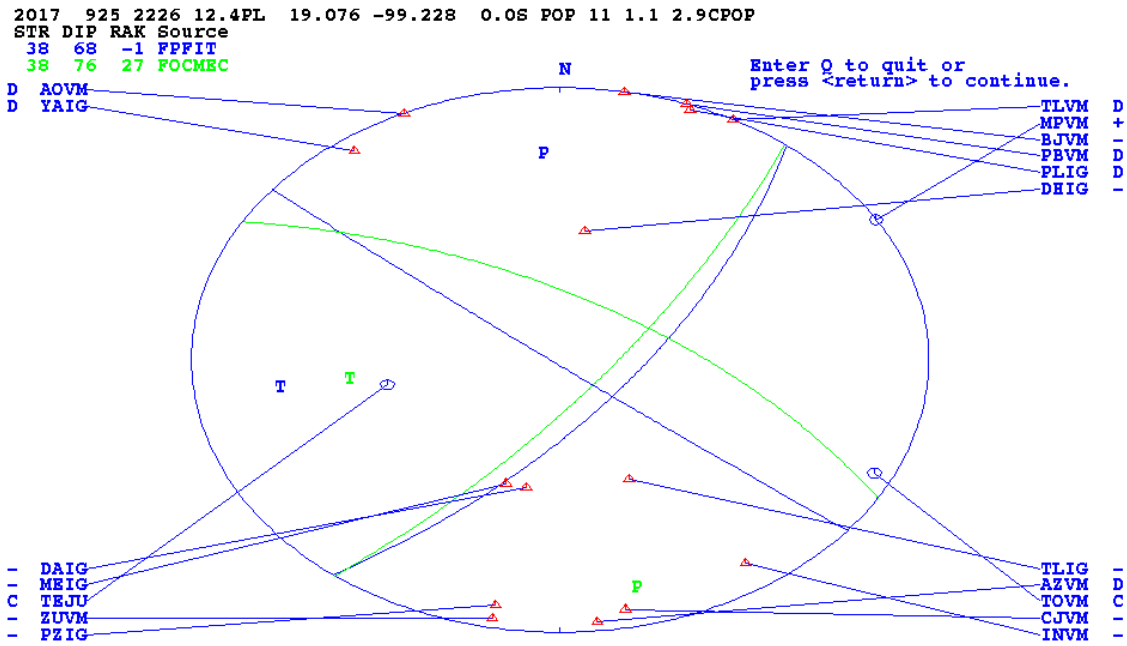


Figura 13.- Evento sísmico #26, 25 de septiembre del 2017 a las 22:26 horas.

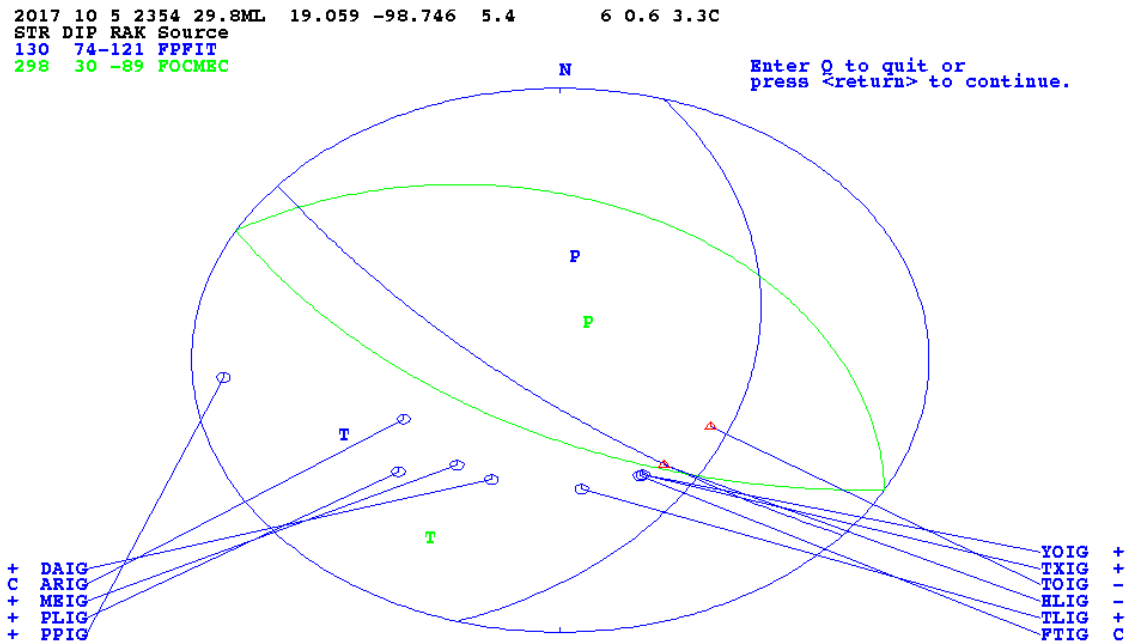


Figura 14.- Evento sísmico #29, 5 de octubre del 2017 a las 23:54 horas.

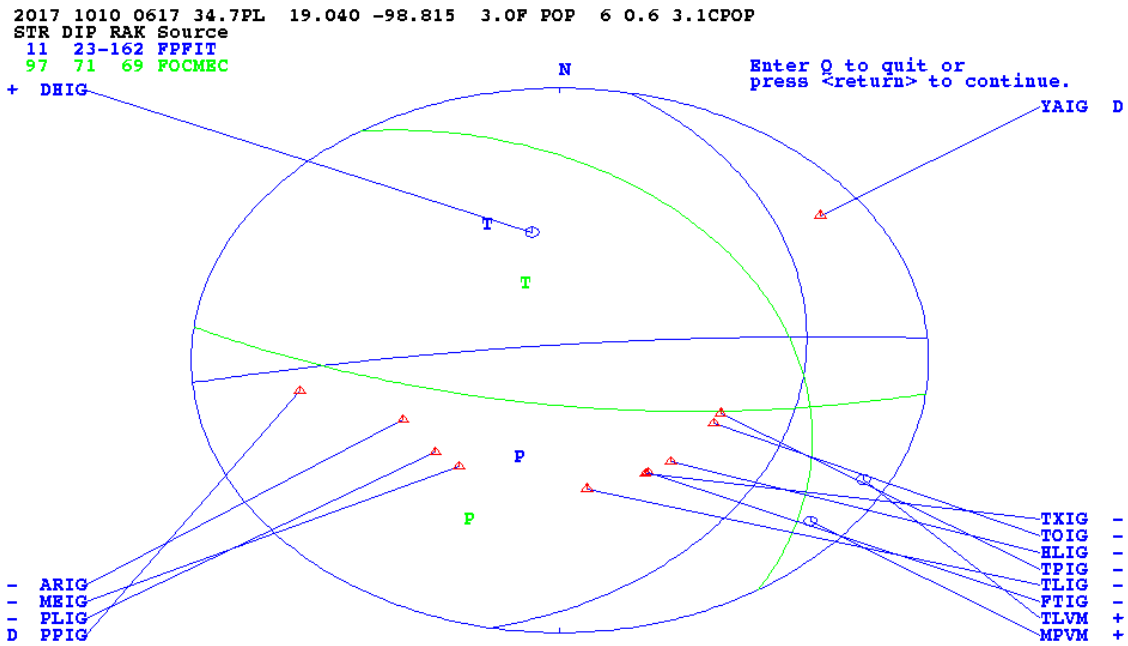


Figura 15.- Evento sísmico #30, 10 de octubre del 2017 a las 06:17 horas.

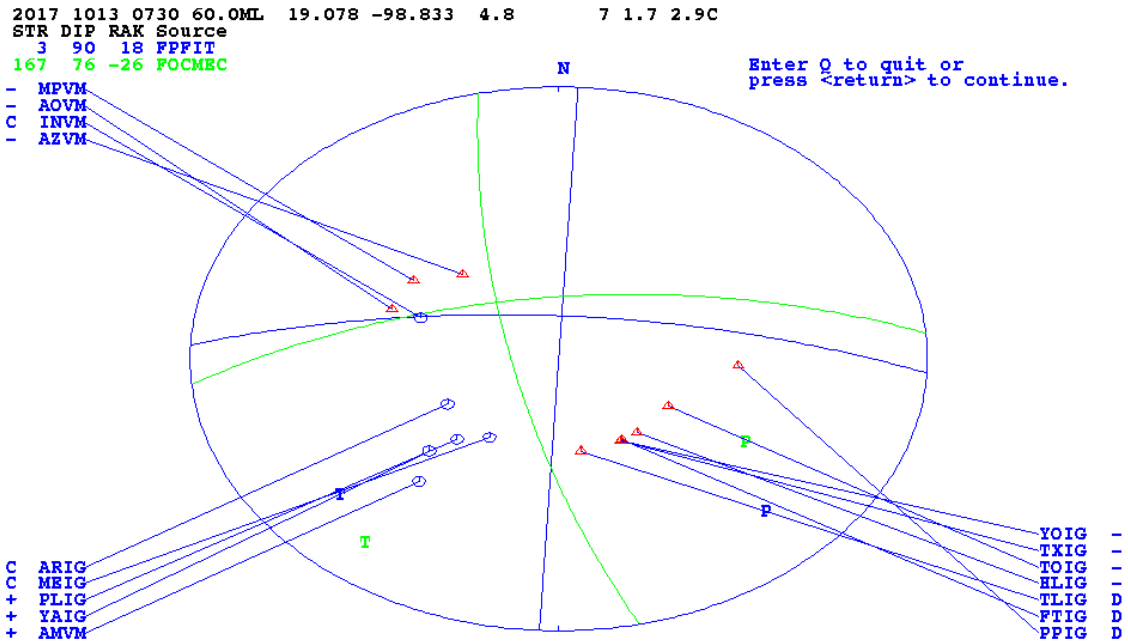


Figura 16.- Evento sísmico #31, 13 de octubre del 2017 a las 07:30 horas.

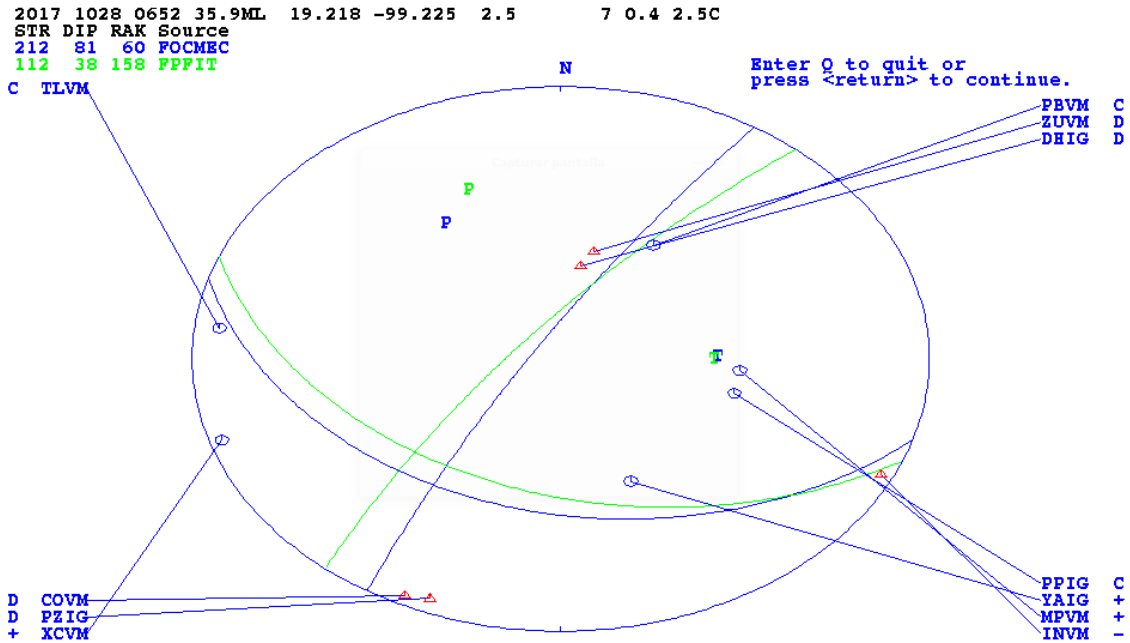


Figura 17.- Evento sísmico #35, 28 de octubre del 2017 a las 06:52 horas.

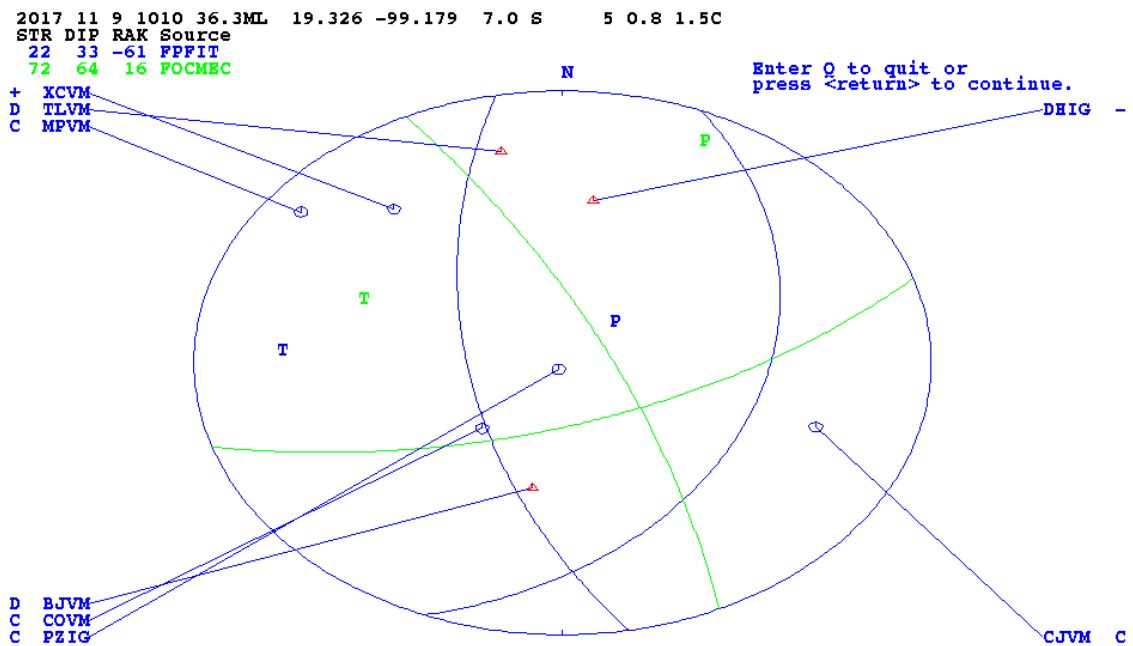


Figura 18.- Evento sísmico #37, 9 de noviembre del 2017 a las 10:10 horas.

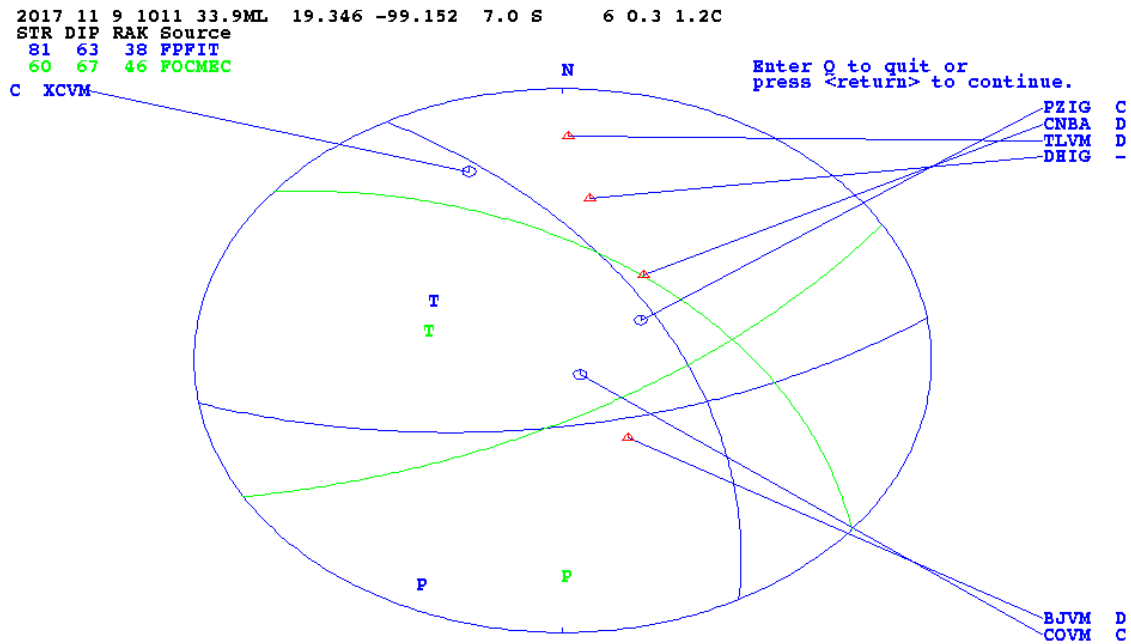


Figura 19.- Evento sísmico #38, 9 de noviembre del 2017 a las 10:11 hrs.

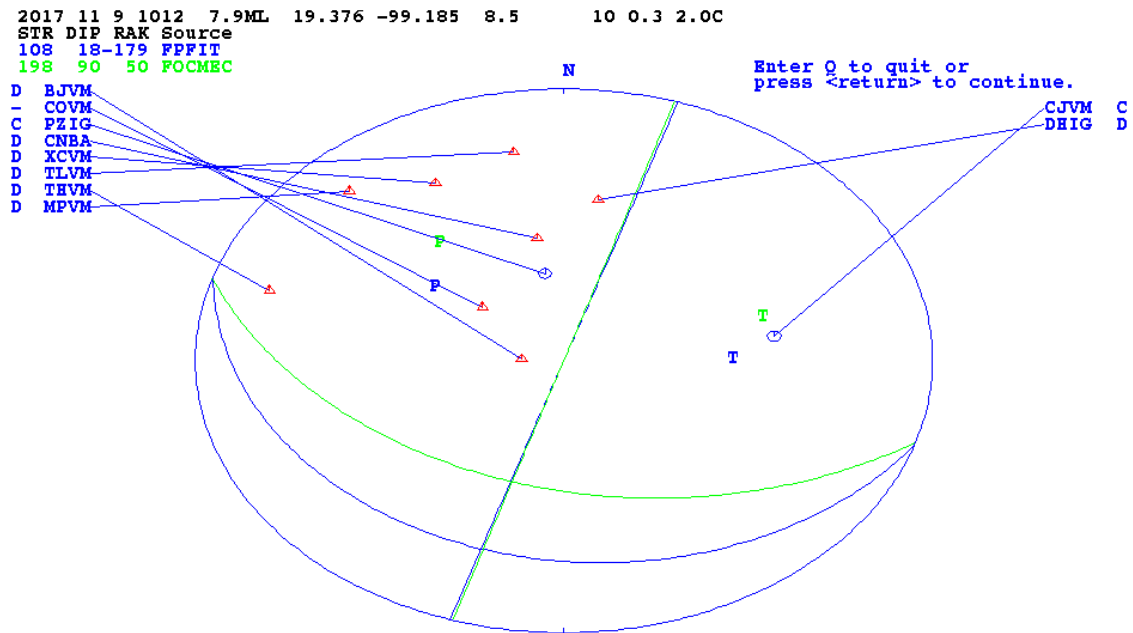


Figura 20.- Evento sísmico #39, 9 de noviembre del 2017 a las 10:12 horas.

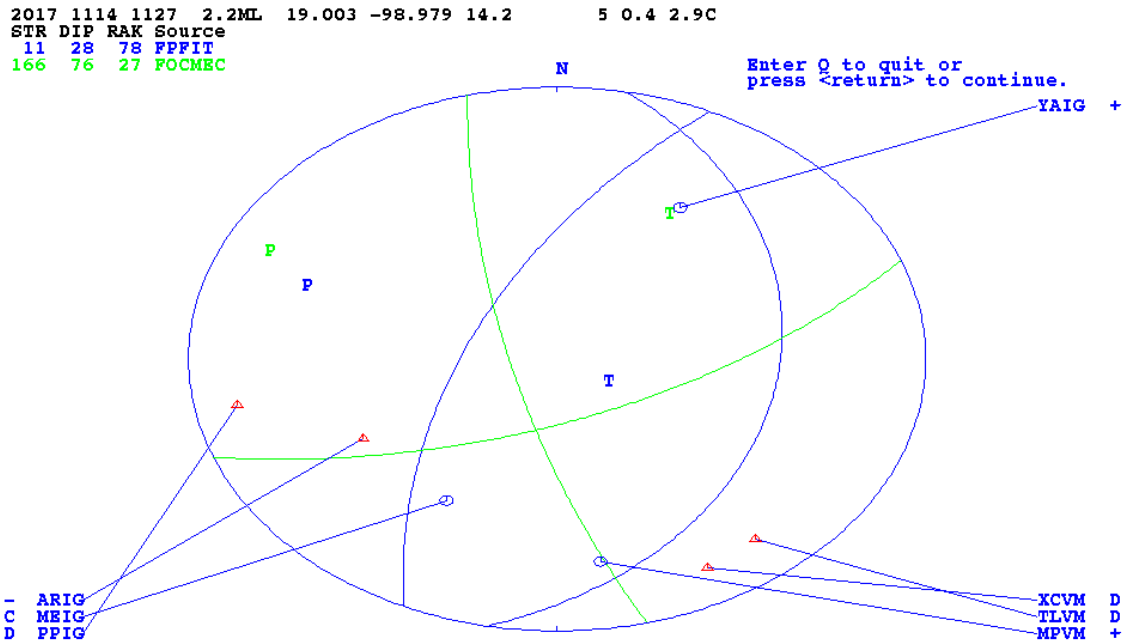


Figura 21.- Evento sísmico #40, 14 de noviembre del 2017 a las 11:27 horas.

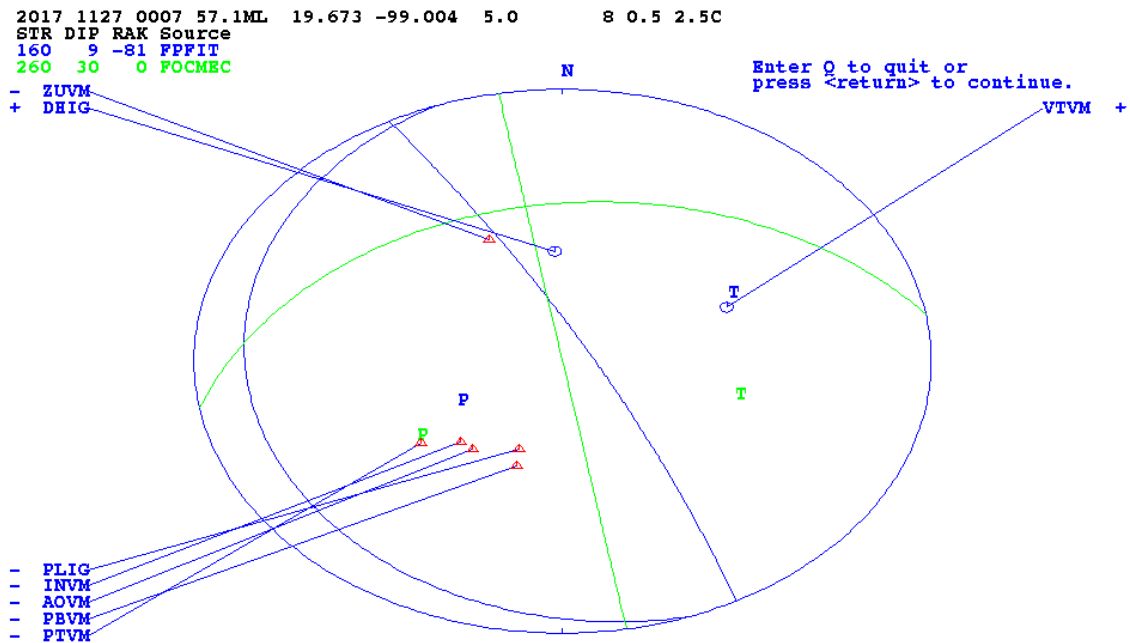


Figura 22.- Evento sísmico #42, 27 de noviembre del 2017 a las 00:27 horas.

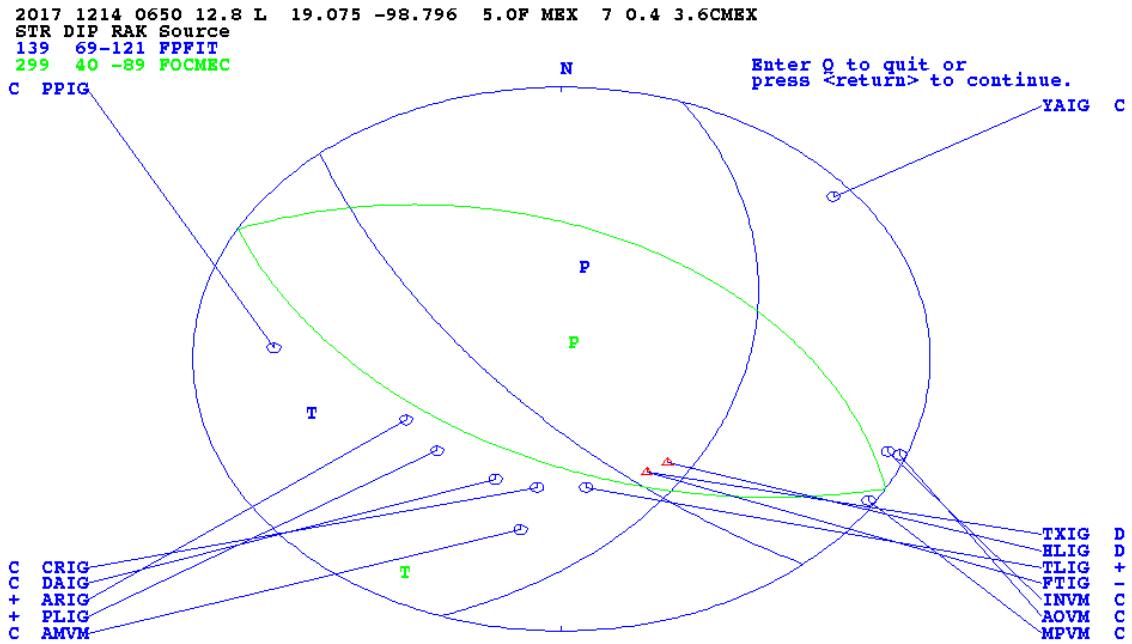


Figura 23.- Evento sísmico #43, 14 de diciembre del 2017 a las 06:50 hrs.

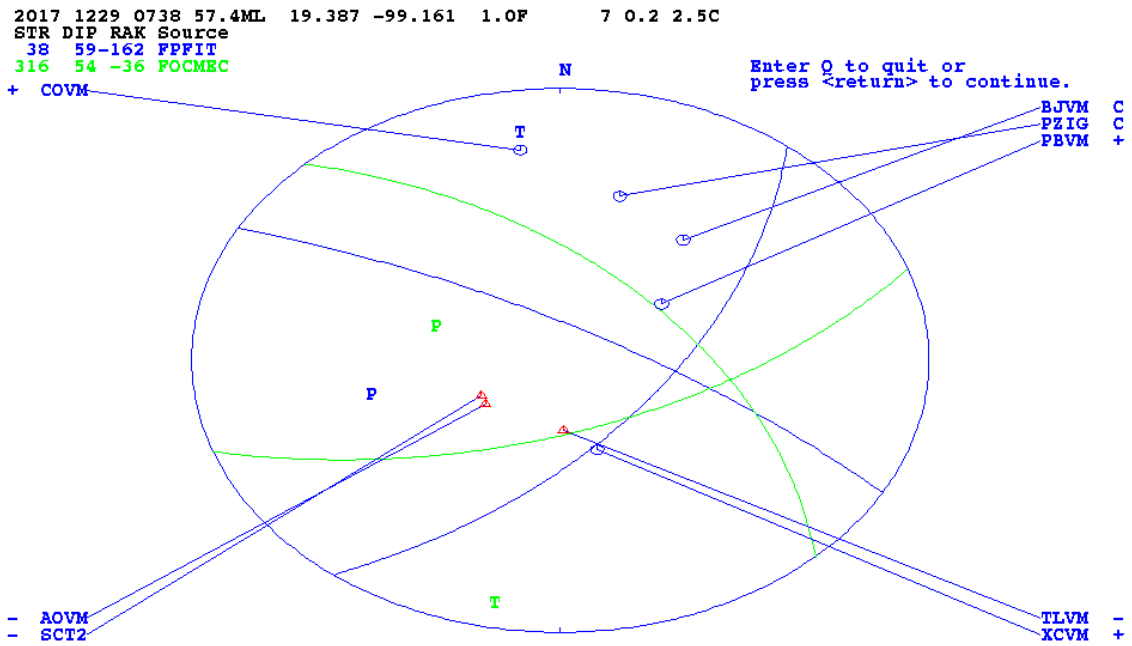


Figura 24.- Evento sísmico #44, 29 de diciembre del 2017 a las 07:38 hrs.