



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD VOLCÁNICA ASOCIADA A LA  
ACTIVIDAD DEL VOLCÁN DE COLIMA, OCURRIDA EN EL PERIODO  
1 DE OCTUBRE AL 30 DE DICIEMBRE DEL 2009

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:  
TANIA GARCÍA LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS  
DRA. ARACELI ZAMORA CAMACHO

MÉXICO, D.F.

2013



...

Y un día, mientras transitamos este eterno presente que llamamos vida, las semillas de nuestros sueños se transformarán en árboles, y desplegarán sus ramas que, como alas gigantescas, cruzarán el cielo, uniendo en un solo trazo nuestro pasado y nuestro futuro.

Nada hay que temer,... una sabiduría interior las acompaña...  
porque cada semilla sabe... cómo llegar a ser árbol...

Jorge Bucay (*Sueños de semilla*)

Dedicada con todo mi amor y gratitud a:

Mis padres Elizabeth y Martiniano por su gran apoyo incondicional, ejemplo de vida y por creer en mí, gracias papás por darme la vida.

Mi hermano Martín Alejandro, por su cariño, compañía, paciencia y sé que estarás conmigo hasta el final.

Y mis amigos por esos consejos, convivencias, experiencias, gracias por hacer amena la estancia en la Facultad e inyectar su inagotable alegría.

## *Agradecimientos*

A la universidad Nacional Autónoma de México, mi *Alma Mater*, por darme la oportunidad de adquirir la formación profesional y desarrollo humano, cobijarme durante todo este tiempo y ser orgullosamente universitaria...

En particular a la Facultad de Ingeniería, por darme la formación académica y sobre todo por darme la oportunidad de ser Ingeniera Geofísica...

Al Sistema de Becas para estudiantes Indígenas, a través del Programa Universitario México Nación Multicultural, PUMC entidad que me favoreció con una de sus becas durante cuatro años de la carrera...

Al Instituto de Geofísica, que puso a mi disposición su infraestructura para contribuir y completar mi formación académica...

Al M. en C. Gabriel Reyes Dávila por proporcionarme los datos sísmicos de RESCO del periodo de estudio para la realización de este trabajo...

La valiosa ayuda de mi asesora la Dra. Araceli Zamora Camacho, por su orientación, confianza y apoyo en el desarrollo de este trabajo y quien siempre buscó que concluyera este trabajo...

A los integrantes del comité evaluador, Dr. Carlos Valdés, Dr. Luis Quintanar, Dr. Víctor Hugo Espíndola, Dr. Raúl Valenzuela por sus valiosos comentarios en el desarrollo, enriquecimiento y culminación del presente trabajo...

A esas grandes personas que he conocido durante estos últimos seis años de vida, por sus enseñanzas, por todas las experiencias vividas y especialmente por aguantar mis locuras y ser parte de ellas, gracias por todo su cariño y amistad: Mara, Nidia, Diego, Melisa, Balam, Diana, Gaby, Siri, Daniel, Gabriel, Marisa, Lalo, Brenda, Luis, Andrés...

A mi familia, que me apoyaron incondicionalmente en la obtención de esta meta.

Y a todas las personas que de una u otra forma se vieron involucradas en la elaboración de este trabajo.

# INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 SISMICIDAD VOLCÁNICA</b> .....	<b>12</b>
1.2.1 CLASIFICACIÓN DE SISMOS.....	15
<b>1.3 MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN Y MAGNITUD</b> .....	<b>22</b>
1.3.1 LOCALIZACIÓN DE SISMOS .....	22
1.3.2 MAGNITUD.....	23
<b>2. EL VOLCÁN DE COLIMA</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1 MARCO TECTÓNICO</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2 HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN DE COLIMA</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3 LA RED SÍSMICA TELEMÉTRICA DE MONITOREO DEL VOLCÁN DE COLIMA (RESCO)</b> .....	<b>33</b>
<b>2.4 SISMICIDAD DEL VOLCÁN DE COLIMA</b> .....	<b>36</b>
<b>3. LA ERUPCIÓN DE 2009 Y LA SISMICIDAD ASOCIADA</b> .....	<b>42</b>
<b>3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ERUPCIÓN DE 2009</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2 SELECCIÓN DE EVENTOS DURANTE EL PERIODO 1 DE OCTUBRE AL 30 DE DICIEMBRE DE 2009</b> .....	<b>45</b>
<b>3.3 LOCALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE EVENTOS SÍSMICOS</b> .....	<b>50</b>
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>63</b>
<b>5. REFERENCIAS</b> .....	<b>66</b>
<b>6. ANEXO</b> .....	<b>71</b>

## RESUMEN

México se considera un país con gran cantidad de volcanes activos, como el volcán de Colima. Las erupciones que ha presentado implican diferentes estilos eruptivos, como pequeñas explosiones freáticas, emisiones de bloques de lava, así como grandes eventos explosivos (Breton, 2002), esto conlleva al monitoreo del volcán, siendo primordial para este estudio el análisis de la actividad sísmica; con este análisis se puede determinar el nivel de sismicidad, los tipos de eventos y sus características.

En el 2009 el volcán de Colima presentó un episodio de alta actividad fumarólica y salida de material incandescente por la ladera Este, que se registró del 1 al 3 de diciembre, días de máxima actividad durante el periodo. Para describir este episodio eruptivo analizamos el periodo del 1 de octubre al 30 de diciembre. Durante el periodo se generaron plumas de gas, la continua formación del domo de lava, deslizamientos de material y extendiendo la expulsión de gases y vapor de agua.

Del análisis de datos sísmicos de la actividad volcánica de Colima que se presentó durante el periodo, se seleccionaron 1587 eventos sísmicos registrados por la Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima (RESCO), en al menos tres estaciones. De los cuales 542 corresponden a eventos locales; de estos 281 tuvieron arribos claros en la fase de P y S, y de esos solo 125 eventos fueron localizados en el "área del volcán".

La localización de eventos se realizó con HYPOCENTER, la mayor concentración de hipocentros se encerraron en un rango de 10 km, principalmente a 6 km bajo el nivel del mar y hasta una altura de 4000 m. La densa agrupación de hipocentros se encuentra a profundidades de 0 a 6 km bajo el nivel del mar. Las magnitudes de

coda se concentran dentro del rango de  $2 < M_c < 3$  que representa el 86.06% de eventos.

En este estudio se muestra que antes de la salida de material hay un número mayor de eventos Tipo A, siendo 91 en octubre y noviembre, y 34 eventos en diciembre.

En este episodio se mostró una gran salida de material incandescente por la ladera Este, lo que produjo actividad sísmica debajo del edificio volcánico a poca profundidad ocasionado por la intrusión de nuevo material en la formación del domo del cráter.

## ABSTRACT

Mexico is considered a country with a lot of active volcanoes, such as the Colima volcano. The rashes that has submitted imply different eruptive styles, such as small phreatic explosions, emissions of blocks of lava, as well as large explosive events (Breton, 2002), this leads to the monitoring of the volcano, is of paramount importance to this study, the analysis of the seismic activity; with this analysis you can determine the level of seismicity, the types of events and their characteristics.

In 2009 Colima volcano presented an episode of high renewed signs of activity and output of incandescent material by the Eastern slope, which was registered on December 1-3, days of maximum activity during the period. To describe this episode we look at the eruptive period from October 1 to December 30. During this period were generated gas pen, the continual formation of the dome of lava, landslides material and extending the expulsion of gases and water vapor.

The seismic data analysis of Colima volcanic activity that occurred during the period, were selected 1587 seismic events recorded by the Seismic Network telemetry from the State of Colima (RESCO), in at least three stations. Of which 542 correspond to local events; of these 281 arrivals were clear in the phase of P and S; of which 125 events were located in the "*area del volcán*".

The location of events are conducted with hypocenter, the largest concentration of hypocenters barricaded themselves in a range of 10 km, mainly to 6 km below sea level and up to a height of 4000 m. The dense cluster of hypocenters is located at depths of 0 to 6 km below sea level. The magnitudes of coda are concentrated within the range of  $2 < M_c < 3$  that represents 86.06 % of events.

In this study shows that prior to the departure of material there is a growing number of events Type A, report 91 in October and November and 34 events in December.

In this episode showed a large output of incandescent material by the Eastern slope, which produced seismic activity beneath the volcanic building at a shallow depth caused by the intrusion of new material in the formation of the dome of the crater.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

La actividad volcánica nos proporciona información sobre los procesos que ocurren bajo la superficie terrestre, por ejemplo en el manto o al interior de la corteza, estos procesos están relacionados con la sismicidad, su periodicidad eruptiva y pueden proporcionarnos información sobre la naturaleza y velocidad del ascenso del magma hacia la superficie desde la fuente.

Las técnicas tradicionales, pero no por ello menos importantes, son el análisis de la sismicidad volcánica, la localización de los eventos, la energía liberada o RSAM, el análisis espectral y la estadística del número de eventos; la sismicidad se asocia al movimiento de material magmático que supone una intrusión en su camino hacia la superficie, tal intrusión es acompañada de un complejo proceso en el que se involucra el fracturamiento y fallamiento de la roca encajonante, así como la circulación de fluidos magmáticos. Estos últimos generan señales sísmicas que se registran en la superficie y que revelan indirectamente los procesos que ocurren en la profundidad.

Mucho se puede conocer a partir del estudio de la sismicidad que se obtiene por medio de sensores sísmicos (sismógrafos). En este estudio se aplican algunas de las técnicas del análisis tradicional para el estudio de los sismos asociados a la actividad del volcán de Colima.

El monitoreo volcánico tiene como interés principal establecer el nivel de estado activo y detectar las variaciones que propicien el inicio de una fase eruptiva, con el fin de evaluar el estado de actividad en un volcán y mitigar sus efectos hacia comunidades, mediante la observación y vigilancia sistemática de diversos métodos visuales e instrumentales, desplegados sobre y en zonas cercanas al volcán. Si esto

se aplica en forma anticipada en las fases previas a un proceso eruptivo, es posible en la mayoría de los casos detectar oportunamente un cambio cualitativo y cuantitativo de la actividad que incluso pudiese conducir a una predicción en el corto plazo de un proceso eruptivo inminente (Quaas, 1995). Los instrumentos de monitoreo transmiten los datos a centros de recepción para su análisis, la elaboración de diagnósticos del estado del volcán, y poder pronosticar su actividad en el corto plazo. Dichos pronósticos permiten hacer un alerta temprana y la puesta en marcha de planes operativos de respuesta aun antes del inicio de la actividad del volcán (CENAPRED, 2001).

La vigilancia sísmica de los volcanes parte de identificar los niveles de la actividad sísmica durante la fase de reposo y vigilar cuando esta actividad se va alejando de dicha fase, observando la distribución y ocurrencia de los distintos tipos de eventos, así como la relación con otros fenómenos.

El presente trabajo estudia el periodo del 1 de octubre al 30 de diciembre de 2009 por ser un periodo de actividad del volcán de Colima, ya que dicho periodo no cuenta con estudios detallados del análisis de la sismicidad, que en este estudio se presenta. El análisis pretende contribuir al conocimiento general de la actividad que presenta el volcán, se realiza la descripción del nivel de sismicidad asociada al periodo, así como el tipo de eventos predominantes antes y después de una salida importante de material del volcán.

También trata poner de manifiesto la alta actividad fumarólica y salida de material incandescente, que se registró del 1 al 3 de diciembre de 2009 días de máxima actividad durante el periodo.

## 1.2 Sismicidad Volcánica

La sismicidad es consecuencia de la movilidad y de las altas temperaturas de los materiales en las capas intermedias de la Tierra, así como de la interacción de las placas tectónicas, al manifestarse en áreas o sectores bien definidos. (CENAPRED, 2001).

Se sabe que México es un país de alta sismicidad, debido a los procesos geológicos que están relacionados con la tectónica de placas, el estado de Jalisco, Colima, entre otros estados hasta llegar a Chiapas son afectados por fenómenos de subducción a lo largo del Pacífico Mexicano.

Para el análisis de las señales sísmicas la clasificación es de gran importancia, basándose en las características que se observan en los sismogramas como la forma de onda a partir del contenido de frecuencias de la señal y/o el tipo de fuente. Primeramente el análisis de los sismogramas consiste en la discriminación de eventos sísmicos de los que no lo son, para proseguir con la clasificación de los eventos propios del volcán siguiendo con la identificación de las fases y la localización de los sismos y finalmente calcular el tamaño del sismo por su magnitud para la caracterización del mecanismo del terreno.

Los sismos volcánicos se definen como sismos que ocurren en el volcán o cercano a él, generalmente dentro de los 10 km a la redonda, dichos sismos están relacionados con procesos volcánicos (McNutt, 1996). Tales sismos se han asociado a procesos tanto internos como externos. Para entender a los sismos, se ha realizado la clasificación de sismos que nos proporcionan información del estado de actividad de un volcán.

El estudio sísmico de una región volcánica nos ayuda a conocer diferentes aspectos dinámicos, propiedades físicas de materiales de la Tierra, mecanismos de transporte de fluidos, estado de esfuerzos locales y regionales del sistema volcánico, que son

afectados por el paso de las ondas sísmicas en los volcanes; esto muestra que las señales llegan a ser distintas en los diferentes ambientes al que se espera en un ambiente puramente tectónico. Las técnicas aplicadas y la instrumentación son comunes en tipos de señales volcánicas o tectónicas, la diferencia entre estas señales radica principalmente en la fuente que las generan. Tomando esta fuente que origina el sismo como la ocurrencia de una ruptura o liberación de esfuerzos en el interior de la Tierra. Esta fuente se modela como un punto, conocida como hipocentro o foco, su proyección perpendicular sobre la superficie de la Tierra se nombra epicentro. Para la localización de los hipocentros se toman en cuenta ciertos parámetros como las coordenadas geográficas del epicentro, la profundidad y la hora de origen.

En el volcán de Colima se describen diferentes tipos de eventos sísmicos volcánicos, así como su ocurrencia y la actividad volcánica asociada al volcán (McNutt, 1996).

La actividad sísmica presente en un volcán activo puede presentar gran cantidad de eventos de gran intensidad, así como de poca magnitud, incluso en periodos de reposo que suelen presentarse en enjambres. Durante la erupción volcánica se presentan eventos sísmicos asociados a ella, dividiéndose en cinco categorías, los cuales son: sismos de alta frecuencia, sismos de baja frecuencia, tremores volcánicos, eventos producidos por un flujo piroclástico y eventos excitados por una avalancha (Orozco, 2005).

Los sismos están relacionados con el rompimiento de las rocas en el interior de la Tierra, asimismo como el fallamiento del terreno a consecuencia de los esfuerzos que aplica la dinámica de las placas tectónica, produciendo una liberación súbita de energía que se propaga en forma de onda provocando el movimiento del terreno. Estas ondas sísmicas tienen las características que se propagan en cuerpos dispuestos de ser deformados, por lo que se representan como ondas elásticas. Los

efectos de estos sismos están relacionados con la propagación de ondas elásticas en el interior de la Tierra, principalmente su corteza, al transmitirse estas ondas elásticas generadas por mecanismo de tipo natural. Estas ondas generan un tren de ondas llamadas fases P y S, propagándose entre el foco y el punto de la superficie en que son detectadas, también conocidas como ondas de cuerpo. Siendo las primeras detectadas por los sensores las ondas P (ondas compresionales o longitudinales) ya que su velocidad es mayor, estas ondas dilatan y comprimen al medio en la dirección de su propagación; las que después de registrar son las ondas S (secundarias) propagándose en medios sólidos, el medio se deforma en la dirección perpendicular a su dirección de propagación del frente de onda. Después de la llegada de estas ondas, la amplitud de las señales decae poco a poco, la energía se atenúa en función de la distancia que recorre la onda, parte de la cola de la señal se llama coda, siendo la parte final de los registros de los sismos.

La velocidad en que se propagan estas ondas depende de factores como la densidad y propiedades elásticas de la roca. En la corteza terrestre la velocidad promedio de las ondas P es de 6 km/s y la relación que existe entre la velocidad de las ondas P y S es  $k=V_p/V_s$ . Conociendo los tiempos de arribo de las ondas se obtiene una estimación aproximada de la distancia epicentral D hasta la estación, dada por:

$$D = \left[ \frac{V_p V_s}{V_p - V_s} \right] (T_s - T_p)$$

donde  $V_p$  es la velocidad de la onda P,  $V_s$  la velocidad de la onda S,  $T_p$  tiempo de arribo de la onda P,  $T_s$  tiempo de arribo de la onda S. la distancia epicentral para la velocidad promedio  $V_p = 6$  km/s es aproximadamente 7.5 veces el intervalo en tiempo (en segundos) de P-S.

### **1.2.1 Clasificación de sismos**

Los eventos sísmicos volcánicos son causados por distintos mecanismos como fracturas en las rocas de la corteza, cambios bruscos en el movimiento del magma, así como una acumulación excesiva de gas a presión dentro de la corteza, entre otros. Las distintas características de cada volcán (tamaño, geometría, material que lo constituye, presencia de fallas y fracturas) generan ciertos tipos de formas de onda para una frecuencia y amplitud particular, al irse observando estas características se observa difícil establecer una clasificación que contenga el comportamiento de los sismos volcánicos. Con la información que se ha adquirido con los años, se han propuesto algunas clasificaciones, que son aplicables para determinados volcanes, aunque han sido de gran dificultad, ya que el objetivo principal es establecer una relación entre las etapas eruptivas de los volcanes y el tipo de temblores observados durante dichas etapas; la mayoría de las clasificaciones se basan en las características de tiempo y frecuencia de las señales sísmicas.

Se ha observado que eventos asociados a erupciones volcánicas tienen características en particular, al ser en una misma estación sismológica se puede registrar eventos con formas de onda y contenidos de frecuencias muy diferentes (Huidobro 2000), llegan a deberse a variaciones de la profundidad de la fuente, a cambios en el carácter de la misma o a efectos de trayectoria (Sawad, 1994).

Los temblores de origen volcánico presentan características diferentes a los temblores de origen tectónico, tales diferencias se observan en el mecanismo de producción de ondas sísmicas, la magnitud de los eventos y su frecuencia de ocurrencia (Minakami, 1974). Para ello se necesita estudiar las características de dichos eventos sísmicos a fin de determinar los posibles mecanismos de generación de los eventos.

Las ondas sísmicas que tienen lugar en un área volcánica y dan origen a movimientos del terreno son registrados por los sismógrafos en forma de señales. Para el análisis de estas señales se tienen que clasificar para comprobar si es un evento local (hasta 100 km); estas señales sísmicas se clasifican en tres tipos que dependen de la distancia de la fuente a la estación, del tipo de períodos o las frecuencias dominantes en el registro. Si se observa bajas frecuencias dominantes (periodos largos) el sismo es lejano y si las frecuencias son altas (periodos cortos) los sismos son cercanos. Como en áreas volcánicas el principal objetivo es estudiar sismos locales, por lo que la Red Sísmica del volcán de Colima cuenta con instrumentos de banda ancha con sensores Guralp 6TD.

Los sismos que ocurren a más de 2000 km de la red sísmica se llaman eventos telesísmicos; sismos que ocurren de 100 a 2000 km fuera de la red se llaman eventos regionales; y finalmente los sismos que ocurren a pocos cientos de kilómetros de la red son llamados sismos locales (figura 1) estas últimas señales se caracterizan por sus inicios impulsivos, el contenido de alta frecuencia, la envolvente exponencial decreciente y la frecuencia de la señal con el tiempo (Lee, 1981).

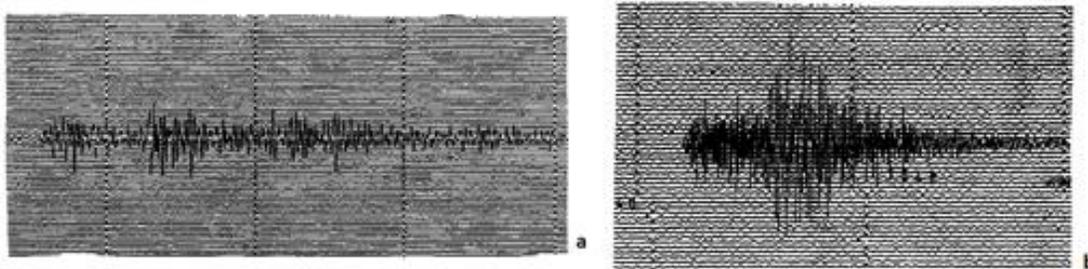


Figura 1, registros analógicos de: a) sismo lejano con frecuencias bajas (periodos largos) y b) sismo cercano con frecuencias altas (periodos cortos), tomada y modificada de Posadas. 1994.

Para el estudio de estos registros, es necesario clasificarlos para conocer el mecanismo a partir de las señales que los genera, esta característica depende de los volcanes particulares en lo que se han obtenido datos significativos. La identificación

de las fases P y S permite saber la localización del evento, mediante los tiempos de arribos de dichas fases.

Las observaciones de sismos volcánicos mostraron que el origen de las señales sísmicas de la actividad volcánica tiene diferentes formas, con eso han propuesto varias clasificaciones de sismos volcánicos.

Los registros de los sismos obtenidos por la red sismológica, persisten para la determinación de los parámetros básicos, tales parámetros son el origen del tiempo, la ubicación hipocentral, las magnitudes, entre otros, estos parámetros usualmente son calculados por computadoras. Para determinar el tiempo de origen y la ubicación del hipocentro se requiere las coordenadas de las estaciones de la red sismológica, el modelo de velocidades que caracterice el área de la red y los tiempos de arribos de las fases de la onda de al menos tres estaciones.

### **1.2.1.1 Clasificación realizada por Minkami**

A partir de las observaciones volcánicas y sísmicas de volcanes japoneses y hawaianos, Minakami (1974) propuso una clasificación de sismos volcánicos en cuatro tipos, de acuerdo a la localización de sus focos, la relación de la erupción y la naturaleza del movimiento del sismo. Dicha clasificación es la base del estudio de sismos volcánicos hasta hoy en día. Minakami obtuvo una correlación entre la variación a largo plazo en el número de sismos volcánicos y erupciones volcánicas. La clasificación que propuso es la siguiente:

*Eventos Tipo A:* Sismos con origen bajo el edificio volcánico, a profundidades entre 1 y 20 km, que poseen las mismas características de los sismos tectónicos de la actividad sísmica normal. En zonas volcánicas ocurren frecuentemente en enjambres, con magnitud inferior a 6 y poseen fases P y S bien definidas. Estos

eventos se registran generalmente varios días antes de la actividad volcánica. Son descritos por un doble par de fuerzas, causados por un mecanismo de fallamiento, los mecanismos focales revelan esfuerzos tensionales producidos por el frente del cuerpo magmático. Dichos esfuerzos pueden ser de origen regional o local generados por el sistema volcánico. Se asocia la fuente sísmica en la roca encajonante de la cámara magmática y el conducto; otras causas que originan estos eventos son las variaciones de presión en la cámara magmática o en los conductos.

*Eventos Tipo B:* Eventos con hipocentros limitados a profundidades superficiales alrededor del cráter del volcán ( $\leq 1$  km alrededor del cráter). Magnitudes  $< 3$ , fase P puede ser emergente y no presenta una fase S clara, con frecuencias más bajas que los sismos tectónicos locales, con periodo dominante entre 0.2 y 1.0 seg; frecuencias dominantes de hasta 4 Hz. Sus codas anormalmente largas en relación con su máxima amplitud (Lermo, 1993). Se han propuesto que están relacionados con la intrusión magmática, la liberación de gases, ascenso de material magmático, así como asociados al paso de material hidromagmático por las fracturas o fisuras (Lermo, 1993).

*Explosiones:* Sismos registrados durante la fase explosiva de una erupción. Magnitud relacionada claramente con la intensidad de la explosión, frecuencias y formas de ondas similares a tipo B.

*Tremor volcánico:* periodos de tiempo prolongados siendo una señal continua. Son eventos de baja frecuencia, Minakami los describe como un enjambre denso de temblores de tipo B y explosión. Con frecuencias entre los 0.2 y 7 s.

Las observaciones sismológicas durante los últimos años han descrito que la anterior clasificación difícilmente puede aplicarse, características como profundidades mayores con señales bajas han puesto en manifiesto dicha clasificación, por lo que ha motivado a establecer clasificaciones ad hoc para describir la actividad de ciertos volcanes en particular. Con ello se ha encontrado la división en dos grandes grupos de sismos, los mecanismos de fallamiento (tipo A) y los registrados en áreas volcánicas, caracterizados por su deficiencia en altas frecuencias (con respecto a los tipo A) y ausencia de fases bien definidas.

Las clasificaciones describen la sismicidad relacionada con las erupciones de distintos volcanes, dichos grupos de señales son seleccionados con base en aspectos como la presencia y características de las diferentes fases sísmicas, contenido espectral, profundidad hipocentral y amplitud. A continuación se presenta la recopilación de varias clasificaciones propuestas por varios autores. (Tomada y modificada de Espíndola 1991 y McNutt 1996).

McNutt (1996)	Minakami (1974)	Latter(1979)	AVO (Alaska Volcano Observatory, 1993)	Malone (1981)	Havskox y col (1983)	Otros nombres	Ejemplos (figura 3)
Alta-Frecuencia HF	Tipo A o alta frecuencia. Semajantes a los tectónicos; hipocentros entre 1 y 10 km.	Tectónico, Volcanotectónico, frecuencias mayores a 3 Hz tienen lugar en rocas competentes	Volcanotectónico VT	Tectónicos (t) Alta frecuencia localizados fuera del volcán; profundidad mayor a 3km (n>3km)	Tipo 4. Semajante al A de Minakami	Sismo de periodo corto	A
Baja-Frecuencia LF	Tipo B o baja frecuencia: asociados con erupciones; fase S no clara; ocurren en un radio de 1 km alrededor del volcán; periodo entre 0.2 y 1.0 s.	Sismo Volcánico, alta frecuencia mayores a 3Hz.	Largo-Periodo LP	Frecuencia media (m). De 1 a 5 Hz; profundidades menores a 3 km; fase S no clara. Y de frecuencia baja aproximadamente 1 Hz. Fas S no clara; profundidades mayores a 3km.	Tipo 1. Arriros claros; fases S no claras; baja frecuencia.	Evento de Coda Largo, tornillo (es el nombre dado para el volcán Galeras en Colombia, pero se ha observado en varios volcanes).	C, F, I, J
Frecuencias Mezcladas	-	Frecuencia media	Híbrido			Frecuencia Media	B
Sismo de Explosión	Sismo de Explosión	Explosión Volcánica. Frecuencia media de 2 a 3 Hz.	Explosión	Eventos de gas, no claros de primer arribo, dentro de esta clasificación se encuentran los avalanchas, relacionados a estos mismos, con contenido de frecuencia mezclada.	Tipo 2. Longitud de la coda anómala.	-	E
Tremor Volcánico	Tremor Volcánico. Sucesión de eventos tipo B no muy profundos.	Tremor Volcánico. Baja frecuencia menores a 2 Hz, ancho de banda de 1 a 6 Hz, pero con picos en 1 y 2 Hz.	Tremor Volcánico	Tremor	Tipo 3	Tremor Armónico, Tremor Espasmódico	D,G,H

Figura 2. Muestra la recopilación de clasificaciones de sismos de varios autores.

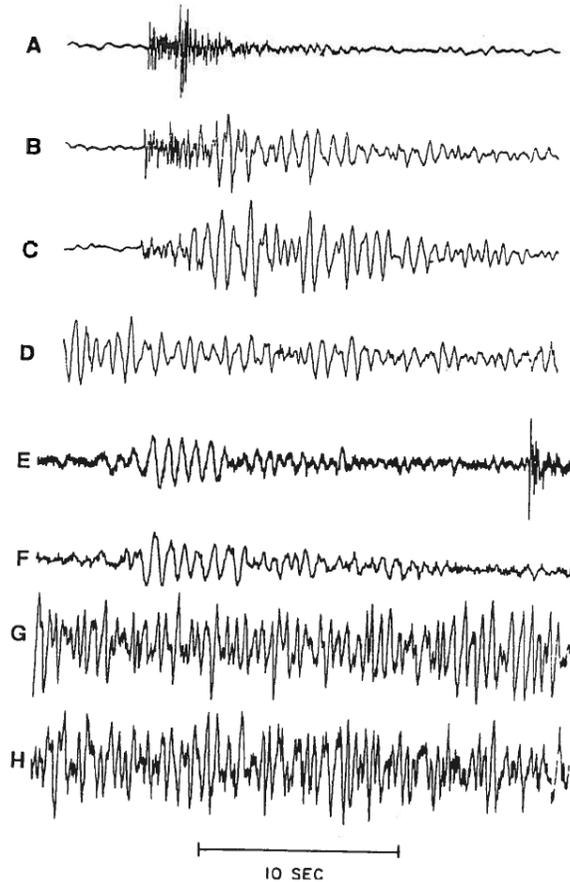


Figura 3. Forma típica de ondas de los sismos volcánicos, registrados: (A) sismos de alta frecuencia o volcano-tectónicos a una profundidad de 6.8 km; (B) eventos híbridos o de frecuencias mezcladas, a una profundidad de -0.6 km (a 0.6 km sobre el nivel del mar); (C) eventos de baja frecuencia o de periodo largo con una profundidad de -0.4 km; (D) tremor volcánico; los sismos (A, B, C y D) registrados en la estación que se encuentra a 8 km del Volcán Redoubt; (E) sismos de explosión volcánica, (F) sismos de baja frecuencia o eventos tipo B, los sismos (E y F) se registraron en la estación que se encuentra a 8.5 km del volcán Pavlof; (G y H) Tremor volcánico antes de la erupción Mt. Spurr, estación a 4.8[km] del evento; Tomada y modificada de McNutt, 1996.

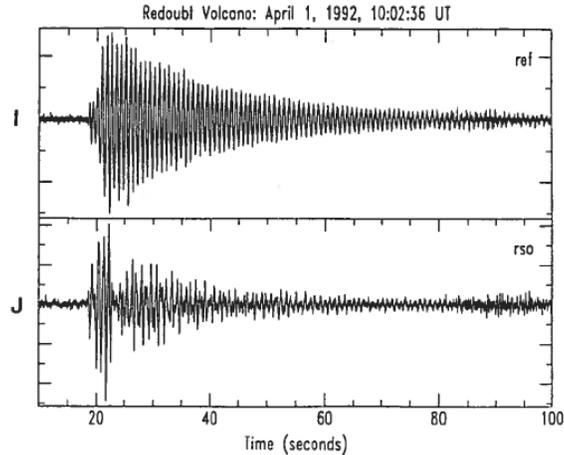


Figura 4. Evento de periodo largo o tornillo (I), del volcán Redoubt estación REF, a 3km al este del volcán; (J) el mismo evento registrado en la estación RSO, estación al sur a 3 km del volcán. (Tomada y modificada de McNutt, 1996).

## 1.3 Métodos de localización y Magnitud

### 1.3.1 Localización de sismos

Un método para la localización de los hipocentros es a partir de una triangulación, donde se utilizan los registros de los eventos en al menos tres de las estaciones de la red sismológica; los tiempos de arribo de las fases P y S, obtenidos en los sismogramas de las estaciones, muestran una diferencia de tiempos para el cálculo de la distancia al origen del sismo, aunque no se obtiene la dirección, la trayectoria se encuentra en cualquier dirección, tomando como punto de un círculo el radio siendo igual a la distancia que recorrió la onda que fue detectada en las estaciones. La intersección de estas circunferencias determinan aproximadamente el epicentro del sismo, los errores siempre están involucrados, mientras más estaciones se intersectan sus circunferencias se reducen los error. Con este método también se puede determinar la profundidad del hipocentro.

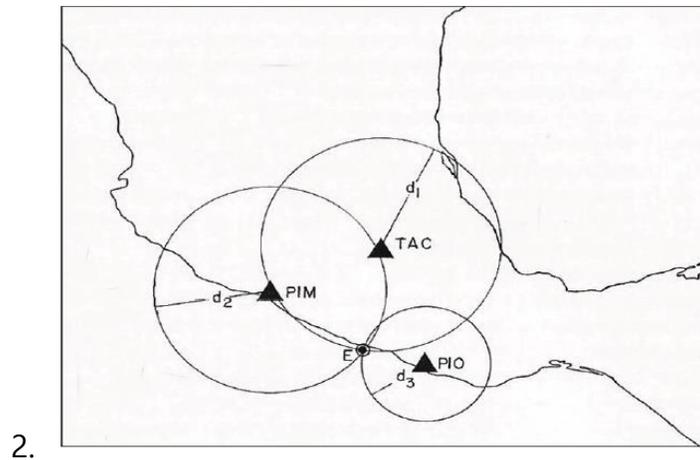


Figura 5. Intersección de las circunferencias con centros en las estaciones y la distancia que recorre las ondas que representa el radio, simplificando el método gráfico de localización de epicentros, modificado de Castellanos y Jiménez, 1995.

Otro método para la localización de los hipocentros es el propuesto por Geiger al determinar el tiempo de origen y el epicentro de sismos, así como la profundidad focal aplicando el método de Gauss-Newton en 1912; ajustando los tiempos de llegada de las ondas P mediante mínimos cuadrados que son observados en las estaciones. Conociendo las coordenadas de las estaciones y el tiempo de arribo. La respuesta de los valores a obtener depende de la distribución espacial de las observaciones. Se toma en cuenta que no existe una relación lineal entre los tiempos de arribos de las ondas y las coordenadas espaciales y temporales de la fuente que genere el movimiento. La mayoría de los programas iterativos usan este método, al comparar el tiempo de recorrido de las ondas calculado de manera teórica con el tiempo real observado en los sismogramas.

### 1.3.2 Magnitud

La magnitud de los sismos es una medida cuantitativa del tamaño de un sismo en su fuente, se relaciona con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla y la liberación de esfuerzos en el hipocentro. Siendo un parámetro

independiente del sitio de observación, se obtiene con la máxima amplitud de las ondas sísmicas en los sismogramas. Richter desarrollo la escala de magnitud local en 1932 y la definió como  $M_L = \log A - \log A_0$

(<http://secre.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html#MAGNITUD>) donde A es la máxima amplitud en el registro sísmico y el termino  $A_0$  es la máxima amplitud correspondiente a un sismo tomado como sismo patrón, el sismo patrón, de magnitud cero se define como aquel que, teniendo su epicentro a 100 km de distancia, deja una traza de una micra en el registro o sismograma producido por un sismógrafo Wood-Anderson. Richter definió esta magnitud con el uso de la información de la red sísmica de California, al utilizarla para sismos de dicha región, llamándola magnitud local, que se expresa como:  $M_L = \log A - 3$ , esta magnitud local es propia para sismos con focos no mayores a los 20 km de profundidad y distancias no mayores de 600 km de una estación dada. En el año de 1945 y 1956 Richter y Gutenberg, crearon dos nuevas escalas, la primera que es aplicable a sismos profundos, utilizando la amplitud de las ondas internas ( $m_b$ ), dicha magnitud está dada por:  $m_b = \log\left(\frac{A}{T}\right) + \sigma(\Delta)$  donde A es la amplitud reducida al movimiento del terreno en micras de la onda P o S., en la componente vertical del periodo corto; T es el periodo y  $\sigma(\Delta)$  es una función de calibración que corrige la atenuación de las ondas con la distancia. La otra magnitud de las ondas superficiales que es aplicable a sismos lejanos, dada por:  $M_S = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1.66 * \log \Delta + 3.3$ , donde A es la amplitud en micras del movimiento del terreno de la onda superficial de mayor amplitud en la componente vertical de periodo largo; T es el periodo que suele ser aproximadamente de 20 s y  $\Delta$  la distancia epicentral en grados.

Se observa que estas fórmulas proporcionan valores un poco diferentes para un mismo terremoto, con el fin de ampliar el concepto de magnitud a terremotos de varios tipos, finalmente las fórmulas se complementan. Los sismólogos han

encontrado fórmulas y gráficas que convierten una escala a otra; se ha deducido la relación que existe entre las magnitudes calculada mediante ondas internas y superficiales, con lo que se obtiene la siguiente forma empírica:  $m_b = 2.5 + 0.63 * M$ . La magnitud local, para terremotos locales que son registrados a distancias menores de 500 km, se utiliza esta magnitud siendo una extensión de la definición de Richter, a ondas registradas por otro tipo de sismógrafos. Se estableció una escala de magnitud para estos terremotos, a partir de la duración de su registro o coda. La fórmula fue propuesta por Lee y Lahr, en 1972, para California, es:

$M = 2 * \log \tau - 0.87 + 0.0035 * \Delta$ , donde  $\tau$  es la duración del registro del sismo en segundos y  $\Delta$  la distancia epicentral en km. La fórmula anterior de magnitud es la utilizada en el modelo de localización de eventos (HYPOCENTER) durante el periodo de estudio, debido al buen ajuste en la localización de los datos de las magnitudes locales

## 2. EL VOLCÁN DE COLIMA

El volcán de Colima ( $19^{\circ}30'44''N$  y  $103^{\circ}37'02''W$ , 3860 msnm), también conocido como Volcán de Fuego; se encuentra entre los estados de Jalisco (municipio de Tuxpan, Zapotitlán y Tonila) a 100 km al sur de la ciudad de Guadalajara, y a 30 km al norte de la ciudad de Colima, (Municipio de Comala y Cuauhtémoc). Su cráter se sitúa dentro de la caldera del volcán Paleofuego, es uno de los volcanes más activos en Norteamérica, siendo un estratovolcán con composición andesítica que se localiza en el sector occidental de la Faja Neovolcánica Transmexicana, dentro del complejo volcánico de Colima (figura 6).



Figura 6. Mapa de la República Mexicana, se marca el volcán de Colima y las placas que interactúan en la zona.

La mayoría de las erupciones históricas del Volcán de Colima, han sido de tipo efusivas, caracterizadas por derrames de lava de bloques, los cuales descienden

lentamente por las laderas, sin haber alcanzado, cotas inferiores a los 2,000 msnm, y una longitud máxima de aproximadamente 5 km a partir del cráter (Rodríguez, 1995). Entre los riesgos volcánicos que presenta el volcán se encuentran los flujos piroclásticos, lahares secundarios que están ligados indirectamente a una erupción o que ocurren después de la misma, flujos piroclásticos móviles, nubes de ceniza y flujos de lava, con ello la gran importancia del monitoreo para establecer los parámetros físicos y químicos (Petrosino, 2011).

Para el estudio y monitoreo del volcán de Colima, la Universidad de Colima se ha dedicado a la investigación científica, así como estudios y observaciones del volcán, para ello cuenta con el monitoreo continuo de la Red Sísmica de Colima (RESCO); otras mediciones que se presentan en el monitoreo son las mediciones de deformación, de química y temperatura de los gases y los estudios de geología del volcán, entre otros.

El volcán de Colima se encuentra en la parte occidental de la faja Neovolcánica Transmexicana, en esta área se relaciona la subducción de las Placas de Cocos y Rivera por debajo de la Placa de Norteamérica.

La región de Colima es una zona de alta actividad sísmica, al observarse sismos de gran tamaño; tales como los terremotos del 3 de junio (terremoto más grande ocurrido en México en el siglo pasado) y el 18 de junio de 1932, el 15 de abril de 1941, el 30 de enero de 1973 y los del 19 y 20 de septiembre de 1985. El terremoto del 19 de septiembre de 1985 es uno de los más grandes ocurrido en México. (Moreno, 2008).

La sismicidad se concentra a lo largo del límite noroeste del estado de Colima, siendo el borde sureste del bloque Jalisco, con los registros que se han obtenido de la geología, muestran eventos de mayor magnitudes como las avalanchas de escombros al involucrar movimientos de masa de grandes proporciones.

## 2.1 Marco Tectónico

El volcanismo en la Faja Neovolcánica Transmexicana (FNT) está relacionado con la interacción de tres placas tectónicas, la Placa de Cocos, la Placa Rivera y la Placa de Norteamérica a lo largo de la Trinchera Mesoamericana e interaccionando con la Cordillera del Pacífico Este (figura 7), la existencia de la microplaca denominada como el bloque Jalisco también es responsable de la deformación de la corteza terrestre. La Faja Neovolcánica Transmexicana es una cadena volcánica de edad plio-cuaternaria (~4Ma), es característico de la tectónica de México, al extenderse más de 1,000 km del Océano Pacífico al Atlántico.

La FNT es un arco volcánico que se desarrolla sobre el margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica, siendo el resultado de la subducción de las placas de Rivera y de Cocos. Dicha faja se divide en tres sectores, como el sector occidental, central y oriental; en el sector occidental se encuentra el volcán en estudio, al presentar diferencias respecto al tipo de volcanismo, petrología, geoquímica y características tectónicas (figura 6).

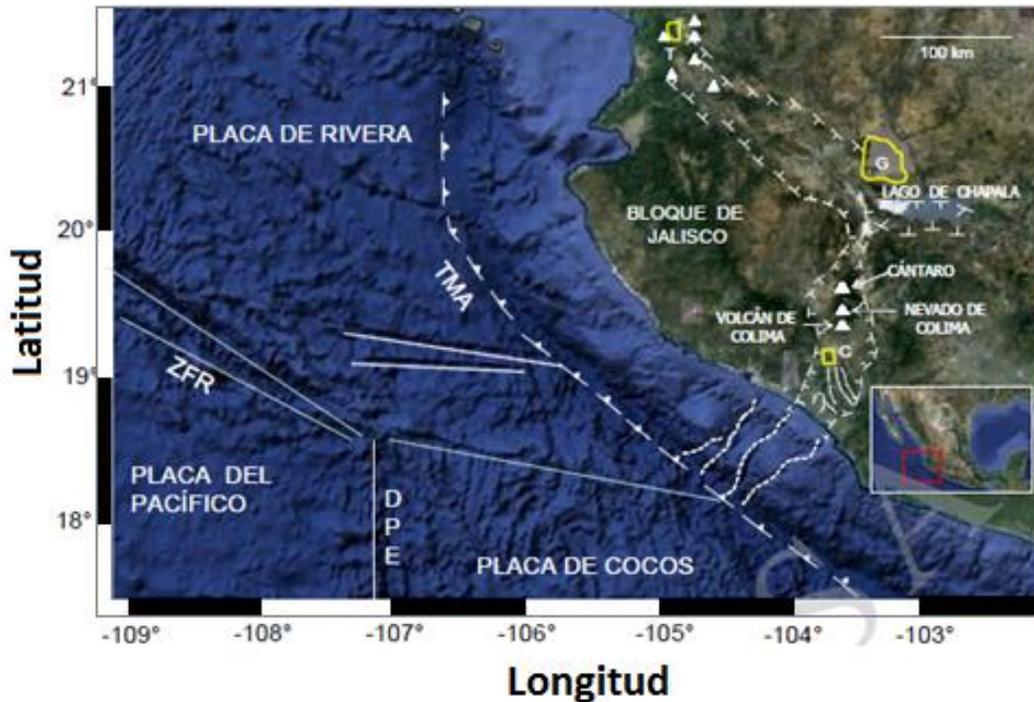


Figura 7. Imagen satelital del occidente de México, se observa el triple rift de Colima (dirección N-S), de Tepic-Zacoalco (dirección NW-SE) y Chapala (dirección E-W). En la porción SW de la imagen se observa la interacción que existe entre las placas de Rivera, Pacífico y Cocos. Los triángulos blancos representan los centros volcánicos más importantes del área. Los lineamientos estructurales mayores indicados por las líneas blancas discontinuas muestran las direcciones de las depresiones tectónicas. En la porción central del rift o graben de Colima se puede observar los volcanes que constituyen el complejo volcánico de Colima; Cántaro, Nevado y Colima. G: Guadalajara, T: Tepic; C: Colima; TMA: Trincheras Mesoamericanas; DPE: Dorsal del Este del Pacífico; ZRF: zona de fractura de Rivera. Tomada y modificada de López 2011.

El sector occidental se describe por características como las petrológicas, vulcanológicas, geoquímicas y tectónicas, cuenta con la presencia de una estructura tectónica denominada punto triple, este punto triple es la intersección de tres fases tectónicas o rifts, las cuales son: el rift de Tepic-Zacoalco (tendencia aproximada NW-SE, incluye los volcanes Tequila, Ceboruco), el Rift de Chapala (con una tendencia aproximada E-W) y el Rift de Colima (Demant, 1979). En dicho sector se encuentra localizado el Complejo Volcánico de Colima, orientado norte sur, casi perpendicular a la Faja Neovolcánica Transmexicana, compuesto por la cadena volcánica Cántaro

(2,900 m) - Nevado de Colima (4,241 msnm) - Volcán de Colima (3,860 msnm); justo en la porción central del Rift de Colima con dirección N-S y la falla Tamazula. Que se caracteriza por zona típica de tensión cortical en el continente, es resultado de la interacción entre las Placas de Cocos, Rivera, Pacífico y Norteamérica. Estas estructuras geotectónicas de la región contribuyen a la sismicidad del estado de Colima.

El complejo volcánico de Colima está construido sobre un basamento de andesitas y volcanoclásticos del Cretácico Inferior de la Formación Tecalitlán, areniscas y lutitas de la Formación Encinos, calizas masivas de la Formación Tepames, lechos rojos del cretácico Superior de la Formación Coquimatlá, intrusivos cretácicos y una secuencia volcánica del Terciario, constituida por derrames de basaltos, andesitas, brechas volcánicas dacíticas e ignimbritas.

Dado el peligro que representa el volcán para las poblaciones circundantes, se han presentado mapas de peligros volcánicos, así como varios mapas geológicos (Macias, 2005). En conjunto con varios trabajos detallados sobre la actividad histórica de Colima; debido a la gran actividad del volcán el monitoreo representa gran interés para conocer diferentes aspectos del sistema volcánico, siendo el monitoreo sísmico el principal estudio de este trabajo.

La Universidad de Colima por medio de la Red Sísmica del Estado de Colima (RESCO) es la encargada del monitoreo del volcán de Colima desde 1989.

## 2.2 Historia eruptiva del Volcán de Colima

La actividad histórica del Volcán de Colima ha sido reportada desde 1560, en los últimos 400 años, el Volcán de Colima ha tenido una actividad del tipo explosivo con aproximadamente 43 erupciones, al ser documentadas por diversos historiadores desde la Época de la Colonia, el volcán ha presentado en el pasado el colapso del edificio, erupciones tipo plinianas y otras que forman flujos piroclástico por el empuje y destrucción parcial de un domo central, esto se ha venido verificando durante los últimos 20 años (Macías, 2005). Siendo el volcán de mayor actividad en México, ha presentado gran variedad de estilos de erupciones, desde el crecimiento del domo de lava, acompañado de frecuentes avalanchas, de pequeños bloques hasta intensas explosiones piroclásticas, como la de los años 1585, 1606, 1622, 1818, 1890 y 1913, produciendo caída de ceniza a distancias de cientos de kilómetros del volcán (Nuñez, 1994).

En la siguiente tabla se presenta la recopilación de fechas en las que ha tenido actividad el volcán de Colima.

<b>Año</b>	<b>Actividad</b>
1576	Erupción de tipo Vulcaniana, con abundante caída de ceniza acompañada por una fuerte actividad sísmica. (Breton 2002).
1585	Abundante caída de ceniza a distancias de hasta 100 km. Se reporta gran pérdida de ganado. Y una gran actividad sísmica.
1590	Erupción explosiva con abundante lluvia de ceniza.(CENAPRED, 2004)
1606	Erupciones de tipo Pliniana, con abundante caída de ceniza hasta llegar a Michoacán.
1611	Actividad explosiva con abundante lluvia de ceniza. (CENAPRED, 2004)
1622	Gran erupción con intensas lluvias de ceniza a distancias mayores a 200 km., llegando a la ciudad de Zacatecas.

1690	Evento eruptivo de tipo explosivo y efusivo, tipo Peleano (Orozco, 2005).
1690	Erupciones explosivas, de tipo Pliniana, con importantes lluvias de ceniza.
1795	Erupción con emisión de lava. (CENAPRED, 2004).
1818	Gran erupción con extensas lluvias de ceniza, que llegan hasta Guadalajara, Zacatecas, Guanajuato, San Luis Potosí y la Ciudad de México, la erupción destruyo un domo de lava alojado en su cráter.(CENAPRED, 2004).
1872	Erupción explosiva del Volcancito, con abundante lluvia de ceniza y flujos piroclásticos (Orozco, 2005)
1886, 1889	Erupción explosiva con lluvia de ceniza y flujos de lava. (CENAPRED, 2004).
1890	Erupción explosiva importante, con lluvia de ceniza sobre distancias mayores de 100 km. (CENAPRED, 2004).
1896	Varias erupciones forman un nuevo cono adventicio en el flanco NE del volcán (Volcancito) (CENAPRED, 2004).
1903	Tuvo una serie de explosiones violentas con grandes estruendos que fueron escuchados en Tuxpan a 25 [km], fueron observadas emisiones de vapor, la ceniza llegó a Guadalajara y Uruapan, a una distancia aproximada de 200 km.
1913	Gran erupción explosiva con abundante lluvia de ceniza y flujos piroclásticos. Produjo un cráter de aproximadamente 500 [m] de profundidad al ser llenado de lava con el paso del tiempo y sobrepasó el nivel de los labios del cráter, formando un dolo que obstruyo la chimenea principal, al convertirse en un domo.
1960	Se inicia un nuevo episodio de crecimiento de domo. (CENAPRED, 2004).
1975-76	Evento eruptivo de tipo explosivo y efusivo; se presentó flujos de lava, acompañados por flujos piroclásticos de bloques y cenizas.
1991	La recientemente instalada Red Sísmica de Colima detecta una considerable actividad sísmica en el volcán de Colima, se alerta a los sistemas de protección civil de Colima, Jalisco y Nacional (CENAPRED, 2004). Un episodio de crecimiento de domo de lava en bloques, generó un colapso parcial del cuerpo del mismo, produciendo derrumbes de material incandescente y lahares posteriores. (Núñez, 1994).

1994	Incremento en la sismicidad se produjo una explosión freática acompañada de flujos piroclásticos y caída de ceniza (Orozco, 2005).
1998,1999	Aparición de un nuevo domo después de dos años de incremento en la sismicidad (Zobin et al, 2002). Se observa un cambio efusivo a un estado explosivo, ocurriendo una gran explosión el 10 de febrero de 1999 (Orozco, 2005).
2005	Ocurrieron cinco de los eventos explosivos más importantes registrados por los sistemas de monitoreo volcánico de la Universidad de Colima. Todo este año se presentó periodos de actividad explosiva.
2006	Exhalación de ceniza y registro de cuatro exhalaciones de pequeña magnitud, al descartar la ocurrencia de un evento explosivo igual o mayor a los que se han registrado. Emisiones de ceniza.
2007	Detección de exhalaciones en el cono del volcán, reportando no daños o afectaciones en las poblaciones colindantes. Comienza de nuevo un periodo efusivo. (Arámbula, 2011)
2008	El 5 de febrero el Gobierno del Estado, a través de la Unidad Estatal de Protección Civil Colima, informa que durante el fin de semana, se detectaron diez exhalaciones, varias fumarolas y una expulsión de material incandescente en el cono del Volcán de Fuego de Colima, sin que ello haya propiciado reporte de daños o afectación en las poblaciones colindantes

Figura 8. Resumen de la Historia Eruptiva del Volcán de Colima de 1576 al 2008. Tomada y modificada de Zamora-Camacho 2003, [www.ucol.mx/volcan/](http://www.ucol.mx/volcan/), [www.volcanodiscovery.com/colima.html](http://www.volcanodiscovery.com/colima.html).

### **2.3 La Red Sísmica Telemétrica de Monitoreo del Volcán de Colima (RESCO)**

El monitoreo es a partir de las mediciones locales y remotas de la actividad microsísmica con el fin de localizar la fuente de energía, así como inferir la estructura interior del volcán y sus cambios que pudiera presentarse, al conocer y registrar la dinámica de sistemas magmáticos activos a partir de las señales sísmicas y conocer las propiedades físicas de dichos sistemas y diferentes aspectos del sistema

volcánico; asociadas al movimiento y ascenso de magma, degasificación, explosión de gases en el cráter, procesos de hundimiento en las calderas volcánicas, fracturamiento de las rocas en el interior del volcán, etc. Las redes sísmicas, monitorean volcanes con el objetivo de estudiar la sismicidad y aspectos tectónicos activos, mediante localizar los sismos que se producen dentro de la red y el cálculo de sus magnitudes.

Para el funcionamiento de las redes utilizan transmisiones telemétricas, temporalización centralizada y sistemas de grabación, donde la señal de salida obtenida es acondicionada y amplificada en la estación de campo para ser convertida en una ubicación central. Los registros que se obtienen de salida están grabados en cinta magnética, papel o película fotográfica; actualmente las grabaciones son en medios magnéticos como disco duros, facilitando la identificación de los eventos sísmicos y su lectura. Al tener las señales sísmicas de toda la red de monitoreo, permite una rápida corrección de fallas de instrumentos y permite controlar y analizar en tiempo real la actividad. Las señales entrantes a la red tienen una amplia gama de amplitudes, los de interés para el estudio de sismicidad volcánica son los sismos locales, que se caracterizan por sus inicios impulsivos, contenido de alta frecuencia y forma exponencial y se reduce la señal con el tiempo.

La Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima (RESCO) es la que ha monitoreado, desde 1989, la actividad sísmica tanto la general de la región y principalmente del Volcán de Colima. En 1989 se instalaron estaciones de periodo corto de una componente, 3 estaciones en el volcán y 2 estaciones a distancias entre 35 y 40 km del volcán. Las estaciones llevan las siglas EZV en reconocimiento del apoyo del gobernador del estado de Colima, el Licenciado Elías Zamora Verduzco. Para el año 1989 las estaciones EZV1, EZV2, EZV5 y EZV6 se instalaron y comenzaron a funcionar. En el año de 1990 se instalaron EZV3, EZV4 y EZV7, cada estación está

equipada con sismómetros verticales Ranger SS-1. De dichas estaciones las que actualmente registran continua la sismicidad del volcán son la EZV3 (Nevado de Colima), EZV4 (Soma), EZV5 (el Fresnal), EZV6 (La Yerbabuena) y EZV7 (Volcancito) (Moreno, 2008). La estación ESSG empezó a registrar en septiembre de 1999 y junto con las estaciones ESLT y ZLGC son estaciones que se encuentran muy alejadas del área de estudio y llegan a observarse falta de registros continuos.

Las estaciones de RESCO a partir de junio de 2007 cuentan con sensores de banda ancha marca GURALP CMG-6TD.

La siguiente tabla contiene las coordenadas y altura de las estaciones que se utilizaron en el estudio y en el mapa en la figura 10.

<b>Estación</b>	<b>Longitud N [°]</b>	<b>Latitud W [°]</b>	<b>Altitud [m]</b>	<b>Distancia al cráter del volcán [km]</b>
EZV2	19.391	103.86	1628	28
EZV3	19.565	103.62	3957	6
EZV4	19.526	103.63	3023	3
EZV5	19.479	103.6	2173	4
EZV6	19.481	103.68	1711	7
ESSG	18.94	103.74	671	65
ESLT	18.941	104.0107	99	75
ZLGC	19.14	104.46	356	96

Figura 9. Características de las estaciones que registraron los eventos sísmicos durante el periodo de estudio.

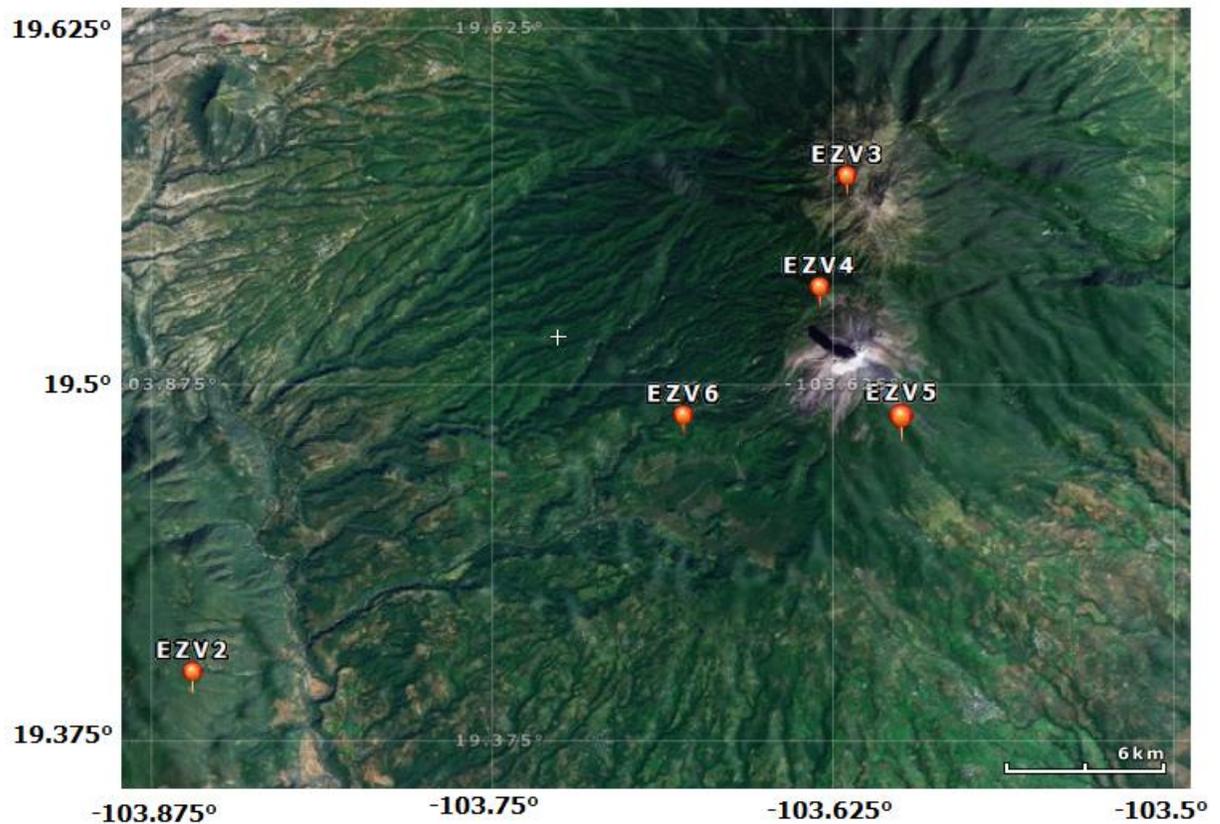


Figura 10. Ubicación de cinco de las ocho estaciones sísmicas que monitorean el volcán de Colima, RESCO.

## 2.4 Sismicidad del Volcán de Colima

Los estudios que se han hecho con respecto a la sismicidad del volcán de Colima han sido numerosos, al ser el monitoreo sísmico el más utilizado.

Estudios previos del volcán muestran una clasificación asociada a la actividad de 1991 del Volcán a partir de las características espectrales de la sismicidad, Lermo y colaboradores (1993) clasifican estos eventos de acuerdo con la forma de onda, forma espectral, frecuencia dominante y observaciones directas de campo, asociados a procesos de emisión de gases o fracturamiento, a derrumbes o avalanchas de fragmentos de roca del cráter Lermo et al (1993). Durante 1991 los eventos observados fueron:

- Eventos tipo B: similares a los tipo B referidos por Minakami (1974), eventos limitados a profundidades superficiales alrededor del cráter del volcán, con codas anormalmente larga en relación a su máxima amplitud. A estos eventos los clasifíco como tipo B-Alta frecuencia (figura 11a) y tipo B-Baja frecuencia (figura 11b). correlacionados con un posible mecanismo de origen de las intrusiones magmáticas y liberación de gases a profundidades aproximadas de 2 km, así como asociados a microfracturas o procesos de emisión de gas dentro del conducto volcánico.
- Tremores armónicos: eventos observados en volcanes activos (figura 11c) reflejan continua vibración del suelo, frecuencia dominante entre 3 y 5 Hz; es cercanamente monocromático y presenta una variación en frecuencia y/o amplitud en el tiempo.
- Tremores de avalancha: son los tremores de avalanchas de fragmentos de roca del cráter (figura 11d), eventos con amplitudes que aumentan lentamente con el tiempo, a partir del inicio del evento, sin fases pronunciadas, para 1991 las avalanchas fueron observadas y correlacionadas con los registros por autores en la ladera suroeste del volcán, al desprendimiento de fragmentos de roca desde la cima del cráter causados por el crecimiento del domo andesítico.

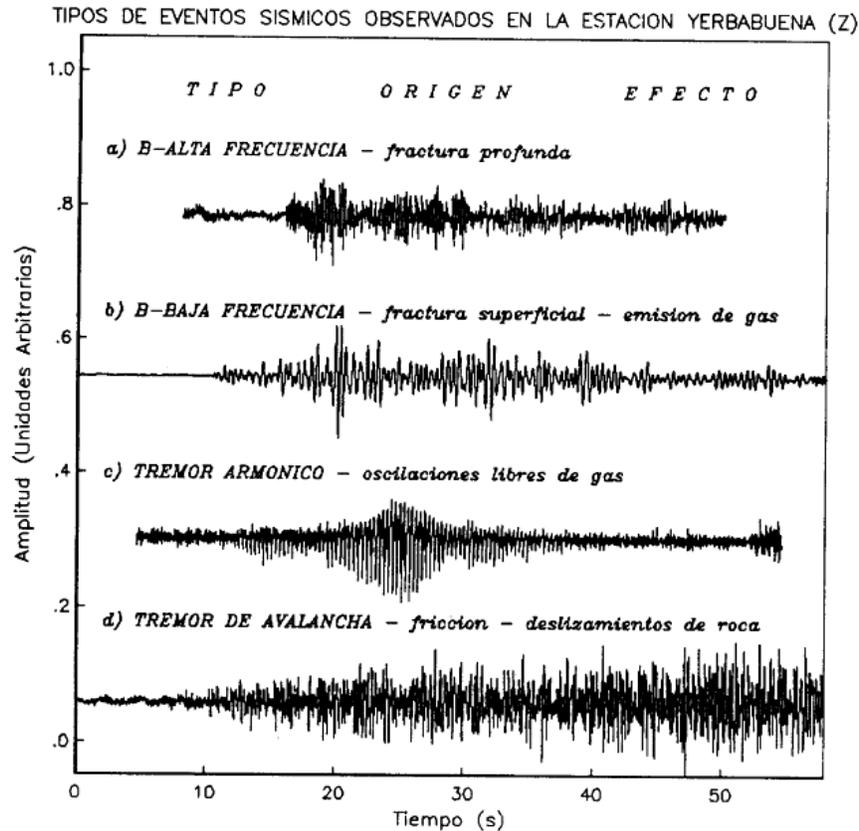


Figura 11. Tipos de eventos sísmicos observados, durante la actividad de 1991, en la componente vertical (Z) de la estación Yerbabuena del Volcán de Colima con sismógrafos de periodo corto, tomada de Lermo, 1993.

El 21 de julio de 1994 el volcán presentó una explosión freática, al destruir el domo del cráter formado en 1991, produciendo avalanchas y caída de ceniza; procedida por secuencias sísmicas del 13 a 21 de julio localizándose dentro del edificio volcánico. Cerca de 450 eventos sísmicos fueron registrados cercanos a las estaciones sísmicas, durante el enjambre 45 eventos fueron localizados, la actividad se desarrolló en dos etapas, del 12 al 15 de julio y la segunda etapa del 17 al 22 de julio. Estos eventos se agruparon a pocas profundidades en un rango de 0 a 4 km sobre el nivel del mar, con máximas magnitudes de 1.2; el análisis detallado de las variaciones en profundidad presenta que estos eventos son poco profundos hasta el momento de la explosión freática. (Zobin, 2003)

Desde noviembre de 1997 el volcán ha presentado varios ciclos eruptivos, cada ciclo comienza con el crecimiento del domo de lava que es seguido por flujos de lava, pequeñas explosiones y desprendimiento de roca, finalizando con explosiones mayores provocando la destrucción del domo (Petrosino, 2011).

Durante el periodo de noviembre 1997 a noviembre de 1998, el volcán de Colima presento una crisis sísmica, relacionada con la extrusión de flujos de bloques de lava andesítica en la cima del cráter; durante el periodo se presentaron enjambres sísmicos distribuidos dentro y debajo del edificio volcánico; seguidos de sismos vulcano-tectónicos. La distribución epicentral se localizó dentro del complejo volcánico de Colima, concentrándose entre el edificio volcánico de Colima y el Nevado de Colima. Con rango de magnitudes entre -0.5 a 2.7, y con profundidades de hasta 10 km (Zobin, 2003).

A finales del 1998 y principios de 1999 continua la actividad, como los derrames de escombros de lava, emisiones de gas y pequeñas explosiones en la cima del volcán, esta actividad aumento la presión en los gases volcánicos; para el 10 de febrero en la cima del volcán tuvo lugar una explosión que formó un cráter de aproximadamente 140 m de diámetro y 50 m de profundidad, arrojó bloques de lava incandescentes a más de 3.5 km y presento flujos piroclásticos, continuando la actividad de explosiones, derrumbes y el incremento de la actividad sísmica (Zamora Camacho, 2003).

En 1999 presento explosiones en la cumbre del Volcán, marcando el comienzo de una nueva etapa del proceso eruptivo, para el 2001 se exhiben más explosiones, el análisis de los eventos sísmicos y RSEM fueron útiles herramientas para la predicción de los eventos. Con los estudios realizados del patrón de las explosiones, mostraron la relación entre la energía sísmica liberada antes de la explosión y la energía de la explosión de las señales sísmicas incrementan inversamente; 2002 continua el flujo

de lava hasta abril, a partir de este mes cortos periodos de sismos aparecieron esporádicamente, con aumento en la duración, amplitud y contenido espectral, finalizando en mayo (Núñez-Cornú, 2004).

Para el 2000 el volcán presentó ligera y estable actividad sísmica y volcánica, erupciones ocasionales y lahares. El siguiente año se reportaron moderadas explosiones, como expulsión de material incandescente, en el 2001 se colapsó la columna eruptiva que se formó con flujos piroclásticos; se localizaron epicentro de 33 sismos durante febrero. (Moreno, 2008).

Durante 2004 el volcán se caracterizó por extrusión de bloques de lava andesítica, acompañada y seguida por numerosas señales sísmicas asociadas por caídas de roca, flujos piroclásticos y eventos explosivos; se realizaron análisis de las variaciones temporales en el número de caída de roca y explosiones, así como la duración de las señales sísmicas de la caída de rocas y la energía de explosiones siendo comparada con la velocidad de descarga del magma y la emisión de SO<sub>2</sub> durante la extrusión de bloques de Lava (Zobin, 2008).

En todo el año 2005 se presentó actividad en el volcán, como explosiones y ceniza; el mes de febrero exhibió pequeñas explosiones con flujos piroclásticos que llegaron a distancias de ~2.5 km al SE del cráter,

<http://www.volcano.si.edu/volcano.cfm?vnum=1401-04=#January2005>). El último ciclo eruptivo se exhibió en este año, después del 2004 se caracterizó por bloques de lava y serias explosiones acompañados de flujos piroclásticos. Esta actividad eruptiva se prolongó de julio 2005 a enero 2007 con pequeños explosiones de vapor y cenizas, produciendo columnas de ceniza que alcanzaron alturas de hasta 9 km, continuando hasta marzo 2006 con el incremento de la actividad. En el 2007 pequeñas explosiones se presentaron con la formación de un nuevo domo de lava en el cráter que se observó en febrero 2007, en dicho año el domo creció hasta una

altura más alta que el borde del cráter, llenando aproximadamente el 80% del cráter, este crecimiento ha estado acompañado por pequeñas explosiones que se presentan entre 5 y 10 por día (Petrosino, 2011).

.

## **3. LA ERUPCIÓN DE 2009 Y LA SISMICIDAD ASOCIADA**

### **3.1 Características de la erupción de 2009**

La actividad volcánica que se observó, fue la emisión de gases, los magmas contienen cantidades variables de gases volátiles que se mantienen en la roca fundida por la presión de confinamiento, la emisión de estos gases al aire emana de la evaporación de agua al contacto con el magma caliente, al emerger por fisuras y se elevan formando nubes alimentadas por fumarolas (Orozco, 2005). Tanto gases sulfurosos y vapor de agua son emitidos ya que se reduce la presión dentro del volcán, y los gases empiezan a escapar. Estas fueron las actividades, durante el periodo de estudio, que se exhibió en el volcán de Colima.

En el 2009 se presentaron varias actividades, en los meses de febrero, marzo, abril mayo, julio, siendo octubre a diciembre el periodo de interés del presente trabajo. En los primeros meses la actividad del volcán se caracterizó por plumas de gas que se llegaron a elevar hasta ~5 km y salida de material incandescente en febrero por encima de la cumbre, fueron reportes realizados por el Gobierno del Estado de Colima (<http://www.volcano.si.edu/volcano.cfm?vnum=1401-04=#October2009>).

Durante el periodo de estudio, en octubre el Gobierno del Estado de Colima reporto una pluma de gas con una altura de ~4 km con direcciones Suroeste, noreste y al norte (<http://www.volcano.si.edu/volcano.cfm?vnum=1401-04=#October2009>). Para el mes de noviembre se observó el posible comienzo de una erupción; el 25 de noviembre se detectó el crecimiento considerable del domo de lava (Figura 12), se registraron de 6 y 7 erupciones de emisiones de gases fuertes por día que han alcanzado un promedio de 500 m de altura sobre el nivel del cráter, así como emanaciones de vapor de agua, iniciando con material que al caer sobre el domo del volcán tapa los conductos, con una acumulación de energía dentro del cono,

estas fueron observaciones que se presentaron en el volcán, descartando una erupción mayor (<http://www.eluniversal.com.mx/estados/73789.html>).



Figura 12. Fotografía del sobrevuelo realizado por la Unidad Estatal de Protección Civil y Bomberos que muestra la acumulación de materia en la cima del volcán, tomada de <http://www.oem.com.mx/eloccidental/notas/n1418458.htm>.

Iniciando el mes de diciembre, la Unidad Estatal de Protección Civil de Colima reporta una pluma de gas en el volcán el 1 de diciembre, alcanzando los 100 m por encima del cráter con dirección al este. El 2 de diciembre hubo salida de material incandescente, que fue expulsado 50 m por encima del cráter hacia el sureste, de ese mismo día una pluma de gas se observó elevándose 50 m sobre el cráter y con dirección suroeste (<http://www.volcano.si.edu/volcano.cfm?vnum=1401-04=#October2009>).

La intensa actividad del Volcán de Colima continua, se observa que la mañana del 2 de diciembre arrojó material incandescente por una de sus laderas, reportes de la Unidad Estatal de Protección Civil, se observa que a las 18:06 hrs (hora local) del 1 de diciembre y las 5:30 hrs (hora local) del miércoles el volcán continua con una intensa actividad, por la mañana arroja material incandescente, esto sigue siendo reportado por la Unidad Estatal de Protección Civil de Colima, con el informe sobre actividad fumarólica continua, sin ningún tipo de daño o heridos. Por la tarde del 2

de diciembre el volcán de Fuego emitió una fumarola continua hasta de 100 m de altura, así como expulsión de material incandescente (<http://www.eluniversal.com.mx/notas/643695.html>).

La mayor actividad volcánica en el periodo fue del 1 al 3 de diciembre, como ejemplos de la actividad sísmica se presentan las estaciones EZV4 (la más cercana al cráter) y la EZV5 en las figuras 13 y 14 del día 2 de diciembre respectivamente. En la figura 13 se muestran un evento Tipo A y Tipo B típicos del volcán, y en la figura 14 con la flecha se señala el inicio de la salida de material (principal evento del período).

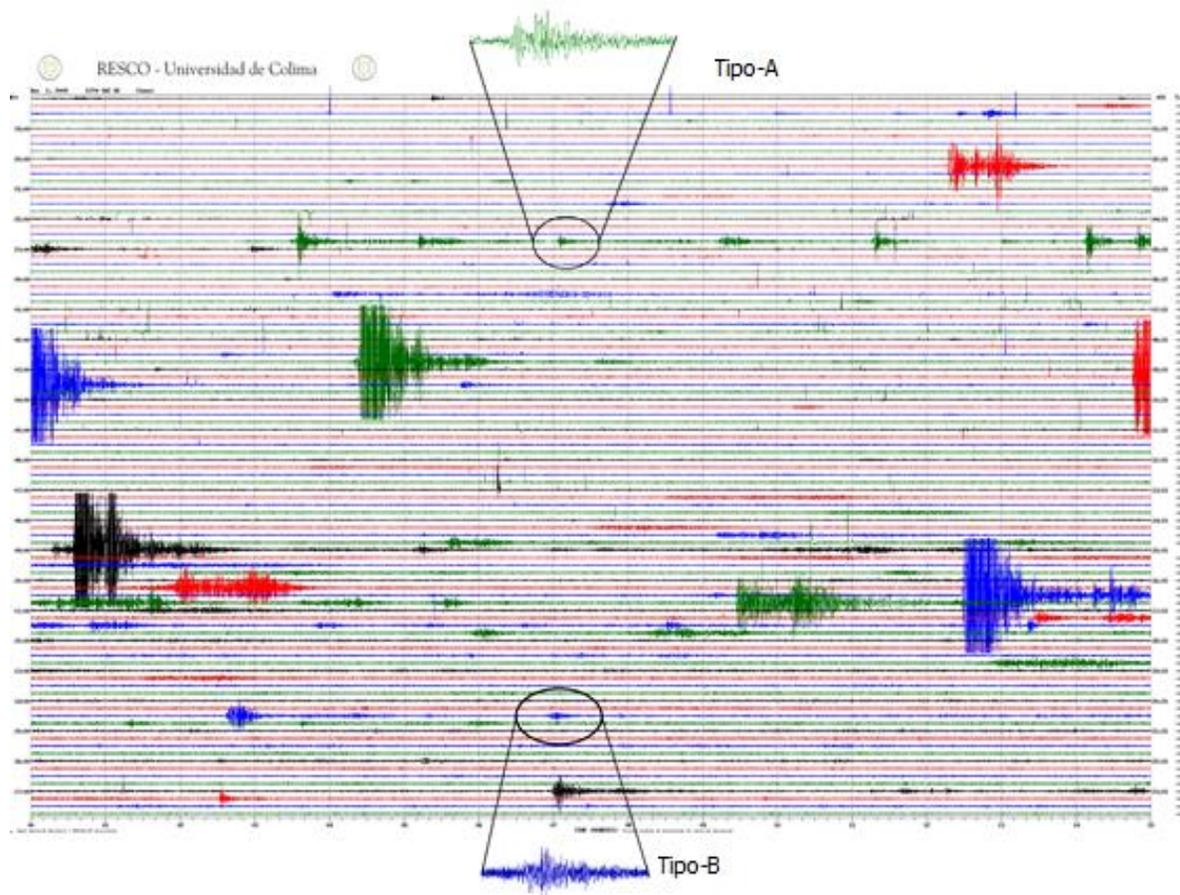


Figura 13., Sismograma en la estación EZV4 proporcionado por la RESCO, donde se muestran un evento Tipo A y uno Tipo B, típicos del volcán.

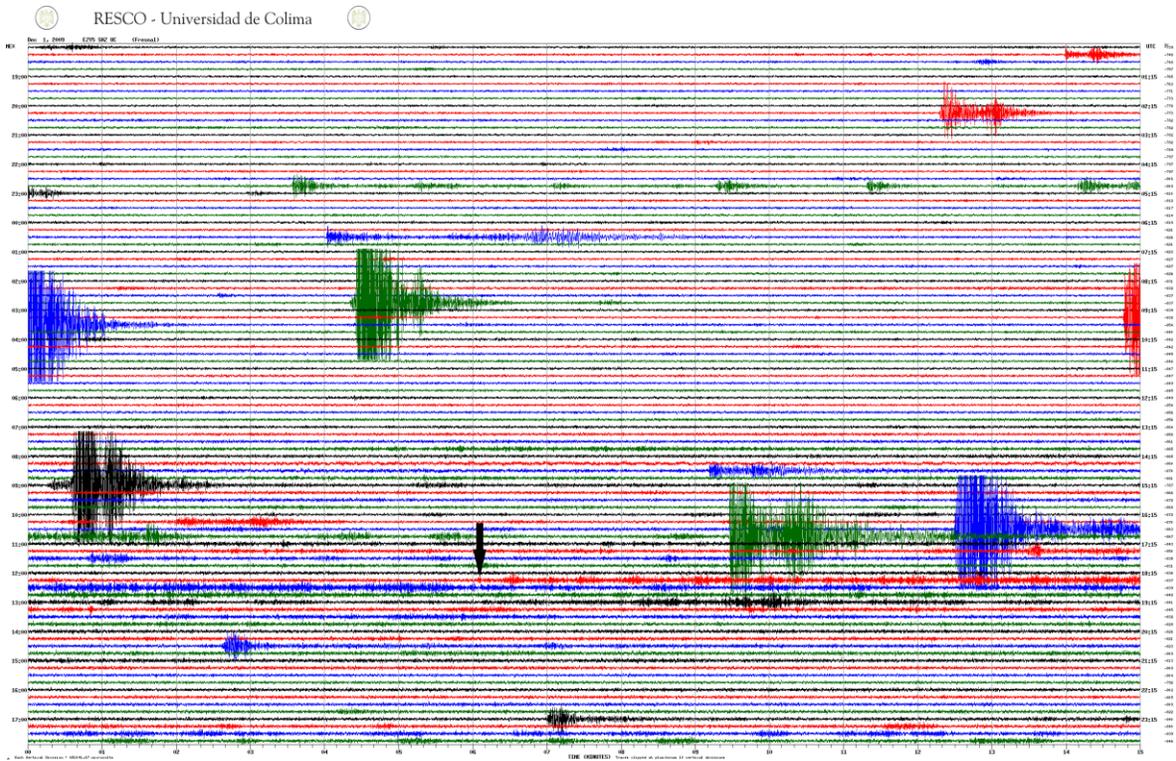


Figura 14. Sismograma del día 2 de diciembre de la estación EZV5 proporcionado por la RESCO, donde se muestra (flecha el inicio de la salida de material incandescente por una de sus laderas (ladera Este).

### 3.2 Selección de eventos durante el periodo 1 de octubre al 30 de diciembre de 2009

Se analizaron las formas de la onda de los registros sísmicos de octubre a diciembre del 2009. El intervalo de tiempo incluye 61 días antes del clímax de la actividad del periodo, la cual consistió en la salida de material incandescente por la ladera Este del volcán, y los 27 días posteriores.

Los datos para el análisis sísmico fueron proporcionado por RESCO ( M en C Gabriel Reyes Dávila) se basa en el despliegue para la visualización de la señal la cual fue hecha con el software Scream4.4!. En la pantalla se despliegan las ocho estaciones de RESCO (EZV2, EZV3, EZV4, EZV5, EZV6, ESSG, ESLT y ZLGC) de componente vertical para la selección de los eventos, donde se pueden visualizar, seleccionar y

convertir al formato SUDS, con el que posteriormente, son leídas las fases correspondientes. Los datos se encuentran en archivos de 24 horas, los cuales cuentan con año, mes, día, amplitudes y escala de tiempo. Las funciones en pantalla facilitaron la visualización de los eventos para modificar el rango de la ventana de tiempo que se presenta, así como el tiempo y la amplitud del evento; otra función práctica es ver una aproximación del tiempo entre la onda P y S para separar los eventos por su diferencia en tiempos  $t_{s-p}$ .

Una vez seleccionado el evento para su análisis se utilizó el formato SUDSPICK (para MSDOS). A continuación se separan los eventos en categorías de: locales, regionales y telesismos, dependiendo de la diferencia entre los tiempos de arribo de las ondas P y S, para ser considerados eventos locales deben cumplir con la condición  $0 < t_{s-p} < 5$  s (figura 15) y suponiendo que la velocidad de la onda P es constante  $V_p=6$ km/s cumplen con la posición de las distancias aproximadas de los epicentros en un rango de no mayor a 30 km, con estas condiciones se considera que el eventos es local.



Figura 15. Muestra la diferencia en los arribos de tiempo de las ondas P y S para poder conocer si se encuentra dentro de un sismo local.

Una vez realizada la identificación de las distintas fases de los eventos, los tiempos de llegada de las ondas P y S, de las distintas estaciones, la determinación de las diferencias de tiempo, para la localización de hipocentros. Dicha localización es a partir de los algoritmos tradicionalmente usados, en este trabajo se utilizó el algoritmo HYPOCENTER (Barry et al, 1986), siendo un método que combina

características de los algoritmos Hypo71 (e.g., Lee & Lahr, 1972) e Hypoinverse (Klein, 1985); no hay que olvidar que los algoritmos asumen que el espacio medio que es de capas horizontales y/o los modelos con gradientes lineales sin topografía, con ello se tiene en cuenta una aproximación del hipocentro verdadero y la caracterización de la zona.

Durante el periodo de análisis se clasificaron 1587 eventos que fueron seleccionados del ruido como señales sísmicas, por encontrarse en al menos tres estaciones. En la figura 16 se muestra la clasificación de los eventos seleccionados durante el periodo de estudio.

<i>Tipo</i>	<b>Locales</b>	<b>Regionales</b>	<b>Telesismos</b>	<b>Total</b>
<b>Numero de eventos</b>	542	682	363	1587

Figura 16. Total de datos seleccionados durante el periodo de estudio.

De los datos clasificados como señales sísmicas (1587 eventos), solamente los eventos locales (542) fueron analizados a detalle, de ellos un total de 281 eventos presentaron claros arribos de la onda P y S en al menos tres de las ocho estaciones sísmicas utilizadas para la selección durante el periodo de estudio. A los eventos locales se les leyeron los tiempos de arribo de las fases P y S, se asignó el peso de cada una de las fases evaluado por la calidad de la onda, se estableció a cada fase el carácter de impulsiva o emergente, el sentido del primer movimiento, y el valor de la coda; lo anterior para cada estación.

En la figura 17 se presenta la frecuencia diaria de los eventos seleccionados en el periodo del 1 de octubre al 30 de diciembre, sobresaliendo el día 3 y 23 de noviembre, estos días se muestran seleccionados con una flecha, con un máximo de 37 eventos y el 22 de octubre con 36 eventos. Es importante resaltar que días antes

de la actividad principal se presentan los máximos de eventos volcano-tectónicos (Tipo A) lo que sugiere en la apertura de los conductos para el paso del material a la superficie, esto se muestra con la aparición de mayor cantidad de eventos Tipo B después del día 3 de diciembre.

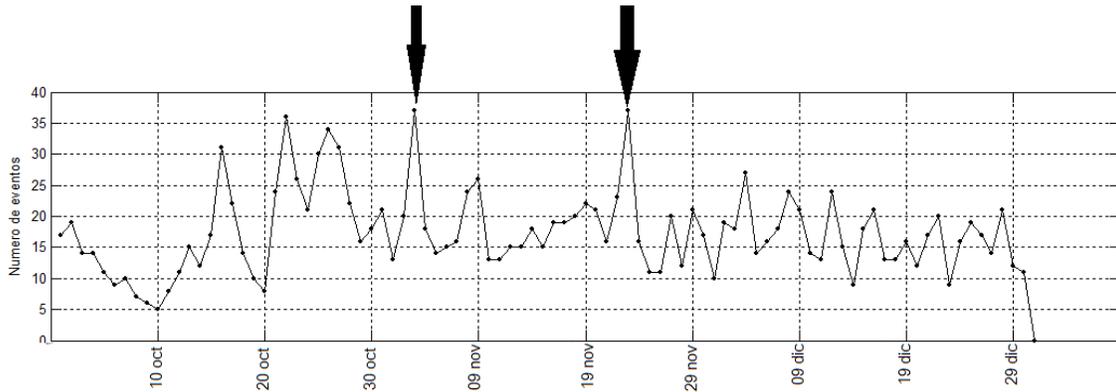


Figura 17. Distribución temporal de los eventos seleccionados durante el periodo, con las flechas marca los días de mayor frecuencia de eventos

En la figura 18 se muestra la distribución temporal de los eventos Tipo A, presentando una acumulación de 95 eventos en octubre, 113 eventos en el mes de noviembre, siendo máximo, y 73 eventos en el mes de diciembre. De estos eventos Tipo A el máximo se presentó el 1 de octubre con 9 eventos, el 3, 6 y 18 de noviembre con 8 eventos. De la gráfica es claro que hay mayor presencia de eventos Tipo A del 1 de octubre al 30 de noviembre, lo que sugiere una fracturamiento de la roca encajonante.

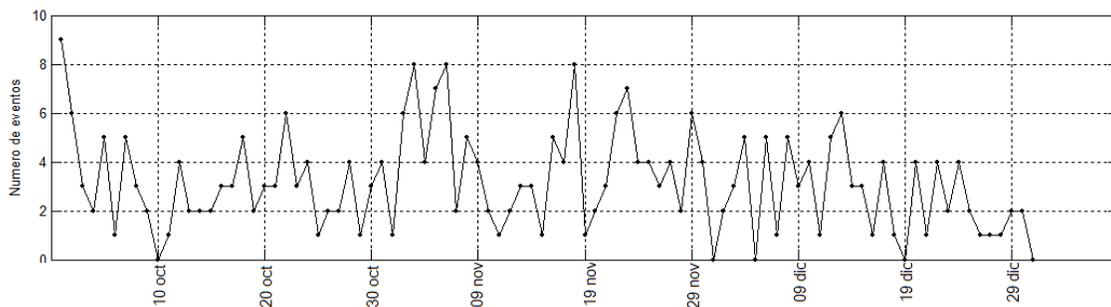


Figura 18. Distribución temporal de los 281 eventos locales durante el periodo 1 de octubre al 30 de diciembre 2009.

Como ya mencionamos los sismos Tipo A o volcano-tectónicos, fueron los que predominaron antes de la mayor actividad principal del volcán (1-3 diciembre), como ejemplo en la figura 19 se presenta uno de estos sismos que fue registrados en cuatro de las estaciones de la RESCO, se aprecia la llegada impulsiva de la onda P y S en la componente vertical y lo que se define como coda.

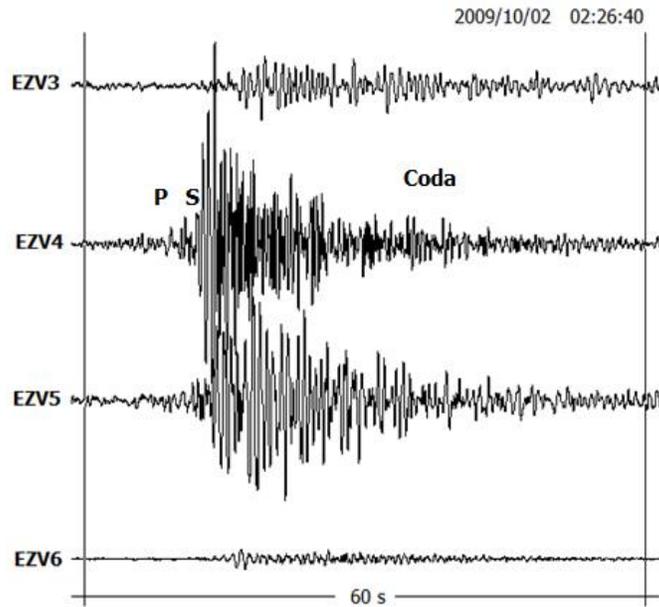


Figura 19. Muestra el registro de un sismo tipo A observado el día 2 de octubre 2009, registro que se observa en las estaciones que se encuentran dentro y cercanas al cono volcánico, antes de la actividad del volcán.

De igual forma se presenta un ejemplo de un sismo Tipo B típico del periodo registrado en cuatro de las estaciones de la RESCO (Figura 20), estos eventos suelen tener inicios emergentes, donde no se observa el comienzo claro de la señal, no exhiben arribos definidos de ningún tipo de fase (P y S), este tipo de sismos se presentan cuando hay paso de material o gas hacia la superficie.

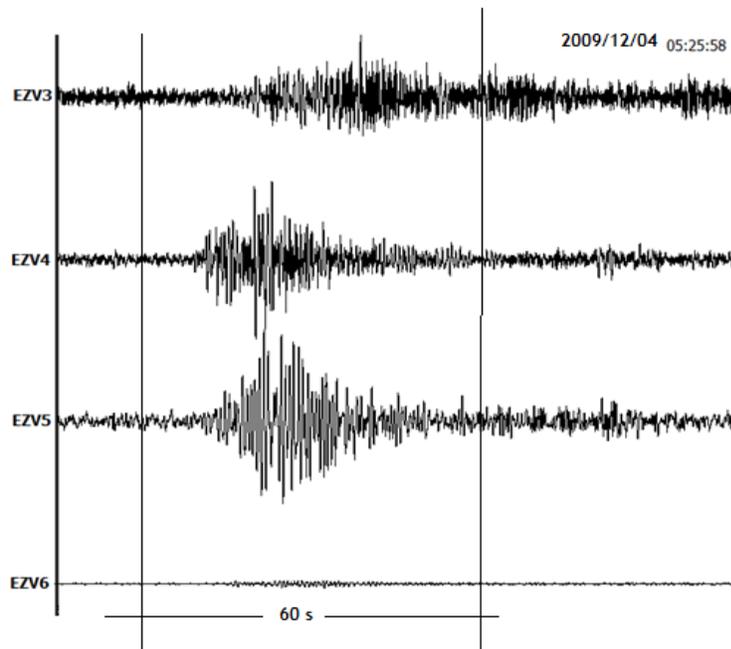


Figura 20. Muestra el registro de un sismo tipo B observado el día 4 de diciembre de 2009, registro que se observa en las estaciones que se encuentran dentro y cercanas al cono volcánico, posteriormente a la actividad del volcán.

### 3.3 Localización y análisis de eventos sísmicos

El análisis sísmico nos proporciona información de lo que ocurre por debajo de la superficie, en la corteza y/o al interior del volcán, apoyándose en la localización de los sismos. Para la localización de los eventos de este estudio se utilizó el programa HYPOCENTER.

El uso de modelos de velocidades de múltiples capas unidimensionales que representa la estructura de la corteza, son ideales para tener una estimación del interior de la Tierra, nos sirve de referencia para adecuar las condiciones particulares de las regiones de estudio; para la localización de los eventos sísmicos y el cálculo de los parámetros focales, se toma en cuenta el modelo cortical de velocidades. El utilizado en este estudio es el que de manera rutinaria se usa en la localización de la sismicidad del volcán Popocatepetl.

HYPOCENTER, determina los hipocentros utilizando los procedimientos estadísticos de regresión de centrado, y escalamiento, al relacionar los cambios en los tiempos de arribo y las variaciones en la localización epicentral.

Los valores de la coda de las señales en las diferentes estaciones se obtuvieron a partir de la observación de la atenuación de la amplitud comparada con el nivel de ruido de cada estación.

Los valores de los parámetros focales que arroja el programa HYPOCENTER son el tiempo de origen, las coordenadas epicentrales (Latitud N, Longitud W), la profundidad focal (km), la magnitud de coda ( $M_c$ ), los errores cuadráticos medios (RMS) calculados por el tiempo de origen, el error horizontal (ERH) y el error vertical (ERZ) que corresponde a las coordenadas hipocentrales. El valor de la magnitud de coda se determina a partir de la fórmula:

$$M_c = 2 \log \tau - 0.87 + 0.0035 \Delta$$

donde  $\tau$  es la duración de la señal en segundos y  $\Delta$  es la distancia epicentral en kilómetros.

De los sismos Tipo A (281 eventos seleccionados y leídos) únicamente 261 fueron localizados por el programa. Haciendo un refinamiento con los errores medios en las localizaciones horizontales, verticales y RMS son: 2.37 km, 2.04 km y 1.76 seg respectivamente, cumpliendo las restricciones solo 147 eventos; de los últimos eventos 41 corresponden al mes de octubre, 64 eventos en noviembre (mayor acumulación del periodo) y finalizando con 42 eventos en diciembre. La disposición de estos eventos se muestra en las figuras 21 y 23, se aprecia la distribución epicentral en la que 125 eventos corresponden al "área del volcán" y los 22 restantes se localizan en el "área de la costa". Los resultados obtenidos para los 147 eventos después del proceso de selección se presentan en el anexo.

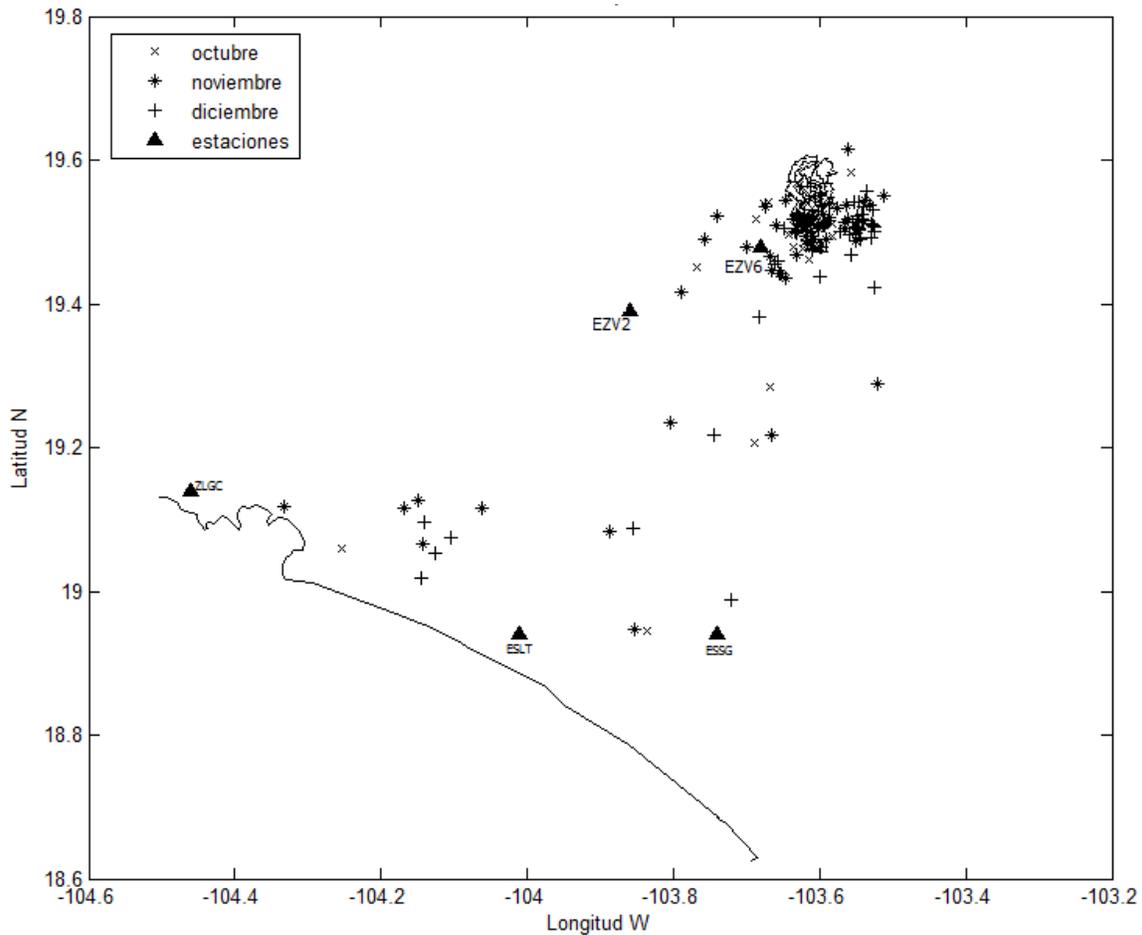


Figura 21. Localización epicentral de la sismicidad asociada al Volcán de Colima durante los meses de octubre (equis), noviembre (asterisco) y diciembre (cruces), donde se muestra las estaciones para la localización de los eventos de la RESCO y la línea de costa.

La distribución de los eventos respecto a sus magnitudes se muestra en la figura 22, se observa que los mayores eventos se encuentran en un rango de magnitud entre  $2 \leq M_c < 3$ , siendo 100 eventos de los 147.

En el mes de noviembre se tienen 64 eventos, que corresponde a la mayor acumulación de del periodo y de estos 40 eventos corresponden a las magnitudes entre  $2 \leq M_c < 3$ . La distribución gráficamente se muestra en la figura 23. En esta se estima que únicamente 6 de los 100 eventos de magnitudes  $2 \leq M_c < 3$  están localizados en el "área de la costa" y los demás se encuentran en "área del volcán".

Magnitud	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
$M_c < 2$	2	0	1	3
$2 \leq M_c < 3$	32	40	28	100
$3 \leq M_c$	7	24	13	44
<b>Total</b>	41	64	42	<b>147 eventos</b>

Figura 22. Distribución por mes de los sismos por intervalo de magnitud de coda.

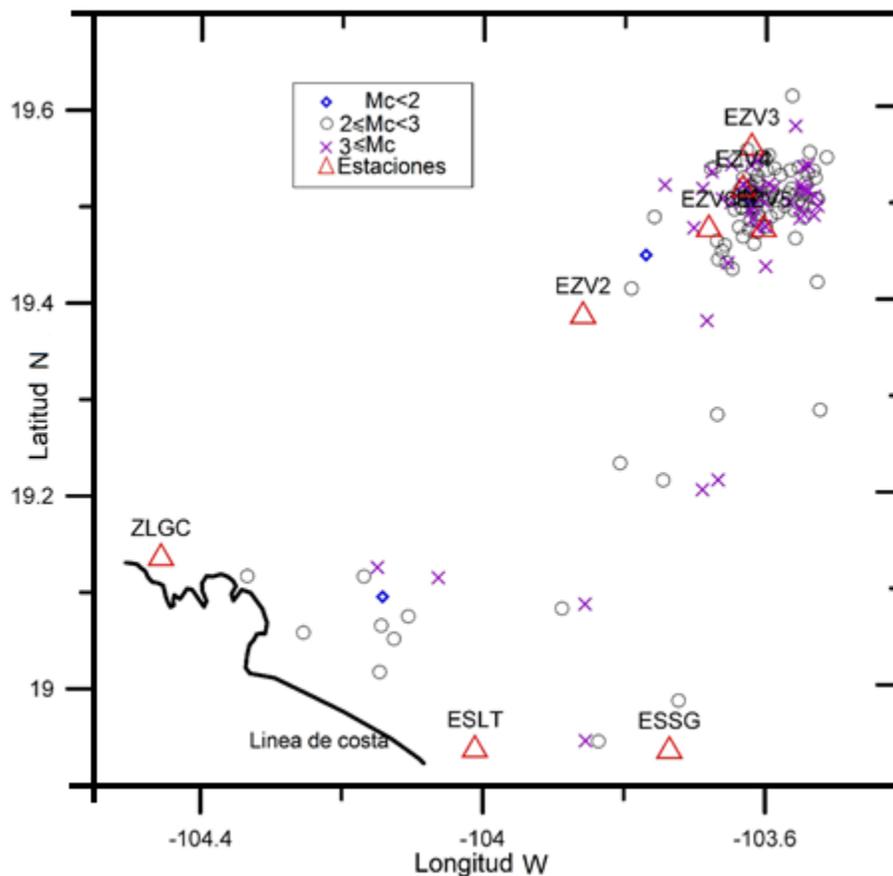


Figura 23. Localización epicentral de la sismicidad asociada al Volcán de Colima, de los 147 eventos, en función de su  $M_c$

En la figura 24 se muestra la distribución de los 125 epicentros localizados en el "área del volcán" mostrando la ocurrencia por mes. En octubre la distribución es alrededor del volcán y en noviembre la mayoría de epicentros se disponen hacia la parte Este del cono volcánico, para diciembre entre el 1 y 3 ocurrió la salida de material

incandescente; y la localización predominante en un área es de aproximadamente cuatro kilómetros hacia la parte Este del volcán.

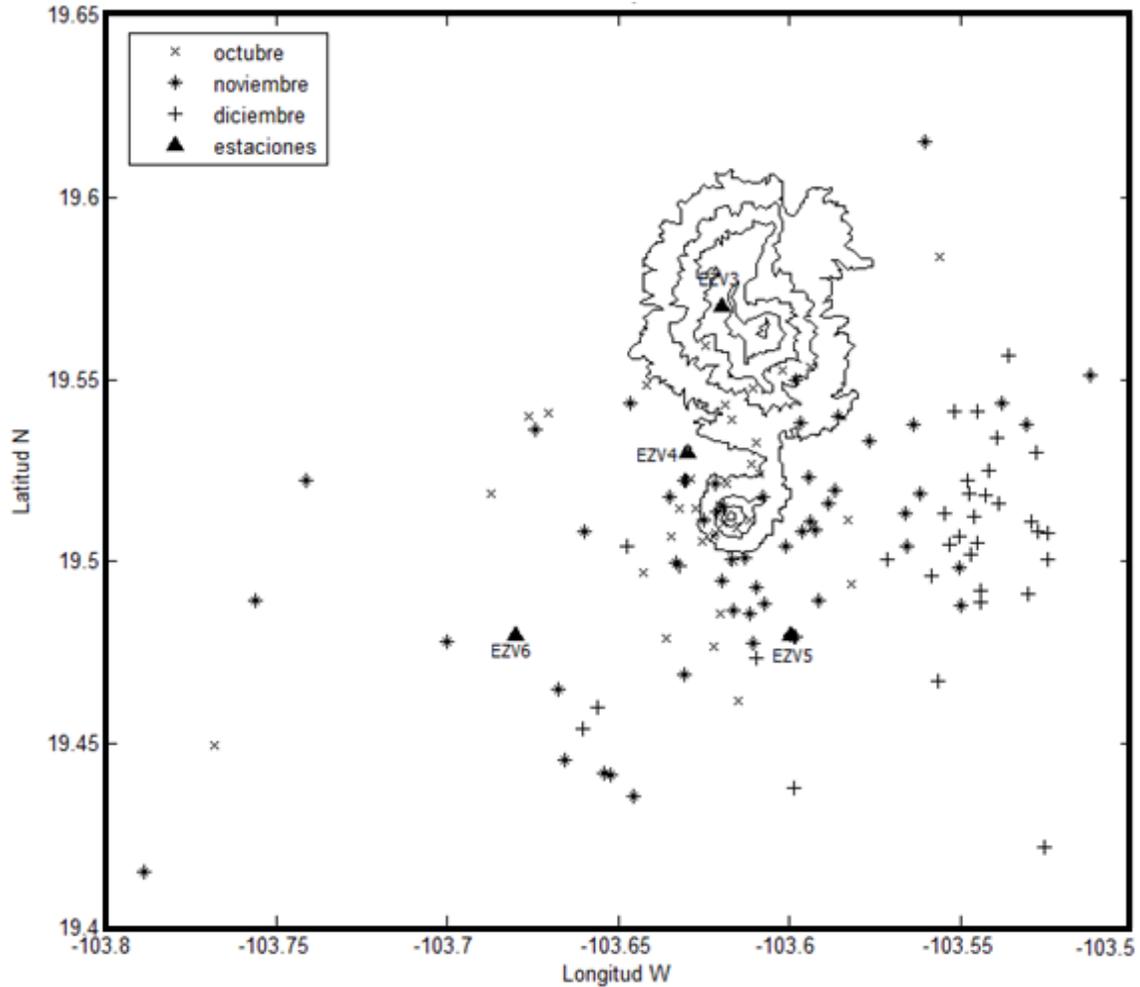


Figura 24. Localización de epicentros del área volcánica y cuatro de las estaciones del monitoreo de la RESCO, cercanos al volcán.

La figura 25 muestra la ocurrencia de eventos en el "área del volcán" respecto a sus magnitudes. Donde la mayor concentración de los eventos, con magnitudes  $2 \leq M_c$ , se encuentran alrededor del volcán, lo que sugiere una acumulación de energía y una mayor acumulación de esfuerzos en el área; asimismo se observa que los eventos con magnitudes  $3 \leq M_c$  también se encuentran distribuidos hacia la parte Este del volcán.

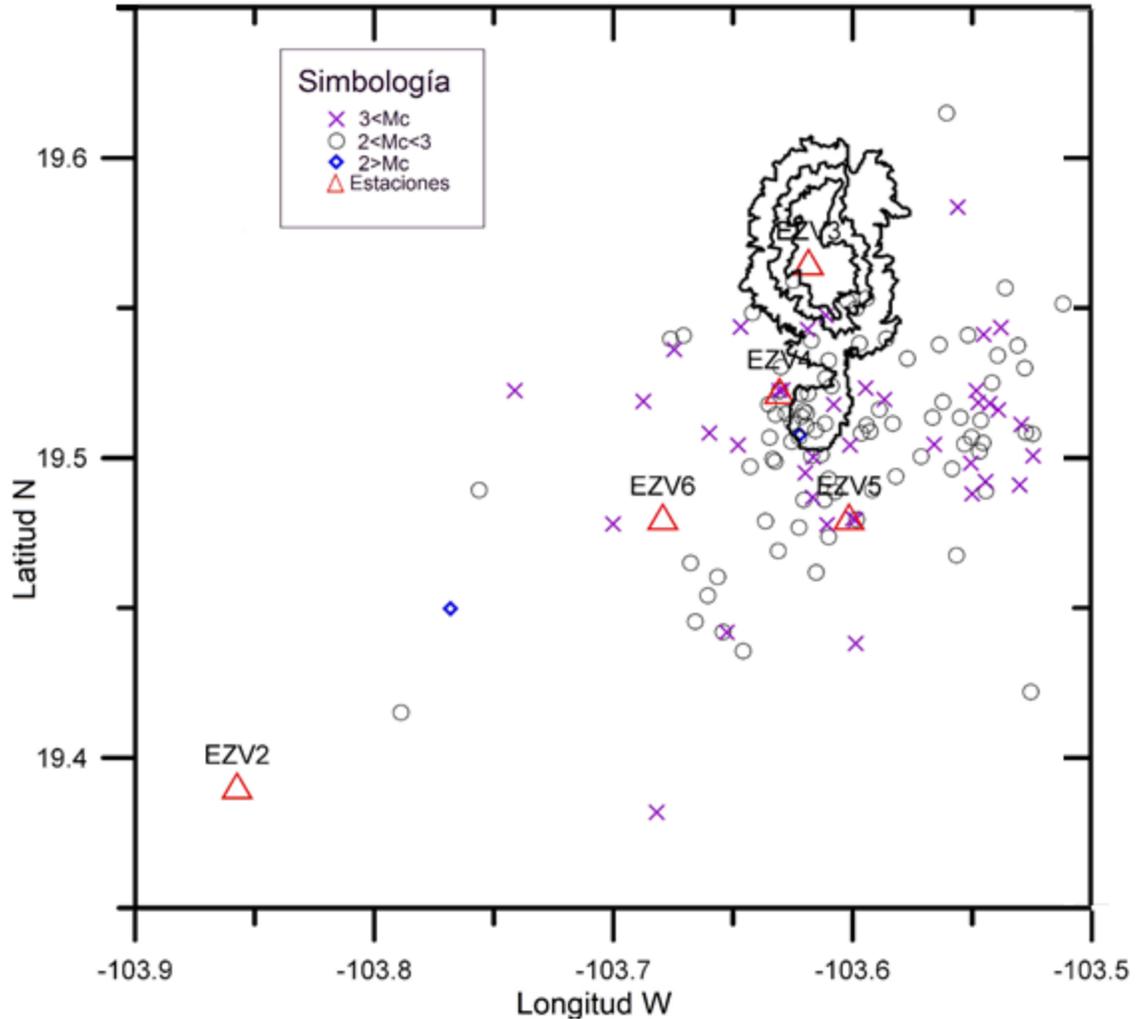


Figura 25. Localización de epicentros área volcánica respecto al rango de magnitudes y cinco de las estaciones del monitoreo de la RESCO, cercanos al volcán.

La localización hipocentral con respecto a la ocurrencia por mes de los 147 eventos del periodo de estudio se muestran en los perfiles NS (figura 26) y EW (figura 27); la localización de los 125 eventos del "área del volcán" se presentan en la figura 25 correspondiente al perfil N-S y la figura 27 al perfil EW, la mayor distribución de hipocentros se encuentra a profundidades no mayores a los 6 km. La distribución de los hipocentros en los perfiles NS y EW está tanto en función del rango de

magnitudes como la ocurrencia por mes, esto se muestra en las figuras 26 y 27 respectivamente.

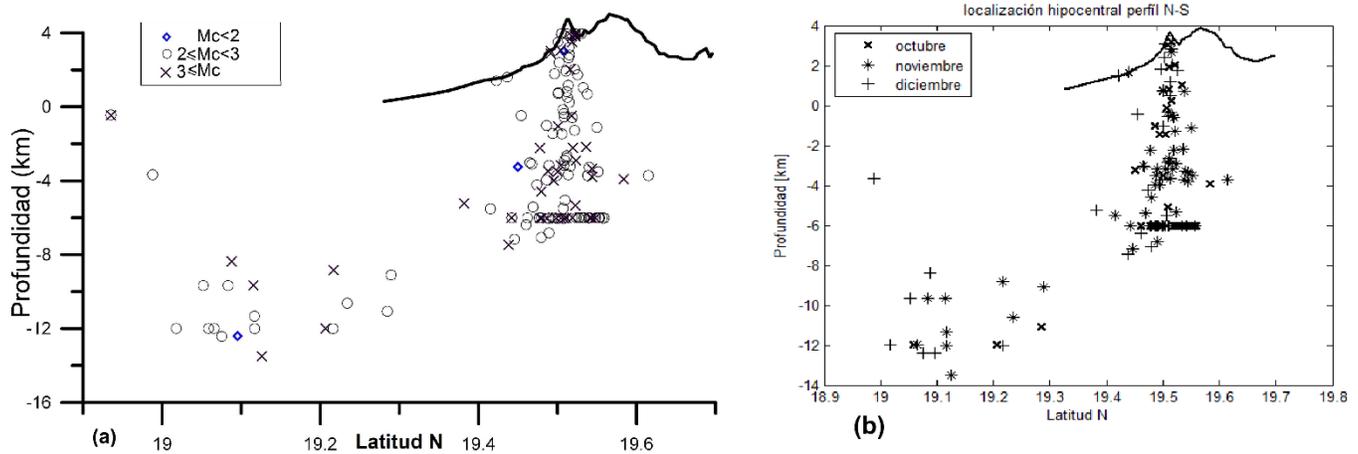


Figura 26. Localización de los 147 hipocentros de los eventos en el perfil NS (a) respecto al rango de magnitudes y (b) en función de la ocurrencia por mes.

En el perfil NS y EW la localización hipocentral la dividimos en el "área de la Costa" y el "área del volcán" (figura 26 y 27 respectivamente). Para el "área del volcán" los hipocentros se ubican debajo del cono volcánico, la figura 26-b muestra la ocurrencia por mes de las localizaciones, se observa que para el mes de octubre no hay una tendencia principal, para noviembre las profundidades son mayores comparadas con las del mes de diciembre. Mientras que para el "área de la Costa" los eventos del periodo tienen profundidades similares no mayores de 14 km. En la figura 26-a la mayor cantidad de los eventos con magnitudes mayores a los  $2 \leq M_c$  se localizan bajo el volcán. En un rango de 10 km, a profundidades no mayores a los 6 km.

En la figura 27 se muestran los hipocentros de los 125 eventos correspondientes al "área del volcán" donde la mayor concentración de eventos se localiza a profundidades no mayores a los 6 km, siendo el 87.8% el máximo de los eventos que

caracterizan el periodo. En el mes de octubre se localizaron 37 eventos, en noviembre 54 eventos y en diciembre 34 la distribución de profundidades se presenta en la figura 27b. Para el caso de los hipocentros en función del rango de magnitudes, se muestra en la figura 27-a, que los eventos que se encuentran entre magnitudes  $2 \leq M_c < 3$ . Son los que predominan en un rango de 10 km, debajo del cono volcánico a profundidades de hasta 6 km.

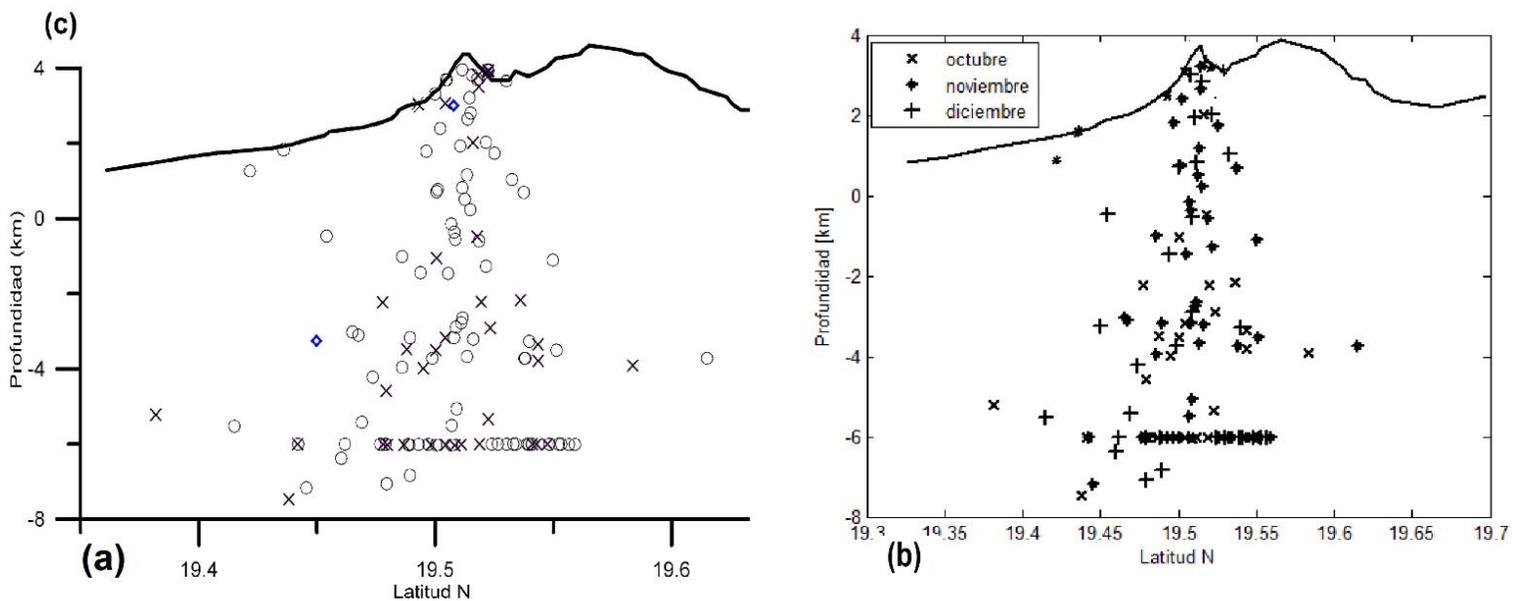


Figura 27. Localización de hipocentros del estudio para el "área del volcán" donde las profundidades se encuentran entre los 0 y 12 km.

La localización de los 147 hipocentros en el perfil E-W muestra una mayor concentración debajo del volcán ("área del volcán") con profundidades no mayores a 6 km, y el caso para el "área de la Costa" las profundidades van de 8 a 14 km. (figura 28), tanto en la ocurrencia por mes (figura 28-b) y en función del rango de magnitudes (figura 28-a).

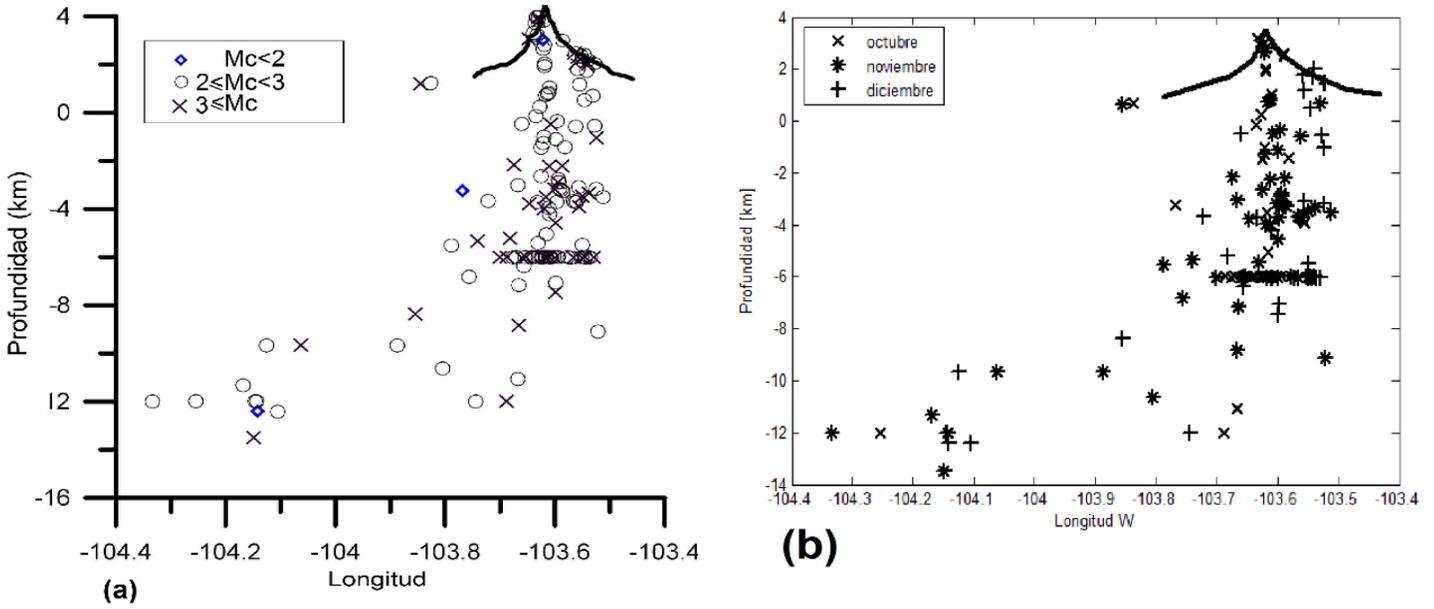


Figura 28. Localización de los 147 hipocentros de los eventos en el perfil EW (a) respecto al rango de magnitudes y (b) en función de la ocurrencia por mes.

En la figura 29 se muestra los 125 hipocentros del “área del volcán”, la distribución hipocentral en ocurrencia por mes se observa en la figura 29-b, donde el mes de octubre no hay una tendencia de profundidad, en noviembre se registra el máximo de eventos localizados (54) y el rango principal de profundidades esta entre 0 y 7 km y llegan estos eventos a alturas de hasta los 3.9 km, mientras que para diciembre (34 eventos) la acumulación de eventos se encuentran en profundidades de menos de 7km. De lo anterior la mayor presencia de eventos Tipo A se da en el mes de noviembre.

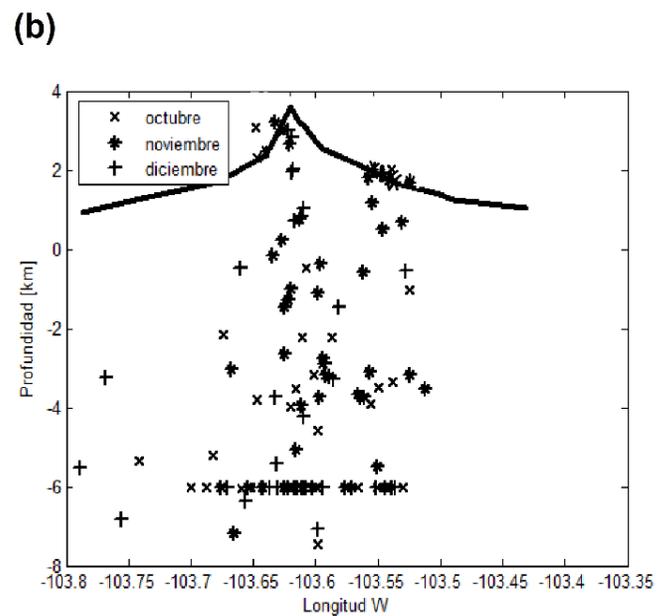
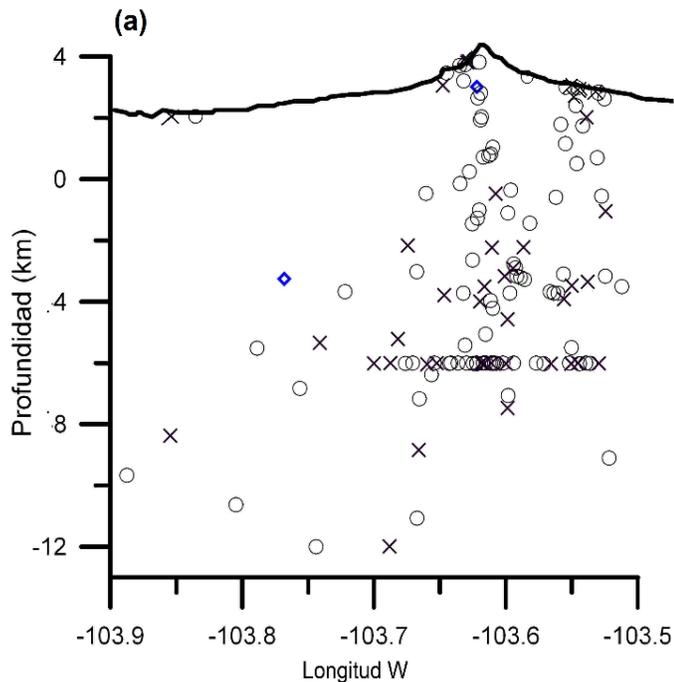


Figura 29 Localización de la mayor distribución de los eventos localizados, en el perfil EW a profundidades entre los 0 y 12km.

En la figura 30 se hace una separación en detalle de profundidad por rango de los 147 eventos del área, de los eventos 39 se encuentran a alturas de hasta 3.9 km sobre el nivel del mar, lo que corresponde el 26.5% de los 147 eventos. De los eventos que se encuentran a profundidad, la mayor concentración se encuentran hasta los 7 km, que corresponden el 59.2%, de los que la mayoría corresponde al "área volcánica". Lo que se obtiene que los eventos se encuentran en un rango de 10 km.

<b>Profundidad (km)</b>	<b>Número de eventos</b>	<b>%</b>
$0 \leq P < 1$	6	4.1
$1 \leq P < 2$	6	4.1
$2 \leq P < 3$	7	4.8
$3 \leq P < 4$	22	15.0
$4 \leq P < 5$	2	1.4
$5 \leq P < 6$	6	4.1
$6 \leq P < 7$	38	25.9
$7 \leq P < 8$	3	2.0
$8 \leq P < 9$	2	1.4
$9 \leq P < 10$	4	2.7
$10 < P$	12	8.2

Figura 30. Distribución porcentual y número de eventos por profundidad de eventos localizados.

Se observa una alineación en las figuras 26, 27, 28 y 29, en profundidades aproximadamente de 6 km, estos datos se encuentran dentro de los llamados confiables a partir de los errores obtenidos, la carencia de los datos puede ser la causa de la localización de estos focos en la misma profundidad y el programa los ajusta a este valor.

Respecto a la distribución de magnitudes de coda, de los 125 eventos del "área del volcán", se observa que para el periodo de estudio la mayor cantidad de los datos se tienen magnitudes entre los  $2.0 \leq M_c < 3$ , el 84%, también se presenta la distribución porcentual, mostrado en figura 31.

<b>Magnitud de Coda [Mc]</b>	<b>Número de eventos</b>	<b>%</b>
$M_c < 2.0$	2	4.4
$2.0 \leq M_c < 2.5$	21	33.0
$2.5 \leq M_c < 3.0$	64	51.6
$3 \leq M_c$	38	11.0

Figura 31 Número de sismos por cada intervalo de magnitud de coda y distribución porcentual de los eventos.

En la figura 32 se presenta la distribución temporal vs la distribución de la magnitud de coda de los 145 eventos, que incluyen la zona del "área de la costa" y la zona del "área del volcán", se observa que las magnitudes se distribuyen de 1.4 hasta 3.9. En la figura 33 se presenta la distribución temporal vs la distribución de la profundidad, la distribución de las profundidades no son mayores a los 14 km, y finalizando con la figura 34 se exhibe la distribución de la magnitud, tiempo y profundidad en la distribución en el periodo no presenta ninguna tendencia.

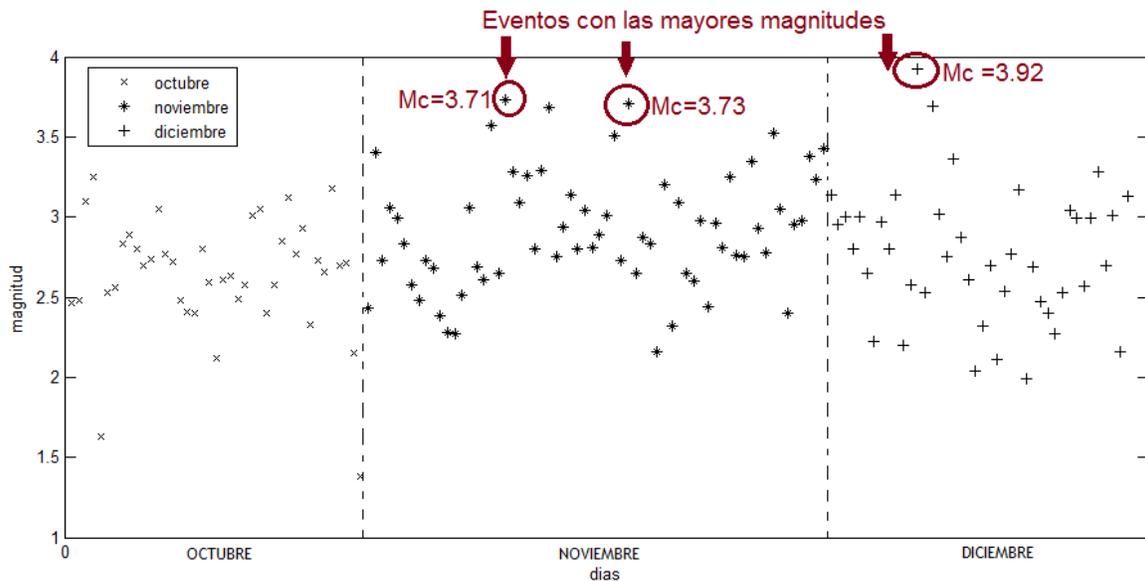


Figura 32. Distribución temporal vs distribución de la profundidad de los 145 eventos marcando los intervalos de las magnitudes en función del tiempo durante octubre a diciembre de 2009, y se muestran los tres eventos de mayor magnitud.

La mayor presencia de eventos de mayor magnitud se da entre el 1 de noviembre y el 1 de diciembre, notando en la figura 33 que el día 2 de diciembre hay una minoría de eventos, recordando que este día fue cuando ocurrió la salida de material. Del 1 octubre al 1 de diciembre ocurrieron la mayor cantidad de eventos, siendo 105 eventos de los 147 y finalizando del 4 al 31 de diciembre ocurrieron solo 42 eventos. Los eventos con mayores magnitudes se presentaron el 14 de noviembre con una

magnitud de  $M_c=3.71$  a una profundidad de 2.22 km, el día 6 de noviembre con una magnitud de  $M_c=3.73$  a una profundidad de 6.02 km y el día 8 de diciembre con una magnitud de  $M_c=3.92$  a una profundidad de 8.37 km, esto se muestra en la figura 32.

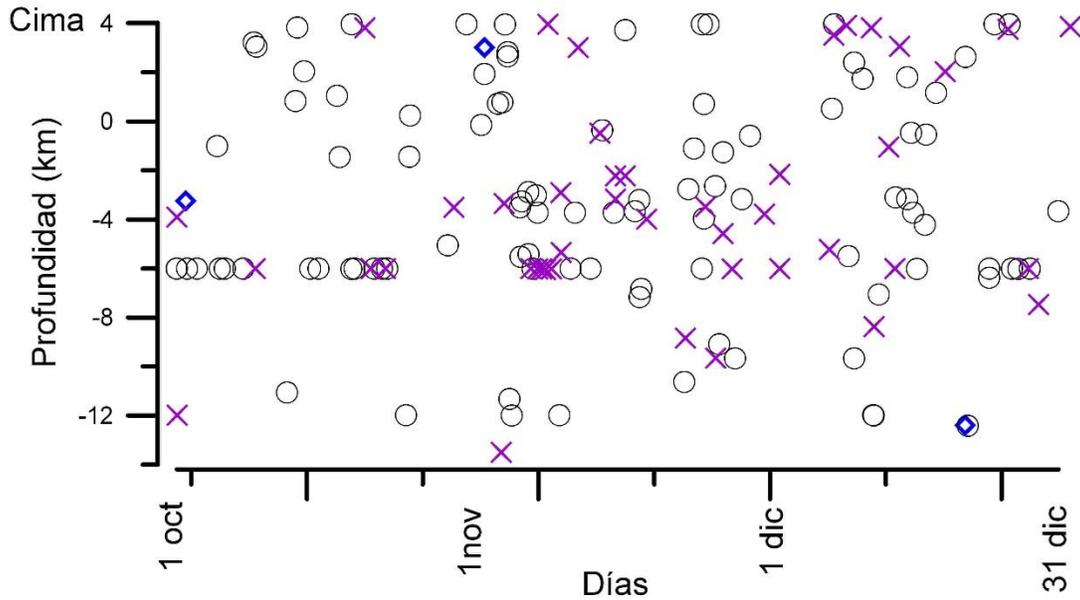


Figura 33. Distribución de la magnitud vs distribución de la profundidad de los 145 eventos marcando los intervalos de las magnitudes en función del tiempo durante octubre a diciembre de 2009.

Dentro del rango de magnitudes  $M_c < 2$  solo tres eventos fueron localizados, observando el mayor evento con magnitud  $M_c = 1.99$  en el mes de diciembre. Para el rango de magnitudes  $2.0 \leq M_c < 3$ , 100 eventos fueron localizados, observando que el mes de noviembre se presentó la mayor cantidad de eventos y en mismo mes el evento con mayor magnitud de  $M_c = 2.99$  se localizó a una elevación de 3.9 km que es sobre la superficie del volcán. Los eventos en rango de magnitudes  $3 \leq M_c$  fueron 44, de estos de nuevo noviembre presenta mayor número de eventos, y el evento de mayor magnitud fue de  $M_c = 3.92$ , con una profundidad de 8.4 km, dicho evento se presentó en el mes de diciembre.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Del análisis de datos sísmicos de la actividad volcánica de Colima que se presentó durante el periodo 1 de octubre al 30 de diciembre del 2009, la mayor concentración de hipocentros de los eventos Tipo A se localizaron en un rango de 10 km, la mayor concentración de profundidades de eventos se encuentran en los primeros 6 km, siendo el 85.7% de los 147 eventos localizados, con magnitudes entre  $1.38 \leq M_c \leq 3.92$ , siendo el evento de mayor magnitud se presentó en el mes de diciembre con una profundidad de 8.4 km.

Como una comparación con los análisis de sismicidad realizados por Zobin en 2003 y Zamora Camacho 2007 se encuentra que las profundidades hipocentrales no son mayores a los 10 km, y siempre obteniendo que la mayor concentración de los eventos se encuentra dentro de un rango de 0 a 10 km profundidad. En nuestro estudio obtenemos el mismo rango de profundidad lo que hace suponer que la mayor concentración de esfuerzos para el fracturamiento de la roca encajonante está en el mismo rango.

Otro resultado importante de nuestro estudio es que antes de la salida de material siempre hay un número mayor de eventos Tipo A, en nuestro caso 91 en octubre y noviembre y 34 eventos en diciembre. Como se observa en las figuras 17 y 18 un mayor número de eventos tipo A antes de la salida de material ocurrida del 1 al 3 de diciembre. En este episodio se mostró una gran salida de material incandescente por la ladera Este, lo que produjo actividad sísmica debajo del edificio volcánico a poca profundidad ocasionado por la intrusión de nuevo material en la formación del domo del cráter.

La distribución de las profundidades de los hipocentros y sus magnitudes puede reflejar el camino de salida del material de un depósito hipotético (cámara magmática) debajo del volcán. Así como debido a la ocurrencia de los eventos para el mes de noviembre, días antes del clímax de la actividad, se encuentran por debajo del edificio volcánico.

Es importante hacer notar que cuando se realiza la corrección por estación los resultados no cambian significativamente y nos dan una buena aproximación de la distribución de esfuerzos bajo el volcán, aún que es importante realizar este ajuste para tener mejor control en profundidad de la ocurrencia de los hipocentros.

### **Recomendaciones**

- Se sugiere realizar estudios para proponer un modelo de velocidades para el área, con el fin tener mejor precisión en las localizaciones de los eventos. Hasta el momento se cuenta con uno hecho por Jiménez (1995), y otro por Reyes Alfaro (2011) que comparados con el que usamos en este estudio, nos arrojan localizaciones diferentes.
- Extender el periodo de análisis sísmico a todo el periodo de registro de RESCO para relacionar los cambios de sismicidad con los periodos eruptivos. Así como continuar con el análisis detallado de la sismicidad para conocer el comportamiento del volcán en los periodos de máxima actividad. Ya que el monitoreo ayuda en la decisión de momento de crisis para la evaluación de próximas ocurrencias de gran actividad.
- Realizar la comparación de señales sísmicas para ver si existen familias de temblores.
- Analizar eventos explosivos de otras periodos de actividad del volcán de Colima para realizar una correlación con su actividad.

- Relacionar la sismicidad con análisis geoquímicos y petrológicos para dar una interpretación más completa.
- La información como historia eruptiva, la geología, tectónica y estudios previos, entre otras, nos facilitan la interpretación sísmica, dado que se puede tomar una decisión oportuna de un episodio en la actividad del volcán. Por ello el continuo análisis en conjunto de la información es de gran importancia.
- Realizar la corrección por la altura de las estaciones de la red o al menos de las que se utilizan en el análisis.

## 5. REFERENCIAS

Arámbula Mendoza R. Clasificación automática de eventos sísmicos volcánicos y análisis de la actividad sísmica reciente en el volcán de Colima. Tesis doctoral. Programa de posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. 2011.

Bretón González M.; Ramírez J. J.; Navarro C. Summary of the historical eruptive activity of Volcán De Colima, México 1519-2000. Elsevier Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117 , 2002, p. 21-46.

Castañeda Bastida E. Análisis de la sismicidad del volcán de Colima y sus etapas eruptivas asociadas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México, 2010.

CENAPRED. Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. México 2001.

Dávila Hernández N. A. Modelo de segmentación de depósitos volcánicos superficiales en el Volcán de Colima, México utilizando imágenes ópticas (Terra/Aster y Spot 5) y de radar de alta resolución (TerraSAR-X). Tesis de Doctorado, Posgrado de ciencias de la Tierra, 2011.

De la Cruz Reyna S. VOLCANES Peligro y Riesgos Volcánico en México. Serie Fascículos. CENAPRED, 2004.

Demant A. Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano, Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Revista, vol.5 núm 2,1982, p. 217-222.

Demant A. Vulcanología y petrografía del sector occidental del eje Neovolcanico. Univ. Nal. Autón. México. Inst. Geología, Revista, vol.3, núm 1,1979, p. 39-57.

Espíndola J.M. Muñoz E. A; Medina F.; De la Cruz Reyna S. Bases geofísicas y geoquímicas de la vigilancia de volcanes activos. Ciencia, 1991, 185 – 205.

Ferrari L. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Instituto de Geología, UNAM. V. LIII, 2000, 84-92.

González Ruiz L. C. Estudio de las réplicas 29 de noviembre al 17 de diciembre de 1978,  $m \geq 3.0$  del temblor de Oaxaca del 29 de noviembre de 1978. Calibración de magnitudes. Tesis de físico, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1980.

Huidobro González A. Análisis de la actividad sísmica relacionada con la erupción del Volcán Popocatepetl, México, en diciembre de 1994. Tesis Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México 2000.

Ibáñez J.M., Carmona E. Sismicidad volcánica. Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, 2000.

Jimenez Z; Reyes G; Espindola J.M. The July 1994 episode of seismic activity at Colima Volcano, Mexico. Journal of volcanology and geothermal research 64, 321-326, 1995.

Lermo J.; Cuenca J., Monfret T., Hernández F.J. y Nava E. Algunas características espectrales de la sismicidad asociada a la actividad del Volcán de Colima. Geofísica Internacional, 1993, Vol. 32, pp. 683-697.

López-Loera H.; Urrutia-Fucugauchi J. y Alva-Valdivia L. Estudios aeromagnético del complejo volcánico de Colima, occidente de México-implicaciones tectónicas y estructurales. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 28, 2011, p. 349-370.

Luhr L. F.; Ian S.E. Carmichael. The Colima Volcanic Complex, Mexico. I. Post-Caldera Andesites From Volcán Colima. Dept. of Geology and Geophysics, University of California, Berkeley, California. Contrib. Mineral. Petrol. 71, 1980.

Macías J. L. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII, num.3, 2005, p379-424.

Mora J. C.; Macías J. L; Saucedo R.; Orlando A.; Manetti P.; Vaselli O. Petrology of the 1998-2000 products of Volcán de Colima, México. ELSEVIER, Journal of Volcanology and Geothermal Research 117, 2002, p. 195-212.

Moreno Jiménez A. E. Estudio del Riesgo Sísmico asociado a la actividad del volcán de Colima, durante el periodo 1 de abril al 30 de septiembre de 1999. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 2008.

McNutt S.R., 1996. Seismic monitoring and Eruption Forecasting of Volcanoes: A review of the State-of-the-Art and Cases Histories. Monitoring and Mitigation of Volcano Hazard, Eds. R. Scarpa and R. Tilling. Springer-Verlag, 1996, Alemania pp. 99-146.

Núñez- Cornú F.; Nava F. A.; De la Cruz-Reyna S.; Jiménez Z.; Valencia C.; García-Arthur R. Seismic activity related to the 1991 eruption of Colima Volcano, Mexico. Bulletin of Volcanology, Springer-Verlag; 1994, 56: 228-237.

Núñez-Cornú F.J.; Reyes-Dávila G.A.; Suárez-Plascencia C.; Rutz López M. Seismicity associated to eruptive events at Colima Volcano, México (1999-2004). IAVCEI General Assembly 2004, Pucón-Chile.

Orozco Rojas J. Análisis cuantitativo de los flujos piroclásticos con datos sismología del Volcán de Colima para el periodo eruptivo 1998 – 1999. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad de Colima. Colima, Febrero 2005.

Ortiz R.; García A.; Astiz M. Instrumentalización en Volcanología. Servicio de publicaciones. Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote. Octubre 2011.

Petrosino S.; Cusano P.; La Rocca M.; Galluzzo D.; Orozco-Rojas J.; Bretón M.; Ibáñez J.; Del Pezzo E. Source location of long period seismicity at Volcán de Colima, México. Bull Volcanol Springer-Verlag; 2011, 73:887-898.

Posadas Chinchilla A. M. Estudios Sismológicos con redes sísmicas locales, Departamento de Física Aplicada, Universidad de Almería, Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos, 1994.

Ramírez-Ruiz J. J.; Santiago-Jiménez H.; Alatorre-Chávez E.; Bretón-González M. EDM deformation monitoring of the 1997-2000 activity at Volcan de Colima. Journal of Volcanology and Geothermal Research 117; 2002, 61-67.

Rodríguez-Elizarrarás S. R. Estratigrafía y estructuras del volcán de Colima, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, México, D.F. Volumen 12, número 1, 1995. P. 22-46.

Rodríguez-Elizarrarás S. R. Consideraciones preliminares sobre riesgos en el Volcán de Colima, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, México D.F. volumen 12, número 1, 1995, p. 47-51.

Tarbut Lutgens E. J., Frederick K. Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física, 8ª edición, PEARSON, Prentice Hall. 2005, Madrid.

United States, Department of the interior Geological survey. National Center for Earthquake Research. HYPO71 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. Menlo Park, California 1975.

Valdez Moreno G. Evolución Geoquímica e isotópica del Complejo de Colima. Tesis Doctoral. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, 2006.

W. H. K. Lee and S. W. Stewart, Principles and applications of microearthquake networks, Office of earthquake studies U.S. Geological Survey Menlo Park, California, 1981, ACADEMIC PRESS.

Zamora Camacho A. Presencia de familias de temblores en la sismicidad asociada a la erupción del 21 de noviembre de 1998 del Volcán de Colima y su relación con el proceso eruptivo. Tesis Maestría. Posgrado de Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.

Zamora Camacho A., Espindola J.M., Reyes Dávila G. The 1997-1998 Activity of Volcán de Colima, Western México. Some Aspects of the Associates Seismic Activity. Pure appl geophys, 164; 2007, 39-52.

Zobin V. M.; Luhr J.F.; Taran Y. A.; Varley N.R.; González M.; Orozco J.; Reyes G. A; Navarro C., Bretón M. Monitoring the 2004 andesitic block-lava extrusion at Volcán de Colima, México from seismic activity and SO<sub>2</sub> emission. Elsevier. Journal of Volcanology and Geothermal Research 177; 2008, 367-377.

Zobin V. M.; Luhr J.F.; Taran Y. A.; Bretón M.; Cortés A.; De la Cruz-Reyna S; Dominguez T.; Galindo I; Gavilanes J. C.; Muñíz J.J.; Navarro C.; Ramírez J. J.; Reyes G. A.; Ursúa M.; Velasco J.; Alatorre E.; Santiago H. Overview of the 1997-2000 activity of Volcán de Colima, México. Elsevier, Journal Volcanology and Geothermal Research. 117; 2002, 1-19.

Zobin V. M. Introduction to Volcanic Seismology. Observatorio Vulcanológico, Colima, México. ELSEIVER, 2003.

Zuñiga Dávila F. R., Madrid. Notas Introductorias, Sismología. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias. UNAM, Campus Juriquilla, febrero 2011.

[www.volcanodiscovery.com/colima.html](http://www.volcanodiscovery.com/colima.html)

## 6. ANEXO

Parámetros hipocentrales obtenidos mediante HYPOCENTER; Tiempo de Origen, las coordenadas epicentrales (LAT N, LONG W), profundidad focal (PROF), magnitud de coda (Mc) y los errores de origen (RMS) y los errores de las coordenadas hipocentrales (ERH, ERZ).

TIEMPO DE ORIGEN	LAT N	LONG W	PROF	Mc	RMS	ERH	ERZ
91001 116 14.22	19.479	-103.636	6.06	2.46	1.39	5.1	1.6
91001 149 54.17	19.548	-103.642	6.06	2.48	1.05	1.7	0.6
91001 149 54.94	19.584	-103.556	3.97	3.1	1.78	1	0.8
91001 212 9.01	19.207	-103.688	12.05	3.25	2.34	2.3	2.4
91002 225 33.21	19.541	-103.671	6.06	2.53	0.9	2.6	2.3
91003 150 13.43	19.553	-103.594	6.06	2.56	0.82	5.7	2.8
91005 155 28.70	19.486	-103.62	1.07	2.83	0.33	1.1	1.2
91005 841 37.53	19.477	-103.622	6.06	2.89	0.74	4.2	1.4
91005 2035 42.63	19.559	-103.625	6.07	2.8	0.97	3	2.5
91007 17 7 .33	19.54	-103.676	6.07	2.7	1.14	2.7	2.3
91008 442 10.51	19.473	-103.614	6.1	2.59	1.08	5.5	4
91008 18 9 47.48	19.515	-103.632	-3.15	2.74	0.48	1.3	1.8
91008 2151 11.18	19.548	-103.611	6.06	3.05	0.71	3.6	2.7
91009 025 11.03	18.946	-103.836	-2.98	2.77	3.26	5.6	3.2
91009 2142 17.74	19.537	-103.598	6.1	2.56	1.15	3.4	2
91012 147 47.43	19.276	-103.669	6.1	2.72	2.34	4.7	3.2
91012 2221 25.63	19.512	-103.612	-0.76	2.48	0.28	0.1	0.1
91013 244 11.31	19.516	-103.62	-3.76	2.41	0.23	0.5	5.2
91013 1855 12.63	19.522	-103.619	-1.97	2.4	0.05	0.2	0.2
91014 942 13.04	19.527	-103.611	6.06	2.8	0.84	4.6	4.6
91015 535 37.86	19.53	-103.63	6.06	2.59	0.88	4	2.5
91017 152 6.86	19.533	-103.61	-0.98	2.12	0.14	0.5	0.6
91017 814 58.10	19.506	-103.626	1.52	2.61	0.83	2.4	3.3
91018 1222 29.71	19.507	-103.622	6.08	2.63	0.64	3.2	3.5
91018 1320 .04	19.512	-103.583	-3.9	2.49	0.62	2.1	0
91018 2028 7.17	19.539	-103.617	6.06	2.58	1	3.2	2.8
91019 2052 52.59	19.523	-103.629	-3.75	3.01	2.5	2.8	3.4
91020 1148 59.32	19.519	-103.688	6.06	3.05	0.82	5.4	3.9
91020 1929 13.64	19.462	-103.615	6.06	2.4	0.86	2.4	0.8
91020 1930 15.86	19.524	-103.609	6.06	2.58	0.34	1.8	1.6

91021 1334 27.66	19.497	-103.643	6.07	2.85	0.76	5.1	4.3
91021 2213 45.14	19.543	-103.619	6.06	3.12	1.56	2.2	1.5
91022 224 14.17	19.552	-103.602	6.06	2.77	1.5	4.1	2.9
91023 2328 56.61	19.063	-104.248	6.1	2.93	3.14	5	4
91024 731 13.37	19.494	-103.582	1.5	2.33	0.95	4.2	3.7
91024 943 28.13	19.515	-103.628	-0.18	2.73	0.29	0.4	0.5
91028 18 9 49.65	19.5	-103.616	3.57	3.18	0.51	0.9	0.7
91031 1210 37.84	19.507	-103.635	0.21	2.71	0.16	0.4	0.6
91031 1928 28.27	19.511	-103.619	-1.87	2.15	0.14	0.5	0.7
91031 1928 28.45	19.508	-103.622	-2.95	1.38	0.2	0.7	2.2
91102 420 46.52	19.501	-103.617	-0.66	2.43	0.3	1	1.5
91102 12 2 5.87	19.126	-104.149	13.56	3.4	3.06	1.2	3.3
91102 15 4 3.91	19.501	-103.613	-0.71	2.73	0.26	0.7	1.1
91102 1851 26.27	19.544	-103.538	3.41	3.06	1.42	4.1	3
91102 2126 18.07	19.523	-103.63	-3.88	2.99	1.17	1.5	1.5
91103 318 22.62	19.514	-103.621	-2.59	2.83	0.38	0.7	1.1
91103 318 22.67	19.515	-103.619	-2.75	2.58	0.28	0.5	0.9
91103 8 3 50.30	19.117	-104.168	11.39	2.48	3.01	0.2	0.7
91103 1340 9.85	19.086	-104.311	6.1	2.94	3.04	4.3	2.9
91103 1445 11.71	19.445	-103.632	6.1	3.22	0.82	2.1	0.7
91104 848 1.62	19.551	-103.512	3.57	2.68	2.16	2.7	1.3
91104 1027 18.25	19.415	-103.789	5.58	2.38	1.39	3.6	3.8
91104 1334 7.16	19.54	-103.586	3.33	2.28	0.41	0.7	0.5
91105 510 49.14	19.509	-103.593	2.95	2.27	0.57	0.8	0.8
91105 512 10.15	19.469	-103.631	5.48	2.51	0.38	2.4	0.9
91105 11 9 42.98	19.442	-103.653	6.06	3.06	1.52	5.3	1.8
91105 1517 33.85	19.442	-103.654	6.06	2.69	2.21	3.7	1.4
91105 2327 49.26	19.465	-103.668	3.08	2.61	1.71	2.8	0.7
91106 3 4 31.94	19.487	-103.617	6.08	3.57	0.56	3.9	3.2
91106 1330 11.16	19.48	-103.6	6.08	3.73	0.27	1.3	0.7
91106 2218 28.82	19.508	-103.66	6.1	3.28	1.06	5	5
91107 1229 37.74	19.505	-103.566	6.08	3.26	5.16	3.5	1.8
91108 1115 42.58	19.523	-103.595	2.97	3.29	0.19	0.2	0.2
91109 1042 48.54	19.533	-103.577	6.06	2.75	2.03	5.8	3.9
91109 21 6 1.91	19.538	-103.597	3.78	2.94	0.96	4.3	4.9
91110 423 14.93	18.946	-103.854	-2.95	3.14	2.61	4.4	2.6
91111 1013 24.56	19.493	-103.61	6.07	2.8	0.65	3.4	3.3
91112 849 .49	19.518	-103.608	0.54	3.04	0.14	0.4	0.6

91112 1443 51.77	19.508	-103.596	0.42	2.81	0.46	1.4	1.9
91113 18 9 38.94	19.538	-103.564	3.78	2.89	0.9	4.3	4.2
91113 2215 18.26	19.504	-103.601	3.23	3.01	0.46	0.9	0.6
91113 2219 16.95	19.478	-103.611	2.29	3.51	0.49	1.5	1.5
91114 2137 27.03	19.518	-103.635	-3.65	2.73	0.88	0.7	2.5
91114 2138 49.74	19.52	-103.587	2.28	3.71	0.52	2.2	1.9
91115 2045 36.21	19.514	-103.567	3.73	2.65	0.25	1.5	1.1
91116 732 20.56	19.516	-103.589	3.27	2.87	1.37	3.3	2.9
91116 756 3.42	19.446	-103.666	7.23	2.83	0.48	3.4	2.7
91116 12 8 9.60	19.489	-103.756	6.89	2.16	1.59	1.1	2.1
91117 1 7 14.01	19.495	-103.62	4.05	3.2	0.33	1.4	1
91120 1855 45.54	19.234	-103.805	10.69	2.32	2.98	0.2	0.2
91120 2146 36.85	19.217	-103.666	8.9	3.09	3.05	3	1.7
91121 457 26.44	19.511	-103.594	2.83	2.65	0.93	1.4	1.6
91121 1848 48.44	19.55	-103.599	1.17	2.6	0.43	1.3	1
91122 1313 37.25	19.436	-103.646	-3.9	2.98	0.81	1.8	0
91122 1336 57.67	19.489	-103.607	6.07	2.44	0.63	3.6	3.3
91122 1827 9.41	19.538	-103.531	-0.64	2.96	0.85	3.5	1.7
91122 1839 11.86	19.486	-103.612	4.02	2.81	0.41	1.8	1.3
91122 22 2 52.24	19.488	-103.55	3.54	3.25	1.57	4.1	0.9
91123 532 7.79	19.5	-103.633	-3.9	2.76	1.56	1.7	0
91123 7 1 36.90	19.2	-104.08	6.1	2.45	2.76	2.1	1.5
91123 2115 12.01	19.512	-103.625	2.7	2.75	0.31	1	1.3
91123 2249 35.11	19.115	-104.063	9.72	3.35	5.82	0.6	0.6
91124 651 3.82	19.29	-103.522	9.16	2.93	2.18	4.9	2.4
91124 16 2 53.18	19.522	-103.622	1.33	2.78	0.36	1	0.8
91124 16 9 39.15	19.479	-103.599	4.64	3.52	0.83	1	0.7
91125 14 1 44.38	19.498	-103.551	6.08	3.05	0.95	5.5	4
91125 21 8 57.75	19.083	-103.887	9.73	2.4	2.09	0.5	0.6
91126 1335 43.66	19.489	-103.592	3.23	2.95	0.86	3.6	1.8
91127 910 17.29	19.519	-103.562	0.65	2.98	0.97	4.5	5.3
91128 1951 45.22	19.544	-103.647	3.85	3.38	0.43	1.1	0.7
91130 8 1 6.12	19.536	-103.675	2.23	3.23	0.65	0.5	0.7
91130 8 8 46.22	19.478	-103.7	6.07	3.43	0.26	2.1	1.9
91204 713 2.56	19.382	-103.682	5.28	3.14	1.93	5.5	3
91204 1337 45.20	19.513	-103.546	-0.45	2.95	0.3	0.7	0.9
91204 1748 54.90	19.519	-103.547	-3.45	3	0.86	1.7	3.6
91204 19 4 14.18	19.53	-103.528	-3.9	2.8	0.44	1	0

91206 024 46.00	19.523	-103.548	-3.85	3	1.31	1.2	1.3
91206 524 1.12	19.507	-103.55	5.56	2.65	0.66	1.4	1.3
91206 1830 51.03	19.052	-104.126	9.73	2.22	2.55	2.1	5.1
91206 1843 26.56	19.502	-103.547	-2.34	2.97	0.21	0.4	1.5
91207 1510 34.10	19.525	-103.542	-1.68	2.8	0.22	0.5	0.5
91208 1236 40.24	19.518	-103.543	-3.75	3.14	1.27	0.2	1.6
91208 18 4 1.36	19.216	-103.744	12.06	2.58	3.39	2.7	4.2
91208 1824 16.01	19.088	-103.855	8.43	3.92	2.35	0.7	0.6
91209 558 11.70	19.48	-103.598	7.12	2.53	1.22	4.7	5
91210 550 1.21	19.501	-103.524	1.11	3.69	0.29	1	1.1
91210 2056 8.58	19.511	-103.529	6.07	3.02	1.59	3.7	2.8
91210 2211 9.35	19.468	-103.557	3.16	2.75	2.28	3.3	1.2
91211 812 5.38	19.543	-103.53	6.1	3.37	1.2	5.5	4.2
91212 225 39.89	19.479	-103.542	6.1	3.65	1.14	5.2	4.9
91212 228 59.78	19.496	-103.558	-1.73	2.87	0.23	1.9	1.6
91212 238 55.03	19.508	-103.525	3.23	2.61	2.84	3.9	2.5
91212 11 8 42.20	19.454	-103.661	0.53	2.04	1.27	1.6	2.1
91212 1631 58.24	19.499	-103.632	3.78	2.32	1.55	0.9	1.1
91213 119 43.77	19.489	-103.544	6.08	2.7	0.93	1.3	0.5
91213 2032 18.61	19.474	-103.61	4.28	2.11	1.34	5.2	3.9
91213 2319 15.92	19.509	-103.528	0.61	2.54	0.34	1.2	1.3
91214 2329 2.86	19.514	-103.555	-1.1	2.77	0.21	0.5	0.6
91215 2121 10.85	19.516	-103.539	-1.96	3.17	0.23	0.3	0.3
91217 2113 47.97	19.096	-104.142	12.46	1.99	3.17	1.3	3.8
91217 2156 1.25	19.422	-103.525	-2.56	2.69	2.14	1	1.8
91218 333 42.13	19.075	-104.105	12.48	2.47	2.87	1.7	3.1
91220 649 20.37	19.46	-103.656	6.44	2.4	1.61	0.9	1.7
91220 657 51.79	19.557	-103.536	6.07	2.27	1.11	2.4	2
91220 1922 .62	19.505	-103.553	-3.9	2.53	0.43	0.5	0
91222 4 3 20.05	19.492	-103.544	-3.69	3.04	0.67	0.3	5
91222 722 3.14	19.505	-103.545	-3.9	2.99	0.44	0.6	0
91222 13 6 8.45	19.541	-103.552	6.06	2.57	1.06	4	2.6
91223 5 8 1.17	19.501	-103.571	6.08	2.99	1.1	4.6	3.4
91224 439 46.69	19.541	-103.545	6.06	3.28	1.06	2.3	1.2
91224 8 8 11.16	19.534	-103.539	6.06	2.7	0.9	3.6	2.1
91225 541 25.29	19.438	-103.599	7.53	3.01	1.07	4.4	4
91227 451 25.10	18.988	-103.722	3.73	2.16	2.24	2.9	2.2
91228 928 47.73	19.491	-103.53	-3.8	3.13	0.48	0.3	5