



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIACIONES DE LA SISMICIDAD Y LA  
ACTIVIDAD DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**P R E S E N T A:**

**MARÍA GUADALUPE HERNÁNDEZ BELLO**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. DAVID A. NOVELO CASANOVA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2016**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mis padres y a mi hermana*

## AGRADECIMIENTOS.

Al Dr. David A. Novelo Casanova por la paciencia para el desarrollo de este trabajo, sus observaciones y por todo el apoyo que me ha ofrecido a lo largo del tiempo.

A mi padre Mario y a mi madre Alejandra, por todo el apoyo que siempre me han brindado y por siempre estar pendiente de mí, por motivarme a cumplir mis metas y siempre estar a mi lado. A Mariana por su incondicional apoyo, por sus enseñanzas y lecciones.

A mis tíos y primos por su apoyo incondicional y por siempre estar a mi lado.

A Marisol, Alfredo y Héctmar por estos años de increíble amistad y apoyo en todo momento.

Al equipo Terramóvil, principalmente a Ana Cecilia por su apoyo, por sus maravillosos consejos y su paciencia.

Al Dr. Ramón Zúñiga por su paciencia y su gran apoyo al enseñarme el uso del software ZMAP.

Al CENAPRED por los datos que me proporcionaron para el desarrollo de esta tesis.

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM (Proyecto No. IN118614) por el apoyo recibido para el desarrollo de esta tesis.

## ÍNDICE

<b>Introducción</b>	<b>6</b>
<b>Objetivos</b>	<b>9</b>
General	9
Específicos	9
<b>Capítulo 1 Marco Geológico del Volcán Popocatepetl</b>	<b>10</b>
1.1 Tectónica de Placas	10
1.1.2 Faja Volcánica Transmexicana	11
1.2 Localización	12
1.2.1 Geología	13
1.2.2 Historia Eruptiva	15
1.3 Monitoreo Volcánico.	19
1.3.1 Red Sísmica del Volcán Popocatepetl.	21
<b>Capítulo 2 Sismicidad Volcánica</b>	<b>23</b>
2.1 Clasificación de las señales volcánicas	24
2.2 Eventos Vulcano-Tectónicos (VT)	25
2.3 Eventos de Baja Frecuencia (LP)	27
2.4 Eventos híbridos	28
2.5 Explosiones	29
2.6 Tremor volcánico	31
2.7 Eventos de periodo muy largo (VLP)	33
2.8 Eventos superficiales	33
2.9 Modelos de fuente	34
2.10 Modelo para VT's	35
2.11 Modelos de fuente de eventos L.P.	35
2.12 Modelos de fuente de los eventos híbridos	36

2.13 Modelos de fuente para los tremores volcánicos	36
<b>Capítulo 3 Metodología</b>	<b>37</b>
3.1 Catálogo Sísmico.	37
3.2 Número de sismos y acumulado	38
3.3 El valor de $b$	38
3.4 Variaciones temporales del valor $b$	39
3.5 Aplicaciones del valor $b$ para el caso de erupciones volcánicas	41
3.6 El Método de Máxima Verosimilitud	42
3.7 El software ZMAP	45
3.8 Variaciones temporales de la energía sísmica liberada en base a la magnitud	46
3.9 Variaciones de la profundidad de los eventos registrados	47
3.10 Correlación de los parámetros sísmicos con la actividad volcánica	48
3.11 t- test	48
<b>Capítulo 4 Resultados y Discusión: Correlación de los parámetros sísmicos con la actividad volcánica</b>	<b>49</b>
<b>Capítulo 5 Conclusiones</b>	<b>96</b>
<b>Referencias</b>	<b>123</b>

## Introducción.

El Popocatepetl es un estratovolcán de composición andesítica- dacítica cuya elevación de 5450 m.s.n.m, la segunda montaña más alta del país, después del Pico de Orizaba. Se encuentra ubicado en la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana y forma parte del extremo sur de Sierra Nevada compuesta por los volcanes Tláloc, Telapón, Teyotl e Iztaccíhuatl (Mooser, 1972). Debido a la cercanía a poblaciones con alta densidad de población en los estados de México, Puebla, Morelos y la Ciudad de México, el Popocatepetl representa un riesgo geológico para millones de personas que habitan en estas zonas.

Estudios geológicos han demostrado que el Popocatepetl ha tenido a lo largo de su historia eruptiva, algunos episodios de gran actividad y otros de menor actividad. La última etapa eruptiva fue de 1920 a 1927, generando el crecimiento de domos de lava dentro del cráter, así como explosiones de ceniza (Waitz, 1921). Después de un período de quietud de 67 años, el volcán inició una nueva fase de actividad con gases y ceniza el 21 de Diciembre de 1994. A partir del año 1993 había presentado actividad de tipo fumarólica y sísmica. in embargo, en 1994 comenzó a tener un incremento en esta actividad y, finalmente, el 21 de Diciembre a las 1:30 am, se presentó una explosión freatomagmática que abrió el conducto principal del cráter y permitió la salida de columnas de cenizas, vapor de agua y otros gases de hasta 3 km de altura, causando la evacuación de aproximadamente 50,000 personas en el estado de Puebla (Siebe y Macías, 2004). Esta actividad continuó hasta fines de marzo de 1995, cuando la actividad sísmica, acompañada de la salida de ceniza, comenzó a decrecer. Arciniega-Ceballos et al. (2003), mencionan que durante este periodo se presentó un tremor sostenido que fue disminuyendo a episodios separados tipo LP. Un año después, el 5 de marzo de 1996, el volcán volvió a presentar actividad y para finales de mes se había formado un nuevo domo. Durante un mes se acumuló lava que llenó el cráter hasta una profundidad de 50 m, y el 30 de abril del mismo año se presentó una explosión vulcaniana que arrojó bloques del orden de metros fuera del cráter, cobrando la vida de cinco alpinistas (Siebe y Macías, 2004).

Las erupciones volcánicas forman parte de los fenómenos naturales que pueden representar un efecto dañino a la población. Anualmente muchos volcanes alrededor del mundo entran en fase

eruptiva, por esta razón varios países han instalado sistemas de monitoreo para vigilar su actividad. Cada año entran en actividad entre 50 y 65 volcanes (Simkin, 1993).

En la actualidad existe una serie de parámetros que pueden ser medidos, registrados y analizados con el fin de entender e incluso modelar la dinámica de los procesos que sufre determinado sistema volcánico (Araña y Ortiz, 1984). En el caso de los volcanes activos o en fase de reactivación, la identificación y justa consideración de estos parámetros resulta de gran importancia cuando se trata de caracterizar y predecir los fenómenos eruptivos- explosivos que podrían acontecer en el futuro.

Para estudiar y analizar las posibles evidencias de la ocurrencia de un fenómeno de tipo efusivo o explosivo en un volcán, es necesario utilizar herramientas que permitan combinar los distintos tipos de información disponibles con el fin de llegar a un resultado global que permita establecer un nivel de alerta y con ello estimar el riesgo volcánico en una zona (Aspinall et al., 2002). Una de estas herramientas consiste en el análisis de la sismicidad volcánica asociada a fenómenos eruptivos con el potencial de generar daños en las comunidades aledañas al volcán.

El análisis de la sismicidad volcánica nos proporciona importante información sobre la dinámica interna del volcán. En un ambiente volcánico la sismicidad es atribuida principalmente a un cuerpo de magma el cual induce esfuerzos en las rocas que los rodean. El monitoreo permanente de un volcán permite detectar el inicio y la evolución de una erupción debido a que en la mayoría de los casos son precedidas por diferentes cambios geofísicos y geoquímicos, que en ocasiones han permitido pronosticar erupciones a corto plazo.

Debido al notorio incremento de la actividad fumarólica del Popocatepetl, a finales de 1994, se iniciaron estudios vulcanológicos y sismológicos encaminados a determinar con mayor exactitud el comportamiento eruptivo del volcán. A partir de entonces se instaló la Red Sísmica del Volcán Popocatepetl, que en un principio estuvo constituida por 11 estaciones telemétricas dependientes del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) así como de los Institutos de Geofísica y de Ingeniería de la UNAM.

El objetivo del presente trabajo es utilizar el catálogo de los eventos vulcano-tectónicos registrados de enero de 1995 a diciembre del 2014, para determinar las variaciones temporales del valor  $b$ ,



número de sismos, energía sísmica liberada y la profundidad y correlacionarlos con los eventos eruptivos más destacados que han ocurrido en el volcán Popocatepetl.

En el Capítulo 1 se describen las características generales del volcán Popocatepetl, geología, ubicación, historia eruptiva. En el Capítulo 2 se hace referencia a la sismología volcánica, a los tipos de señales sísmicas y como están relacionadas a ciertos de procesos volcánicos.

En el Capítulo 3 se describe la metodología utilizada para analizar las variaciones temporales del valor de  $b$  durante el período de enero de 1995 a diciembre del 2014. El valor de  $b$  se obtiene a partir del software Zmap (Wiemer & Zuniga, 1994). También se describen los procedimientos para obtener el número de sismos en sus diferentes intervalos (días, meses, años) y por último, el método para calcular la energía sísmica.

En el Capítulo 4 se presentan y discuten los resultados obtenidos en lo que respecta al valor  $b$ , energía acumulada (día, mes y año), número de sismos (día, mes y año), haciendo una correlación de estos resultados y la actividad eruptiva del volcán en los últimos 19 años (1995-2014) desde su reactivación.

Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

# Objetivos

## General

Analizar las variaciones temporales de diferentes parámetros de la actividad sísmica relacionada con la reactivación del volcán Popocatepetl en el período comprendido de 1995 hasta 2014, y correlacionarla con la actividad volcánica durante el mismo período.

## Específicos

Analizar las variaciones temporales de los siguientes parámetros sísmicos (1995-2014) y asociarlos con la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl:

1. Número de sismos por día, semana, mes y año.
2. Energía sísmica liberada diariamente, semanalmente, mensualmente y anualmente.
3. Valor  $b$
4. Profundidad de los eventos registrados.

Los datos para estimar el valor  $b$  fueron procesados utilizando el software Zmap (Wiemer & Zuniga, 1994). Para la estimación de los otros parámetros se utilizó el programa Excel (Microsoft, 2014).

# Capítulo 1: Marco Geológico del Volcán Popocatepetl

## 1.1 Tectónica de Placas

Nuestro planeta Tierra está conformado por diferentes capas, cada capa presenta características que nos ayudan a distinguirla de otra, se pueden separar dependiendo de su composición química, propiedades físicas, entre otras. Las capas más someras de nuestro planeta se dividen en litósfera y astenósfera. La litosfera es una capa relativamente rígida y fría, por debajo de esta se ubica una capa la cual se denomina astenósfera, esta es una capa de carácter blando debido a las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentra sometida, al presentar la litósfera estas características se dice que esta capa se encuentra “flotando” sobre la astenósfera.

La litósfera al ser una capa rígida no puede adaptarse a la forma geode de nuestro planeta, por esta razón se encuentra dividida en bloques a los cuales se les denominan placas, cada una de estas placas posee un movimiento independiente respecto a las otras (Figura 1). Al contexto de la dinámica de las placas tectónicas, se le conoce como la Teoría de la Tectónica de Placas, la cual fue propuesta inicialmente por el meteorólogo Alfred Wegener en el año de 1912, sin embargo la iniciativa de Wegener fue rechazada en esos momentos.

Después de varios años Arthur Holmes propuso la hipótesis de la convección del manto y a partir de los años 50's las ideas de Wegener ganaron rápida aceptación gracias al desarrollo de las modernas técnicas de exploración geofísica, en particular el descubrimiento de la expansión del piso oceánico. La idea de Wegener retomada y aceptada en los años 60's y actualmente conocida como la teoría de la deriva continental se encuentra totalmente consolidada.

Algo que cabe destacar de esta teoría, es la parte en que establece que los procesos de origen magmático y volcánico tienen origen principalmente en los límites convergentes y divergentes entre las placas tectónicas, ya que en esos lugares existen debilidades en la corteza los cuales permiten el ascenso de material del interior de la Tierra. Sin embargo, existe actividad volcánica fuera de estos límites y un claro ejemplo son los llamados puntos calientes, los cuales se consideran como anomalías térmicas dentro de la corteza terrestre.



Figura. 1. Localización de las placas tectónicas y la principal actividad volcánica en el mundo.( [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov) )

### 1.1.2 Faja volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), es una provincia geológica la cual está constituida por un arco magmático continental, que se desarrolla sobre la margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco (Ferrari, 2000) (Figura 2). Dentro de la FVTM existen aproximadamente 8000 estructuras volcánicas. Se extiende desde las costas del Pacífico, en San Blás, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Demant, 1978).

La FVTM cubre aproximadamente 1000 km de longitud y una amplitud irregular entre los 80 y 230 km. Se distribuye con una dirección preferencial E-W en su parte central y oriental, WNW-ESE en su parte occidental, formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Gómez- Tuena et al., 2005).

La FVTM se divide en tres sectores o porciones con base en su geología y tectónica (Demant, 1978; Pasquaré et al., 1988) (Figura 2): una porción occidental entre la costa del Golfo de California y la junta triple de los rifts de Zacoalco, Chapala y Colima (Allan, 1986). Una porción central comprendida entre dicha estructura y el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez et al., 2002a); y una porción oriental entre este sistema y la costa del Golfo de México (Fig 2).

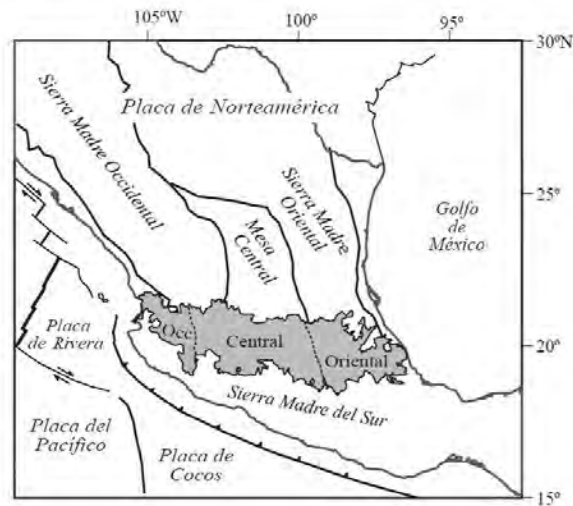


Figura 2. Ubicación y división de la FVTM en sus secciones Occidental, Central y Oriental (color gris) (Gómez-Tuena, et al., 2005). En la parte inferior izquierda entre México y la placa de Cocos se puede apreciar una curva con triángulos, la cual nos indica que en esta zona la placa de Cocos está siendo subducida por la placa de Norteamérica (la dirección de los triángulos nos indica que porción es la que está siendo subducida).

## 1.2 Ubicación

El volcán Popocatepetl forma parte de una alineación volcánica perteneciente al magmatismo Plio-Cuaternario. A esta alineación se le conoce hoy en día como Sierra Nevada. Es un estrato volcán de composición andesítica-dacítica el cual cubre un área de 500 km<sup>2</sup> y cuya elevación es de 5450 m.s.n.m, por esta razón se considera el segundo volcán más alto de México (Figura 3). El volcán se localiza en las coordenadas 19° 02' N, 98° 62' W (considerando la cima del volcán). Se encuentra a 65km de la ciudad de México y a 45 km de distancia de Puebla (Martin-Del Pozzo et al., 2002). Su cráter presenta forma elíptica con un semieje mayor de 800m y un menor de 600m. En el interior del cráter se tienen paredes de aproximadamente 250m de profundidad (Boudal y Robin 1987).

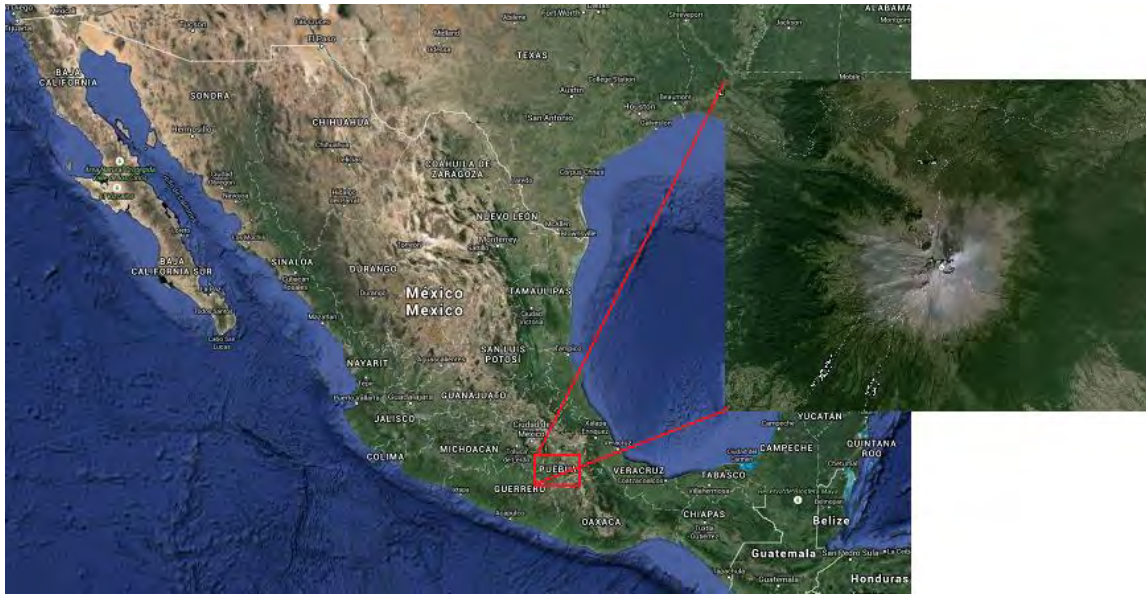


Figura 3: Localización del volcán Popocatépetl (ubicación tomada con <https://earth.google.es>, 2015).

## 1.2. 1 Geología

El Popocatépetl es un estratovolcán de edad Plio-Cuaternaria que se emplaza sobre un basamento de rocas metamórficas paleozoicas y sedimentarias del Cretácico (Macías, 2005; Espinasa-Pereña y Martín-Del Pozo, 2006).

El volcán Popocatépetl no siempre tuvo la forma que ahora conocemos, el edificio volcánico actual es resultado del crecimiento y derrumbe de edificios volcánicos antiguos sobre los cuales finalmente se desarrolló el Popocatépetl.

Nexpayantla fue el nombre con el que se denominó al primer volcán que se desarrolló dentro del área en la que actualmente se encuentra el Popocatépetl, se considera como el volcán base de la estructura actual del Popocatépetl. Espinasa-Pereña & Del Pozzo (2006), consideran que el volcán Nexpayantla tuvo un crecimiento debido al emplazamiento de muchos flujos de lava andesíticos-dacíticos y grandes domos dacíticos. Robin y Boudal (1987) determinaron que este volcán fue destruido por una erupción tipo Bezymianni (o tipo Monte Santa Helena). Existió un segundo

volcán el cual se denomina Ventorrillo, este se formó con los restos del volcán Nexpayantla mezclado con de flujos de lava andesíticos-dacíticos, los cuales sepultaron los restos del volcán Nezpayantla (Espinasa-Pereña & Martín del Pozzo, 2006). El Ventorrillo fue destruido por una erupción de tipo Bezymianny (Siebe et al., 1995).

Lo que conocemos actualmente como el volcán Popocatépetl, fue construyéndose por varias etapas de actividad efusiva y explosiva (Siebe & Macías, 2004). Siebe y Macías (2004) y Macías (2005) resumieron la historia geológica del Popocatépetl en una columna estratigráfica ( Figura 4 ). Uno de los depósitos más característicos del Popocatépetl es una capa de pómez la cual Siebe y Macías (2004), llamaron "tutti-fruti". Esta unidad originalmente fue denominada Pómez con Andesita por Mooser (Espinasa-Pereña & Martin del Pozzo, 2006).Esta capa de pómez fue generada debido a una erupción freatopliniana que ocurrió aproximadamente 14, 000 AP. Esta erupción que concluyo con una columna pliniana que fue dispersada.

Durante años posteriores la actividad del Popocatépetl se caracterizó por erupciones de tipo hidromagmático con columnas plinianas las que llegaron a tener alturas hasta de 25 km, (Macías,2005). Incluso, durante la última erupción (823 d. C.), varios establecimientos prehispánicos, incluyendo Cholula, Xochitécatl y Cacaxtla, fueron inundados por lahares (Siebe et al., 1996). Después de este periodo, el volcán no ha tenido actividad tan intensa como en años anteriores. Se tienen registros históricos los cuales han sido analizados y compilados por De la Cruz-Reyna et al. (1995), en los cuales se han podido determinar que han ocurrido 13 erupciones pequeñas y 3 moderadas en los últimos 500 años.

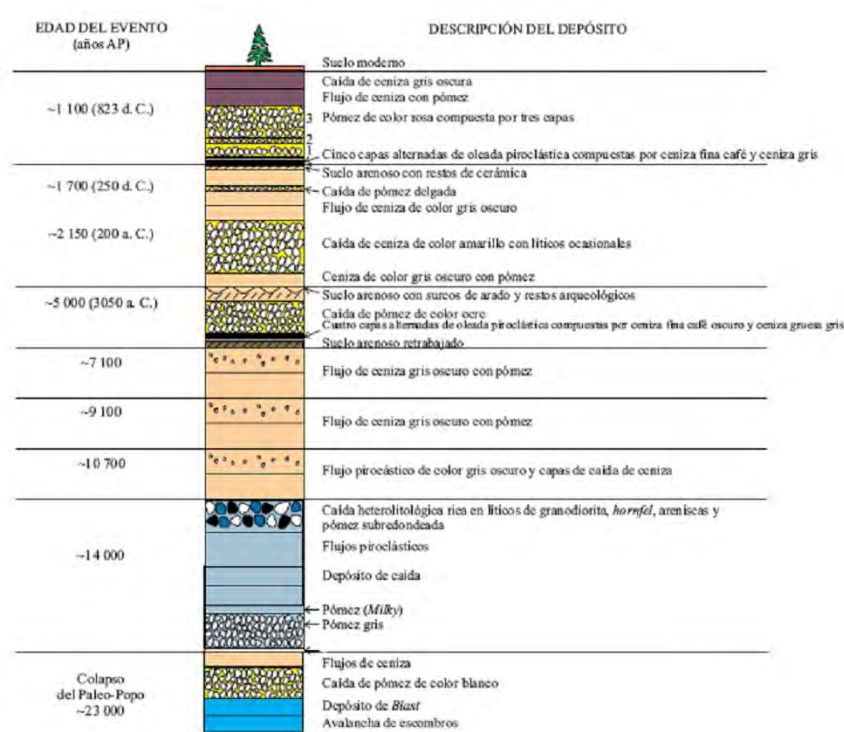


Figura 4 : Se observan los diferentes tipos de depósitos que se fueron acumulando a lo largo de la construcción de los que conocemos actualmente como el volcán Popocatepetl. Del lado izquierdo tenemos la edad del evento y del lado derecho tenemos la descripción del tipo de depósito que dejó como resultado la erupción. (La imagen fue tomada de Siebe et al , 1995; Siebe & Macías, 2004)

### 1.2.2 Historia Eruptiva

La historia eruptiva del Popocatepetl durante los últimos 6,000 años está caracterizada por erupciones plinianas voluminosas recurrentes cada 1000-3000 años (Siebe y Macías, 2004). Las tres erupciones plinianas principales ocurrieron aproximadamente en los años 3050 a. C., 200 a. C. y 823 d. C. (Figura 4; Siebe et al., 1996; Siebe y Macías, 2004). El Popocatepetl ha tenido etapas de gran actividad. En la Tabla 1 se desglosan los eventos más importantes documentados.

Tabla 1- Historia eruptiva del Volcán Popocatepetl ([www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)) .



AÑO	TIPO DE ACTIVIDAD
23,000 <sup>a</sup>	Gran erupción tipo Sta. Helena destruye el edificio volcánico previo
14,000 <sup>a</sup>	Gran erupción pliniana produce lluvias de cenizas y pómez sobre el valle de México
14,000-5,000 <sup>a</sup>	Ocurren varias erupciones menores y al menos cuatro grandes erupciones
3,000 <sup>a</sup>	Erupción Grande
1,800 <sup>a</sup>	Erupción pliniana grande
1,235+50 a 855+55 <sup>a</sup>	Tres erupciones plinianas
1354 <sup>b</sup>	Erupción menor
1363 <sup>b</sup>	Fumarolas
1509 <sup>b</sup>	Erupción mayor, representada en los Códices Telleriano Remensis y Vaticano.
1512 <sup>b</sup>	Fumarolas
1519 a 1530 <sup>b</sup>	Erupción moderada seguida de actividad fumarólica.
1539-1549 <sup>b</sup>	Erupciones moderadas. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez.
1571 <sup>b</sup>	Emisiones de ceniza
1592 <sup>b</sup>	Fumarolas y emisiones de ceniza.
1642 <sup>b</sup>	Fumarolas y emisiones de ceniza
1663 a 1665 <sup>b</sup>	Erupciones moderadas. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Produce “el chimuelo” en La Corona.
1697 <sup>b</sup>	Fumarolas

1720 <sup>b</sup>	Erupción leve y actividad fumarólica
1804 <sup>b</sup>	Fumarolas leves
1919 - 1927 <sup>b</sup>	Erupción moderada. Explosiones esporádicas emiten ceniza y pómez. Se forma un pequeño domo de lava en 1924
1994 <sup>b</sup>	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas emiten ceniza y pómez. Formación de domos de lava en el fondo del cráter
1995 <sup>b</sup>	Fumarolas
1996 <sup>b</sup>	Nuevo episodio de actividad con emisiones de ceniza, formación y destrucción de un nuevo domo.
1997 <sup>b</sup>	Emplazamiento del tercer domo, columna de ceniza 8km, erupción explosiva con un VEI de 1-2 , se generaron flujos de lodo los cuales llegaron a una distancia de 12 km a partir del cráter, formación y destrucción de 4°, 5° y 6° domo.
1998 <sup>b</sup>	Actividad explosiva, exhalaciones de baja a moderada intensidad, algunas produjeron pequeñas caídas de ceniza. Emplazamiento y destrucción del 7°y 8°, comenzó el emplazamiento del 9° domo.
1999 <sup>b</sup>	Exhalaciones de menos tamaño con emisión de fragmentos incandescentes y ceniza, generación de lahares, destrucción de 9° domo y emplazamiento del 10°.
2000 <sup>b</sup>	Actividad explosiva , destrucción del 10° domo, caída de ceniza , generación d eflujo de lodo, exhalaciones de gran intensidad con emisión de ceniza; 15 y 19 millones de m3 volumen total de lava dentro del cráter de Diciembre 2000. Se realizó la evacuación de la población cercana al volcán.
	Emplazamiento y destrucción del 11° y 12° domo.
2001 <sup>b</sup>	Gran exhalación con presencia de ceniza, generación de flujos

	<p>piroclásticos , actividad explosiva con VEI de 3-4 . Durante este año se emplazaron y destruyeron los domos 13°, 14°, 15°, 16° Y 17°</p>
2002 <sup>b</sup>	<p>Exhalaciones de baja intensidad, caída de ceniza. Emplazamiento y destrucción de los domos 18°, 19°, 20°, 21°, 22° y 23°</p>
2003 <sup>b</sup>	<p>Actividad explosiva, exhalaciones de baja intensidad, producción de columnas de ceniza de 4km, emisión de balísticos . Destrucción y emplazamiento de los domos 24°, 25° y 26°</p>
2004 <sup>b</sup>	<p>2 Exhalaciones de baja intensidad</p>
2005 <sup>b</sup>	<p>Erupciones de baja intensidad acompañadas por emisiones de vapor de agua, gas, y ocasionalmente ligeras cantidades de ceniza. Erupción grande, columna 5km. Destrucción de los domos 27° y emplazamiento del 28°</p>
2006 <sup>b</sup>	<p>Exhalaciones de baja intensidad, destrucción de domo 28° y emplazamiento del 29°</p>
2007 <sup>b</sup>	<p>Exhalaciones con presencia de ceniza, continua crecimiento del domo 29. Columnas de ceniza der hasta 3km.</p>
2008 <sup>b</sup>	<p>Caída de ceniza, exhalaciones de moderada a baja intensidad. Eventos explosivos de baja intensidad. Emplazamiento y destrucción de los domos 30° y 31°</p>
2009 <sup>b</sup>	<p>Exhalaciones de baja intensidad, caída de ceniza. Emplazamiento y destrucción del domo 32°</p>
2010 <sup>b</sup>	<p>Exhalaciones de intensidad media y baja, emplazamiento del domo 33° y 34°, erupción de tipo vulcaniano ( destrucción del domo 33°)</p>
2011 <sup>b</sup>	<p>Exhalación de baja intensidad con emisión de ceniza, destrucción del domo 34° y emplazamiento del 35° ( probable destrucción)</p>
2012 <sup>b</sup>	<p>Crecimiento y destrucción de domos, emisión de ceniza,</p>

	exhalaciones de baja y mediana intensidad.
2013 <sup>b</sup>	Crecimiento y destrucción de domos, emisión de ceniza, exhalaciones de baja y mediana intensidad. Crecimiento del domo 48°
2014 <sup>b</sup>	Crecimiento y destrucción de los domos 48°, 49°, 50°, 51° y 52°, emisión continua de gases volcánicos (CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S, principalmente), acompañada por emisiones discontinuas de vapor de agua, exhalaciones de baja y mediana intensidad. Crecimiento del domo 53°

Tabla 1: Se describe la actividad más destacable que se presentó año con año en el Popocatepetl, va desde eventos que ocurrieron en la antigüedad hasta los eventos más recientes (2014). (CENAPRED, 2014; Espinasa-Pereña, 2012).

<sup>a</sup>: Se refiere a las erupciones ocurridas antes de Cristo.

<sup>b</sup>: Nos indica los eventos más destacados en un tiempo ocurrido después de Cristo.

### 1.3 Monitoreo Volcánico.

La vigilancia de un volcán activo es indispensable, ya que esta se realiza con la finalidad de detectar oportunamente variaciones anómalas en la actividad de cierto volcán y de ser posible poder detectar alguna condición que indique ser precursor a un proceso eruptivo, para que con esta información se puedan aplicar medidas de seguridad que pongan a salvo a la población circundante. Los cambios en un sistema magmático pueden ser de dos tipos, físico y químico. Algunos de estos cambios pueden ser percibidos directamente por las poblaciones aledañas al volcán, mientras que otros cambios deben ser detectados por instrumentos altamente sensibles.

Actualmente el monitoreo del volcán Popocatepetl se concentra en cuatro aspectos los cuales son monitoreados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (Figura 5 ; Tabla2):

- 1- Monitoreo Geoquímico.
- 2- Monitoreo Geodésico.
- 3- Monitoreo Sísmico.



Tabla 2: Descripción de las estaciones de monitoreo del volcán Popocatépetl (<http://www.cenapred.gob.mx/>).

POPOCATÉPETL							
Código	Nombre de la estación	Localización	Latitud	Longitud	Altura [msnm]	Equipo	Institución responsable
CEN	PCR-Cenapred	CENAPRED, México, D.F.	19.31485551°	-99.17468054°	2288	Puesto central de recepción, registro, monitoreo y procesamiento de la información de toda la red.	CENAPRED
IIA	Altzomoni	Cerro de Altzomoni	19.12034000°	-98.65424000°	4000	2 Cámaras de Video	CENAPRED
IIB	Calo	Carro Caló, Chalchihuaupan	18.96652693°	-98.34606663°	2500	1 Sensor Sísmico de Banda Ancha (triaxial)	CENAPRED
PPP	Canario	Refugio El Canario	19.04103386°	-98.62760600°	4313	1 Sensor Sísmico de Banda Ancha (triaxial) 1 Sensor Sísmico de Periodo Corto (triaxial) 1 Estación de monitoreo de Flujos 1 Inclínómetro	CENAPRED
PPX	Chipiquixtle	Arenales ladera SW	19.00957571°	-98.65671271°	3990	1 Sensor Sísmico de Banda Ancha (triaxial) 1 Sensor Sísmico de Periodo Corto (triaxial) 1 Inclínómetro	CENAPRED
PPC	Colibri	Ladera SW cerca de San Pedro Benito Juárez	18.98689714°	-98.55771124°	2670	1 Sensor Sísmico de Banda Ancha (triaxial) 1 Sensor Sísmico de Periodo Corto (triaxial) 1 Sensor de infrasonido 1 Estación de monitoreo de Gases	CENAPRED
PIN	Nexpayantla	Loma al SW de Tlamacas	19.05257000°	-98.63676000°	4100	1 Inclínómetro	CENAPRED
PPT	Tetexcaloc	Ladera sur	18.97343000°	-98.62334000°	3138	1 Sensor Sísmico de Periodo Corto (triaxial)	CENAPRED
PPTI	Tianguismanalco	Tianguismanalco, Puebla	18.97515400°	-98.44883400°	2163	1 Cámara de Video	CENAPRED
PPM	Tlamacas	Microondas cerro Tlamacas	19.06705867°	-98.62815300°	4009	1 Sensor Sísmico de Banda Ancha (triaxial) 1 Sensor Sísmico de Periodo Corto (triaxial) 1 Sensor de infrasonido 1 Cámara de Video 1 Estación de monitoreo de Gases	CENAPRED - SSN
PVTO	Tochimilco	Tchimilco, Puebla	18.89292800°	-98.57213900°	2072	1 Cámara de Video	CENAPRED
PFM3	Unión	Unión de las barrancas Espinera y Tenenepanco	19.06844000°	-98.61198000°	3621	1 Estación de monitoreo de Flujos	CENAPRED
PFM2	Zorzal	Barranca la Espinera	19.05028000°	-98.62400000°	3985	1 Estación de monitoreo de Flujos	CENAPRED

### 1.3.1 Red Sísmica del Volcán Popocatépetl.

El monitoreo sísmico de los volcanes se lleva a cabo utilizando sismómetros, los cuales deben estar distribuidos a los alrededores del volcán y sobre el cráter. Estos sismógrafos se encargan de detectar las señales que se generan debido a los movimientos internos del volcán. Estos movimientos producen vibraciones, las cuales son generadas por fracturamientos de las paredes internas del volcán, o provocadas por cambios de presión. También, por el movimiento del magma o la salida de gases y materiales volcánicos. Con base en la experiencia es posible identificar y clasificar los registros sísmicos o sismogramas asociados a diferentes procesos o mecanismos. Las señales que perciben estos aparatos pueden ser predecesoras de una actividad eruptiva importante, es por esta razón que el monitoreo sísmico de un volcán tiene gran relevancia.

La red sísmica del volcán Popocatépetl consta de 12 estaciones remotas y una estación central de adquisición y procesamiento de datos localizada en las instalaciones de CENAPRED. Las estaciones se encuentran instaladas en las faldas alrededor del volcán, la más cercana se encuentra a 2km de distancia del cráter (Fig. 6). Las estaciones constan tanto de sismómetros de periodo corto comode

banda ancha. Las señales que se producen en estos instrumentos son enviadas en tiempo real a las instalaciones de CENAPRED en donde son almacenadas y analizadas.

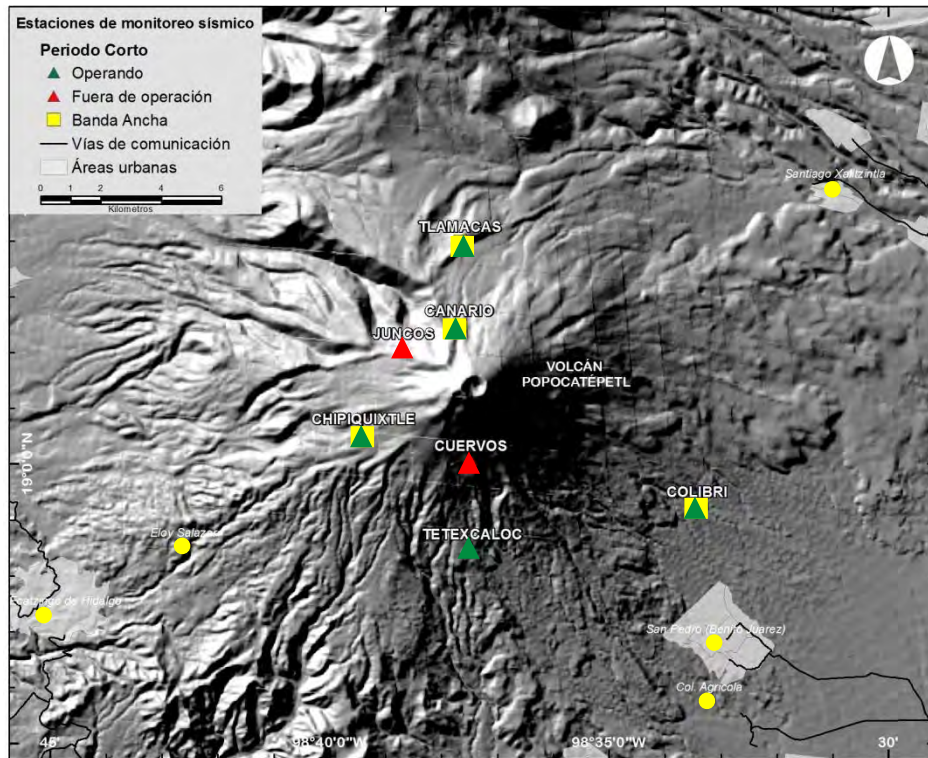


Figura 6. Localización de las estaciones sísmicas en los alrededores del volcán Popocatepetl. Las estaciones identificadas con un triángulo verde son las que se encuentran en operación, las estaciones con un triángulo de color rojo están fuera de operación y las que presentan un cuadrado amarillo son estaciones de banda ancha. Los puntos de color amarillo representan los poblados más cercanos (CENAPRED, 2014).

## Capítulo 2: Sismicidad Volcánica.

Los sismos pueden clasificarse, tomando en cuenta su origen como tectónicos, volcánicos y de colapso. Estos últimos son producidos principalmente por el derrumbe de techos de cavernas o minas y solo son percibidos en pequeñas aéreas. Los sismos llamados tectónicos son aquellos producidos por rupturas de grandes dimensiones en la zona de contacto entre placas tectónicas (sismos interplaca ) o bien en zonas internas de éstas (sismos intraplaca). Como ejemplo de sismos interplaca pueden citarse los eventos de julio 1957 (M 7.6) (Narváez & Angulo,2007) y el de septiembre de 1985 (M 8.1). En México, estos sismos comúnmente tienen sus epicentros en la costa occidental entre Jalisco y Chiapas, con profundidades típicas entre 15 y 20 Km (Suárez et al. 1994).

Por otra parte, como resultado del movimiento de fluidos y gases así como de la generación de fracturas para permitirlo o bien del colapso de cavidades ocasionadas por salidas de magma, se originan los sismos volcánicos. En las etapas previas a episodios de actividad volcánica mayor, estos eventos se presentan en número reducidos (algunos sismos por día o por mes). Sin embargo, poco antes y sobre todo durante una erupción la actividad sísmica aumenta hasta presentar decenas o cientos de sismos en unas horas. Los sismos volcánicos, no son eventos que se caractericen por su gran magnitud. La probabilidad de que un volcán pueda llegar a ocasionar daños por la actividad sísmica asociada a la erupción es muy baja.

La sismología volcánica, es una ciencia la cual nació cuando el sismólogo Japonés Fusakichi Omori, realizó una investigación sobre las señales sísmicas de las erupciones de 1910 de los volcanes Utsu y Asma (Figura 7). Omori definió un sismo volcánico como “una perturbación sísmica, que se produce por la acción directa de una fuerza volcánica, o cuyo origen se encuentra debajo o muy cerca de un volcán, activo, inactivo o extinto” (Omori, 1992).



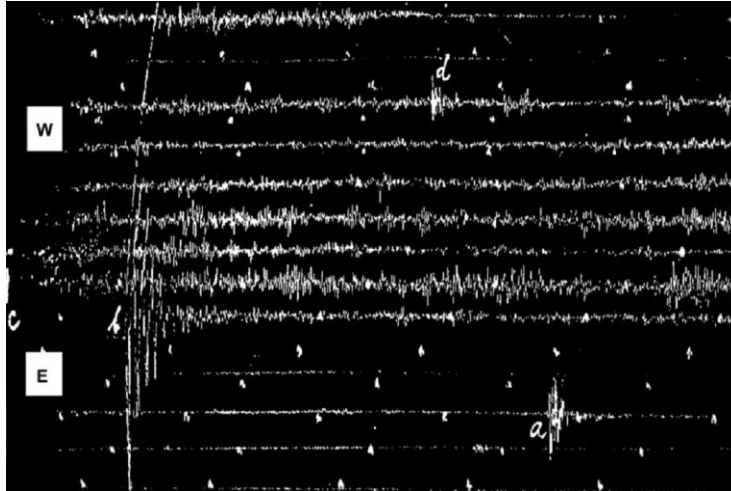


Figura 7. En la imagen se puede apreciar el registro de los sismos volcánicos (a,b y d) y el tremor volcánico ( señal continua) registrados en Agosto 7-8 de 1910 por la estación Sobets del volcán Usu, Japón. Con componente WE. Imagen tomada de Zobin, V. M. (2003). *Introduction to volcanic seismology*.

La sismología volcánica se encarga de estudiar la dinámica de los gases, fluidos y sólidos que están contenidos dentro de un volcán. Esto no es tarea fácil ya que el interior de un volcán es un medio de propagación heterogéneo, anisótropo, con irregularidades y grietas de diferentes escalas y orientaciones. Por esta razón se considera que la sismología volcánica es una de las ramas de la sismología que tiene un mayor grado de dificultad para la interpretación de las señales que se producen en un volcán (Zobin, 2012).

Estudiar las señales sísmicas provenientes de los volcanes, su origen y la relación de estas señales con la actividad volcánica, es una poderosa herramienta que se utiliza para investigar con mayor detalle la estructura interna de un volcán e incluso para poder pronosticar alguna erupción volcánica.

## 2.1 Clasificación de las señales volcánicas

En el campo de la sismología volcánica, es muy importante saber que los sistemas volcánicos son complejos y es fundamental comprender que dentro del sistema volcánico se generan señales las cuales nos dan información sobre el sistema. Un factor determinante para analizar la sismicidad volcánica es determinar y caracterizar los diversos tipos de señales registradas en las redes sísmicas. En la actualidad, los diferentes tipos de señales que se generan a partir de un cuerpo

volcánico se clasifican dependiendo de su forma de onda, contenido espectral y localización. Ibáñez (1997) afirma que las variaciones en la clasificación de las señales dependen del tipo de instrumento, las condiciones geológicas y el tipo de volcán.

Los sismos de origen volcánico se clasifican de acuerdo con la forma de onda que presenta en los sismogramas, frecuencia o fuente. La primer clasificación de señales sísmicas volcánicas que se propuso fue debida a Minakami (1960, 1974), y consta en cuatro tipos de acuerdo con su localización, su relación con las erupciones y la naturaleza del evento: de alta frecuencia o tipo A, de baja frecuencia o tipo B, eventos explosivos y tremor volcánico, esta clasificación sigue siendo muy utilizada. Sin embargo, a través de los años se han realizado diferentes clasificaciones más detalladas y específicas de algunos volcanes ( Tokarev, 1966; Latter, 1979; Malone, 1983; Lahr et al., 1994; Chouet, 1996a; Harlow et al., 1996; McNutt, 1996, 2000; Ratdomopurbo y Poupinet, 2000;).

En la Tabla 3 se resumen las diferentes clasificaciones de señales sísmicas de origen volcánico.

Tabla 3: Clasificación de señales sísmicas de origen volcánico (Molina, 2001).

<b>Molina (1999)</b> Volcán Tungurahua (Adopta la de Power)	<b>Minakami (1960,1974)</b> Volcanes Asama y Sakurajima.	<b>Latter (1979, 1981)</b> Volcanes Ruapehu y Ngauruhoe. <b>Ntepe y Dorel (1990)</b> V. Stromboli.	<b>Power et al (1994)</b> Volcán Redoubt	<b>McNutt et al (1996)</b> Mammoth Mountain.	<b>Otras Clasificaciones.</b> Mount St Helens, V.N. del Ruiz, Soufriere Hills.
Volcano-tectónico (VT)	Tipo A	Volcano-tectónico	Volcano-tectónico (VT)	Alta frecuencia HF	Alta frecuencia (Endo et al., 1981; Nieto et a., 1990) Tipo h (Malone et al.,1983)
Largo periodo (LP)	Tipo B	Volcánico	Largo periodo	Baja frecuencia LF	Baja frecuencia (Endo et al., 198) Tipo M y L (Malone et al., 1983), Largo periodo (Nieto et a., 1990)
Híbrido (HB)			Híbrido	Frecuencia mixta	Híbrido (White,R., 1998) Media frecuencia
Tremor volcánico.	Tremor volcánico.	Tremor volcánico.	Tremor volcánico.	Tremor volcánico.	Tremor volcánico espasmódico y armónico.

A continuación se hace una descripción de algunas de las señales sísmicas que se han observado en el volcán Popocatepetl, basada en los trabajos mencionados previamente, entre otros.

## 2.2 Eventos Vulcano-Tectónicos (VT)

Se le denomina evento vulcanotectónico (VT), evento de alta frecuencia o evento Tipo- A, a un tipo de señal que se asocia con un evento parecido a los sismos de origen tectónico.

Este tipo de eventos se genera debido a que los procesos que ocurren dentro de un volcán generan una acumulación de esfuerzos, los cuales la fracturan las rocas circundantes. Otra causa que se cree que origina eventos Vtson las tensiones a causa de la contracción del material debido al enfriamiento de un cuerpo magmático o del edificio volcánico, variaciones de presión en la cámara magmática o en los conductos y por movimientos gravitatorios o tectónicos (Lesage, 2003).

Una característica distintiva de los VT's es que presentan una señal de duración variable, la cual puede ir de unos segundos hasta minutos; posee un inicio impulsivo de la onda P y es posible identificar el arribo de la onda S (Fig 7) (Ibáñez et al. 2000). Las frecuencias que presentan este tipo de eventos varían de 5 a 15 Hz. En lo que respecta a la profundidad de los VT's se tiene que estos pueden presentarse desde la superficie volcánica, hasta superar 30km de profundidad.

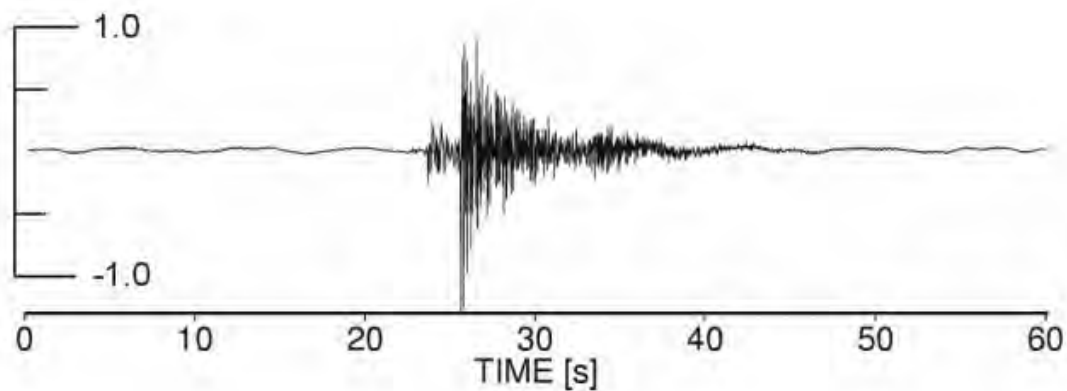


Figura 8. Señal característica de un VT. Este evento corresponde a un evento del volcán Merapi, Indonesia (<http://www.avcan.org>).

En la Figura 9 se muestra la imagen de eventos VT's asociados a la actividad del Popocatépetl .

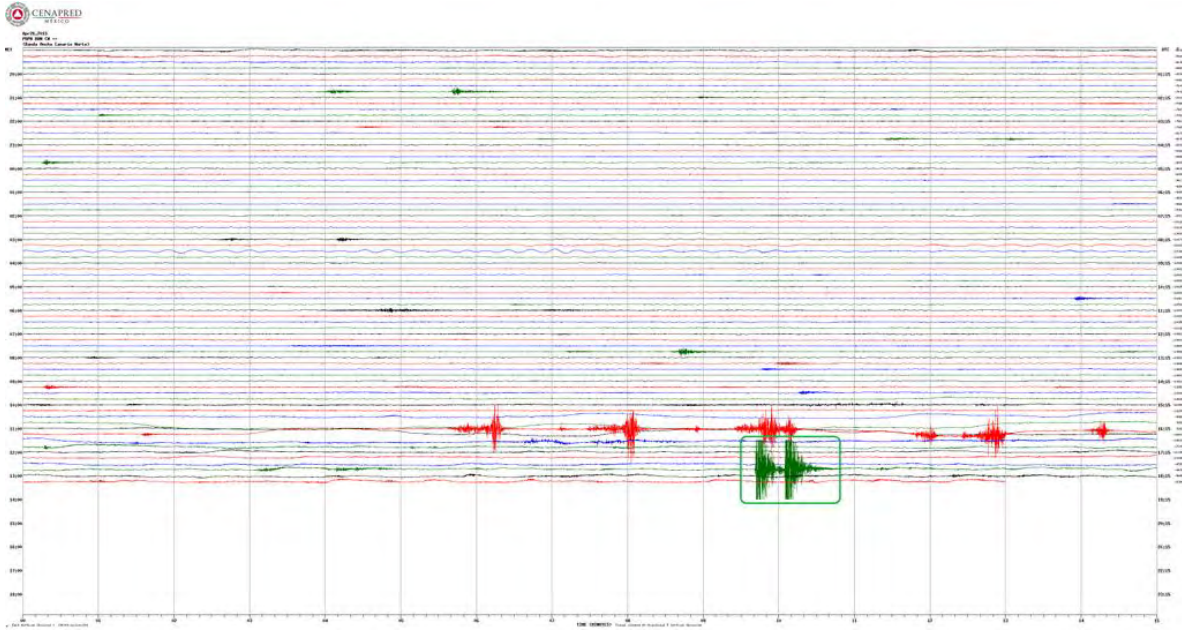


Figura 9 . En el recuadro se muestran dos sismos volcano-tectónicos a las 12:54h y 12:55h; con magnitudes superiores a 2.0., Estos eventos tuvieron lugar el día 26 de Abril 2015 ([www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)).

Este tipo de eventos se presenta en la mayoría de los ambientes de tipo volcánico y han ocurrido casos en los cuales los volcanes entran en reposo y este tipo de eventos es lo único que nos confirma que tienen actividad (algunos ejemplos son el Teide o el Vesuvio, Italia).

### 2.3 Eventos de Baja Frecuencia (LP)

Los eventos de baja frecuencia (LP), también son conocidos con el nombre de eventos de periodo largo o eventos Tipo-B y son señales típicas de los ambientes volcánicos. Este tipo de señales tienen una duración que va desde unos segundos hasta menos de un minuto (Ibáñez, 2000). Sus frecuencias son bajas ya que van de 1 a 5 Hz. Las señales de estos eventos generalmente son de carácter emergente, por esta razón no es muy fácil determinar con claridad el arribo de las ondas S y P (Figura 10). Este tipo de eventos no son fáciles de localizar con las técnicas clásicas, cuando se ha logrado localizarlos, generalmente los hipocentros se ubican en las partes someras del volcán. Sin embargo, en volcanes como el Kilauea (Hawaii) se han encontrado eventos LP a profundidades de hasta 30-40 km (Aki y Koyanagi, 1981; Shaw y Chouet, 1991). El contenido espectral de esta

señal puede variar de volcán a volcán, e incluso dentro del mismo sistema volcánico, dentro de un mismo edificio volcánico es posible encontrar diversos tipos de eventos de tipo L.P. (Ibáñez., 2000).

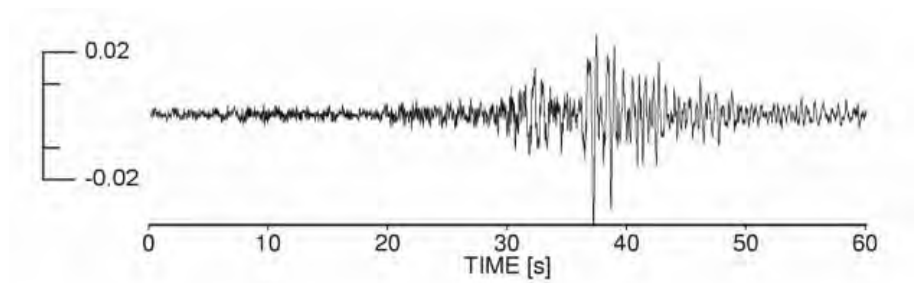


Figura 10. Evento tipo LP, ocurrido en el volcán Merapi, Indonesia. Se aprecia que el arribo de las ondas S y P no es del todo claro.  
<http://www.avcan.org>

Los eventos LP se considera que son generados por diversos procesos volcánicos. Sin embargo, se atribuyen principalmente a la resonancia de grietas producidas por la presión de fluidos magmáticos que ascienden a la superficie (Chouet, 1996a). Seidl et al., (1981) propone que estos eventos se generan por el cambio de presión dentro de la mezcla de gas y fluidos de baja viscosidad causando resonancia dentro del mismo magma. James et al. (2006) comprobó que la geometría del conducto o dique (con fluidos de baja viscosidad) causa cambios de presión y esto detona eventos de bajas frecuencias. Algunos autores como Chouet (1996) han podido observar que existe una relación entre la ocurrencia de eventos LP y las erupciones volcánicas.

## 2.4 Eventos híbridos

Algunos eventos que ocurren dentro de los volcanes generan señales las cuales poseen características de VT y LP, estas tienen la presencia de señales de alta frecuencia seguido por señales de baja frecuencia, y poseen una amplia banda espectral  $> 10$  Hz, para este tipo de eventos las fases P y S son fáciles de identificar (Figura 11). Este tipo de eventos se asocia a un pequeño terremoto. Después de la primera llegada aparece una señal muy similar en forma de onda, duración y contenido espectral, a los eventos LP. Por regla general, la llegada en alta frecuencia de los híbridos debe presentar ondas P y S claras (Ibáñez et al., 2000).

Los eventos híbridos se producen con frecuencia debido a rupturas frágiles generadas por las altas presiones proporcionadas por los fluidos o el material magmático.

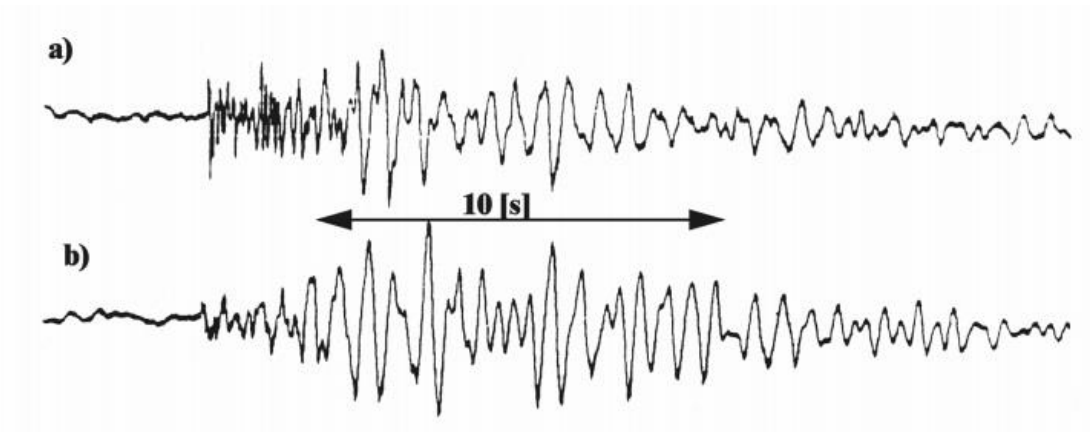


Figura 11. (a) Evento híbrido; (b) Evento VT-B. La energía con la que empieza el sismo es la característica que lo distingue. La coda guarda una similitud muy importante con el evento volcánotectónico ([www.avo.alaska.edu](http://www.avo.alaska.edu)).

## 2.5 Explosiones

Son un tipo de señal muy distintiva de los ambientes volcánicos, este tipo de eventos nos señalan que dentro del cuerpo magmático se está poniendo en marcha un proceso eruptivo. Son identificables debido al aumento brusco en la amplitud de la señal y un claro incremento en la frecuencia de estas. El origen de estas señales se atribuye a la actividad eruptiva del volcán, a la liberación repentina del vapor de agua, y otros gases.

Ibañez y Carmona (2000) indican que este tipo de señal tiene al menos dos llegadas diferentes y claras. La primera asociada con la propagación en forma de ondas internas o superficiales de la explosión. La segunda es la llegada de lo que se conoce como ondas de aire, ondas de choque y ondas sonoras, con una velocidad de propagación clara de 340 m/s. Esta velocidad de propagación tan lenta y clara es la forma más fácil para identificar este tipo de eventos sobre los sismogramas cuando no ha sido posible distinguirlos en el momento de su ocurrencia. En el volcán Popocatepetl este tipo de señales es comúnmente registrado por las estaciones de monitoreo, en las siguientes imágenes se muestran sismogramas de explosiones ocurridas en el volcán en el pasado (Figura 12 y 13).

PP HHZ 2015/08/02 12:00:00 - 2015/08/03 11:15:05 (HORA MEXICO)

SERVICIO SISMOLOGICO NACIONAL

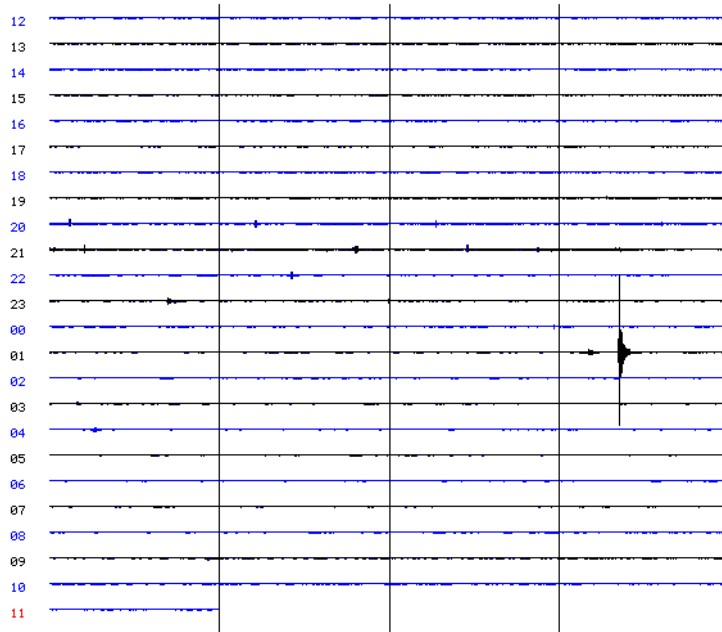


Fig 12: Obsérvese la pequeña explosión ocurrida el día 3 de Agosto del año 2015 a la 1:48 (hora de México) aproximadamente. (www.ssn.unam.mx)

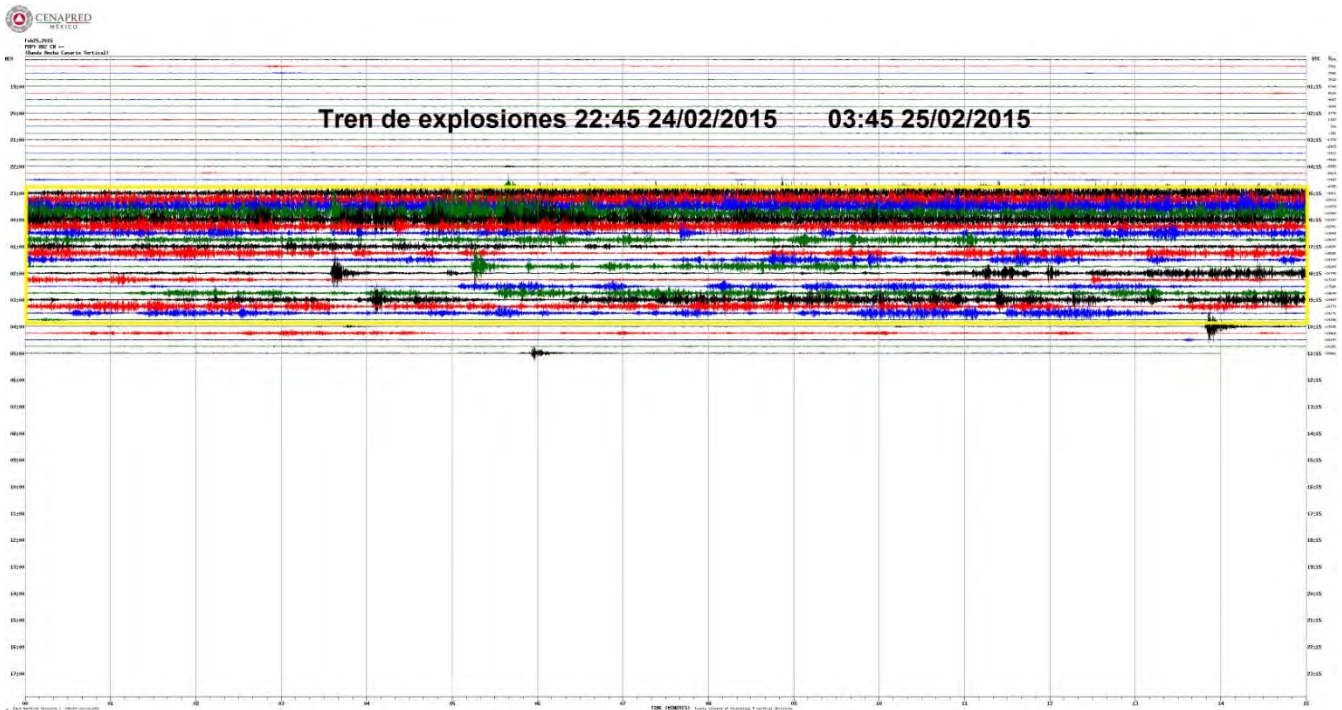


Fig 13. Tren de explosiones registrado el 24 de Febrero del 2015. Inició a las 22:45 y finalizó a las 03:45 del día 25 de Febrero del mismo año. Imagen tomada de www.cenapred.unam.mx

## 2.6 Tremor volcánico

Este tipo de señal es un registro continuo de vibraciones monotómicas o no armónicas que puede tener una duración de minutos hasta días o meses (Zobin, 2003). Este tipo de eventos se caracteriza por producir señales sísmicas que conservan una amplitud constante por un largo periodo de tiempo, con un contenido espectral centrado en bandas de frecuencia relativamente estrechas (Ibañez & Carmona, 2000).

Se han observado ciertas características comunes en este tipo de eventos, las cuales se describen a continuación:

1. En el tremor no es posible identificar la llegada de fase P o S.
2. El espectro de este tipo de eventos por regla general contiene un pico dominante con presencia de otros picos subdominantes. Las frecuencias centrales de los Picos dominantes son excepcionalmente estables y no suelen estar muy influenciadas por las características de la erupción. Muchas señales de tremor vienen precedidas inicialmente por unas llegadas a altas frecuencias similares a las encontradas en algunos eventos de tipo L.P (Ibañez & Carmona, 2000).
3. Las frecuencias centrales de los picos dominantes son especialmente estables y no suelen estar influenciadas por las características de la erupción ni por la situación de las estaciones sísmicas.
4. Por regla general, parece no existir una correlación entre la actividad volcánica visual y la envolvente del tremor. Un tremor fuerte no tiene que estar relacionado con una fuerte actividad volcánica visual, o una fuerte desgasificación no tiene por qué coincidir con un tremor fuerte. En algunas ocasiones, se observa tremor intenso cuando la actividad eruptiva es rítmica. En cuanto al tipo de material emitido, las amplitudes del tremor están bien correlacionadas con las fuerzas de las erupciones de cenizas, vapor o gas, mientras que para erupciones de lava o flujos de lava, las amplitudes del tremor suelen ser más bajas. No se ha observado un desplazamiento en frecuencia de los picos espectrales durante los procesos eruptivos, afectando simplemente a la amplitud de la señal. Por este



motivo, la amplitud de la señal parece estar más relacionada con la fuerza de la erupción que con el tamaño de la región fuente (Ibañez & Carmona, 2000).

Existen diferentes tipos de tremor:

1. Tremor Armónico, se genera a partir de una onda sinusoidal, generalmente monotónica y de baja frecuencia que presenta cambios suaves en amplitud (Figura 14) .
2. Tremor espasmódico es una señal continua, irregular o caótica de alta frecuencia.
3. Existen otros tipos de tremor que presentan una señal en forma de pulsos con variaciones constantes en su amplitud a intervalos de tiempo regulares. Este tipo de señal ha sido clasificado como tremor pulsante (Wassermann, 2002) o tremor cíclico ( Chouet, 1992).

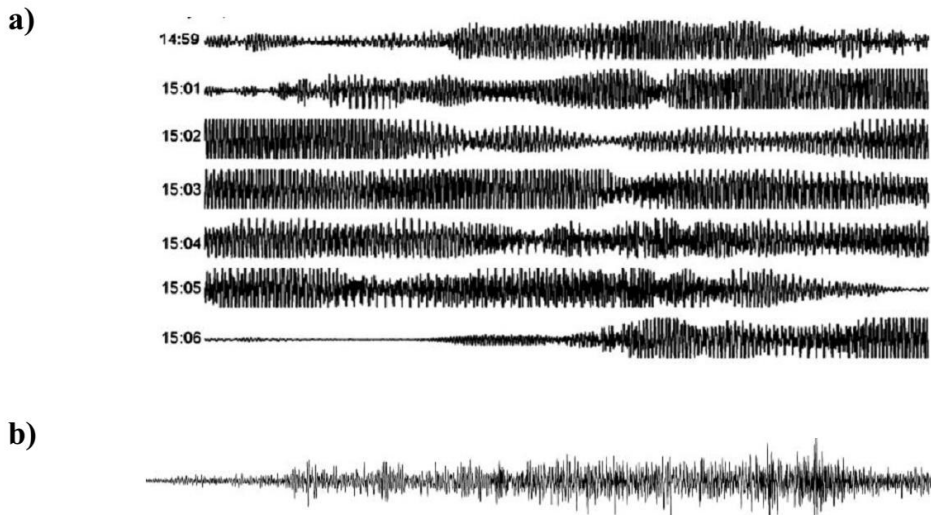


Fig 14. Ejemplos de tremor a) armónico y b) espasmódico registrado en los volcanes Sakurajima, Japón y White Island, Nueva Zelanda, respectivamente (Maryanto et al., 2007; Sherburn et al., 1998).

Los tremores volcánicos nos dan información sobre el proceso eruptivo de los volcanes, ya sea sobre el movimiento del magma o de gases y ruidos. En superficie por la emisión de fumarolas, cenizas y caída de rocas. El volcán Popocatepetl no está exento de presentar este tipo de señales (Figura 15).

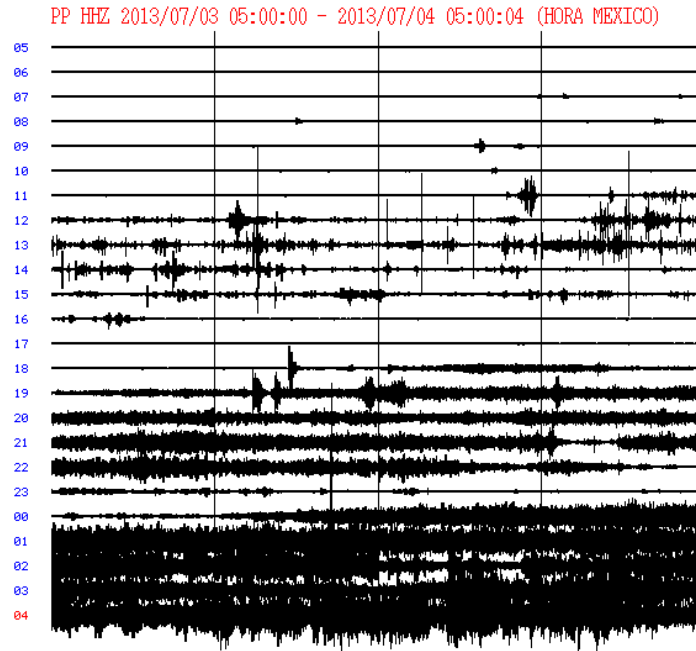


Fig 15 En el sismograma registrado el 3 de Julio del 2013 en la Ciudad de México, podemos observar que se presenta un largo periodo de tiempo en el cual se presenta tremor volcánico. Tomado de [www.ssn.unam.mx](http://www.ssn.unam.mx)

## 2.7 Eventos de periodo muy largo (VLP)

También son conocidos como eventos de muy baja frecuencia, tienen baja amplitud y periodos de 3 a 20 s, con profundidades menores a 1.5km. Este tipo de señales se considera que está asociada a la actividad fumarólica intensa o a erupciones de tipo freático con un pulso muy fuerte de baja frecuencia (Quezada, 2008).

## 2.8 Eventos superficiales

Existen señales que provienen de eventos que ocurren en la parte exterior del cuerpo volcánico. Algunos de estos procesos que generan señales de este tipo son los desplazamientos de hielo y los derrumbes (altas frecuencias). Existen otras señales producidas por los flujos de lodo, lahares y flujos piroclásticos. Para el caso del volcán Popocatépetl, se presentan los primeros tipos de evento

(Figura 16) y las exhalaciones, que tiene un crecimiento gradual hasta alcanzar amplitudes de consideración, asociados particularmente a la emisión de cenizas (Garza, 2014 ).

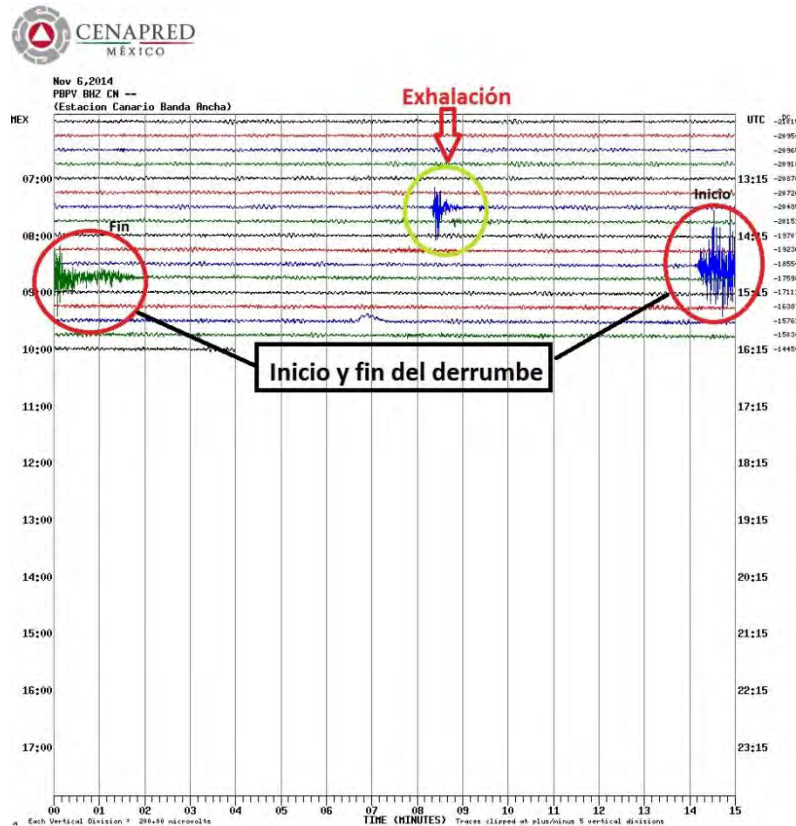


Figura 16. La señal que se encuentra dentro del círculo de color verde es una exhalación, mientras que el evento que está enmarcado con color rojo corresponde a un derrumbe ocurrido en el volcán Popoatépetl, el día 6 de Noviembre del 2014.(www.cenapred.unam.mx).

## • 2.9 Modelos de fuente

Es de gran importancia determinar el origen de todas las señales que se han descrito con anterioridad, ya que esta información es fundamental para conocer que procesos están ocurriendo dentro del sistema volcánico. En algunos casos se tienen modelos los cuales se adaptan y tratan de explicar el origen de estas señales, pero muchos de ellos solo son aproximaciones a lo que realmente sucede dentro del edificio volcánico. En los siguientes párrafos se hará un pequeño resumen de los modelos de mayor aceptación para cada tipo de señal.

## **2.10 Modelo para VT's**

Este modelo es uno de lo que tiene mayor aceptación. Considera la acumulación de esfuerzos que se genera en una determinada región, hasta el punto en que la cantidad de esfuerzos acumulada en el material que está siendo afectado no resiste más y se rompe. Una parte de la energía que es liberada en este proceso se libera en forma de ondas sísmicas.

El mayor problema con este tipo de eventos es lograr descubrir cuál es el origen de la acumulación de los esfuerzos. Algunos ejemplos que pueden dar una respuesta para esta acumulación de energía son: a) Transmisión de energía como producto de la dinámica tectónica regional, b) Transmisión de energía debido a la interacción con la dinámica de los fluidos que están presentes en el sistema volcánico (Ibañez & Carmona, 2000).

## **2.11 Modelos de fuente de eventos L.P**

Se han realizado estudios por parte de Chouet (1986, 1988), en los cuales se propone que las señales de tipo L.P. están relacionadas con los fluidos dentro del volcán. Este modelo se denomina "modelo de fracturas controladas por fluidos" y propone que los eventos L.P. se generan por la resonancia que se produce en fracturas rellenas por fluidos con un porcentaje de gas disuelto en ellas, estas grietas sufren cambios repentino de presión. Los cambios repentinos de presión son los causantes de la producción de las ondas sísmicas.

La frecuencia central del pico espectral de la señal y su anchura, aportan información sobre el tamaño de la fractura que resuena, y del tipo y dinámica del fluido que la rellena (Nakano et al., 1998; Ibañez et al., 2000).

Una interpretación de estas señales basándose en este modelo también ha permitido predecir la ocurrencia de erupciones explosivas en función de la evolución espacio temporal de los L.P. La cuestión fundamental es delimitar cuál es el fluido que rellena la fractura (agua o magma) y su

contenido en gas, así como la evolución espacio-temporal y energética de la fuente (Ibañez & Carmona, 2000).

### **2.12 Modelos de fuente de los eventos híbridos**

En la región fuente (una fractura) sellada y sometida a presión de los fluidos volcánicos, el aumento de presión lleva a la ruptura de la zona, produciendo un evento sísmico. La fractura se rellena de fluido y la resonancia del mismo, según el modelo de los L.P. produce la señal monocromática en bajas frecuencias. Este modelo asume que existe una presión que rompe la fractura y le inyecta un fluido (Ibañez & Carmona, 2000).

### **2.13 Modelos de fuente para los tremores volcánicos**

El tremor es una de las señales más complejas, ya que su variedad espectral y la ausencia de fases sísmicas nos llevan a la necesidad de utilizar varios modelos fuente. Algunas fuentes que se tienen identificadas son (Ibañez & Carmona, 2000):

- Tremor TH se asocia con las avalanchas o caída de rocas.
- Tremor TL se relaciona con el transporte de masa a oscilaciones del conjunto de la cámara magmática o incluso a resonancia de tipo “tubo de órgano” de grandes conductos .

## Capítulo 3 Metodología

### 3.1 Catálogo Sísmico

Para la realización de esta investigación, se utilizó el catálogo de eventos desarrollado por el CENAPRED para el período que va desde 1995 al 2014. Este catálogo sísmico, está compuesto por un total de 2796 eventos VT, y contiene fecha, hora, localización, magnitud y profundidad de los eventos registrados. Durante el proceso de análisis, algunos VT's fueron eliminados del catálogo debido a que eran reportados con magnitudes que variaban entre los 6 y los 9 grados lo cual es imposible para el volcán de estudio.

Trabajar con un catálogo sísmico puede tener desventajas, ya que la mayoría de estos no cuenta con el registro de la sismicidad en función del espacio, tiempo y magnitud (Zúñiga y Wyss, 1995). Regularmente en las redes de monitoreo encargadas de registrar la sismicidad ocurren desperfectos, debido a que los instrumentos que se encargan del registro pueden tener fallas y estas fallas pueden verse reflejadas en que no se tenga un registro continuo en el tiempo. Otro problema que presentan los catálogos es que nunca contienen todos los eventos que ocurren en realidad, debido a que en ocasiones los equipos no registran eventos de magnitudes pequeñas o tiene problemas de niveles de ruido, personal de monitoreo u otro factor (Garza, 2014).

Algunas de las causas que podrían introducir variaciones artificiales en la sismicidad, de acuerdo a Zúñiga y Wyss (1955), son:

- Cambio de la agencia que opera el catálogo.
- Cambio en el personal que analiza las señales sísmicas.
- El empleo de nuevos métodos computacionales para el análisis.
- Introducción de nuevos equipos de registro y/o detección.
- Reducción o ampliación de redes sismográficas.
- Cambios en la definición de la magnitud.
- Diferencias en las técnicas de promediado de los datos.
- Diferencias en las correcciones.

- Agregar o borrar datos de redes locales.

### **3.2 Número de sismos y acumulado**

Para este análisis se realizó el acumulado del número de sismos registrados. Este proceso se realizó para los 19 años que cubre nuestro catálogo para períodos anuales, mensuales, semanales y diarios. La interpretación gráfica de los cambios en el número diario de sismos ha sido utilizada en otros trabajos para pronosticar erupciones volcánicas, basándose en el número de eventos que ocurren durante los días previos a la erupción. Tal es el caso del volcán Asama, Japón, en el que Minakami (1960; 1974) basó su pronóstico en el aumento sistemático del número de eventos que ocurrieron durante los cinco días previos a la erupción.

### **3.3 El valor de $b$**

El valor de  $b$  es el valor positivo de la pendiente de una recta “ideal” estimada de manera que se parezca lo más posible al gráfico de frecuencia contra magnitud de ciertos registros. Un valor alto de  $b$ , de 1.7 por ejemplo, significa que en un área dada, ocurre una gran cantidad de sismos pequeños por cada sismo mayor; mientras que un valor pequeño, alrededor de 0.3, implica que ocurren pocos sismos de pequeña magnitud en el área de estudio o alternativamente, que proporcionalmente ocurren más sismos de magnitud grande. Por la razón anterior, la estimación del valor  $b$  es de gran relevancia para la estimación del riesgo sísmico en un área dada.

El valor de  $b$  en esta relación ha sido muy útil en investigaciones sobre sismicidad y en experimentos de laboratorio sobre rocas. La ocurrencia de micro-sismos sigue un patrón similar, y el valor de  $b$  está inversamente relacionado con el nivel de esfuerzo o energía liberada, así como por la heterogeneidad del material. Para algunas secuencias sísmicas se reporta que este valor cambia antes del sismo principal. Esta propiedad es consistente con un alto nivel inicial de esfuerzos “stress” seguido por una caída repentina de los esfuerzos, la cual es atribuida a la ocurrencia del sismo de mayor intensidad, lo cual ha sido tomado en cuenta en la predicción de eventos sísmicos (Shi y Bolt, 1982).

El valor de  $b$  se incrementa en condiciones de bajos esfuerzos, con el incremento de las heterogeneidades del material (Urbancic et al.,1992) y también puede ser sensitivo al gradiente de temperatura (Warren y Latham, 1970). Estas conclusiones son apoyadas por numerosas observaciones de campo como las hechas en Taiwán (Wang, 1988) y a lo largo de las zonas de subducción del Pacífico (Carter y Berg, 1981).

### 3.4 Variaciones temporales del valor $b$

El parámetro conocido como *valor  $b$* , está definido por la relación Gutenberg-Richter ( Figura 17). Dicha relación representa el número de eventos acumulados ( $N$ ) con respecto a las magnitudes ( $M$ ) de los eventos sísmicos registrados en un área determinada. Este es un parámetro básico en cualquier cálculo de probabilidad de ocurrencia de un sismo de cierta magnitud.

Los primeros en establecer una relación entre la magnitud del evento y el número de eventos igual o menor a una determinada magnitud fueron Ishimoto e Ida (1939) en Japón. Posteriormente, Richter y Gutenberg (1944) para California, propusieron que la frecuencia de ocurrencia se podría representar como:

$$\log_{10}(N)=a-bM \quad (1)$$

Resolviendo para  $N$  podemos ver que de hecho la relación responde a una ley exponencial:

$$N=10^{a-bM} \quad (2)$$

En donde  $N$  es el número acumulado de eventos con magnitudes mayores a  $M$ , y  $a$  y  $b$  son constantes. La relación se observa de manera descendiente respecto a la magnitud de los eventos,



lo que significa que, teóricamente, para un evento de magnitud  $M$  ocurrirán más eventos de magnitud menor, a una escala de número de eventos definida.

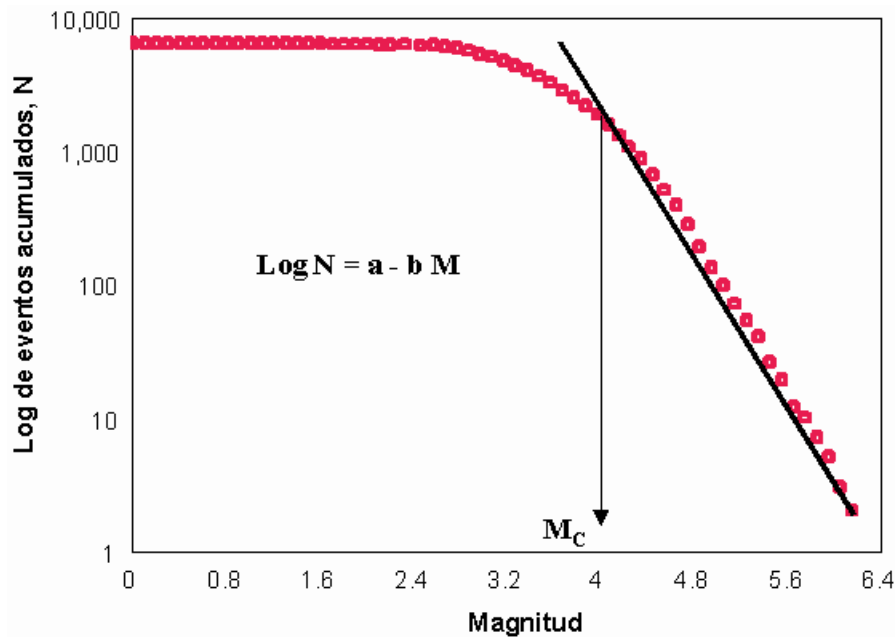


Figura 17. Representación esquemática de la relación F-M común.  $M_c$  es la magnitud a la cual los datos se separan del ajuste lineal (valor  $b$ ).

El parámetro  $a$  (ordenada al origen) describe la productividad de un volumen (Wiemer y Wyss, 2002) y depende del número de sismos en el tiempo y región muestreados (Stein y Wyssession, 2003). Si llevamos las posibles magnitudes de todos los eventos de una región a un mínimo (cero), el parámetro  $a$  nos indicaría cuántos eventos tendríamos en total.

El parámetro  $b$  (la pendiente de la relación frecuencia-magnitud) describe la distribución relativa del tamaño de los eventos (Wiemer y Wyss, 2002). Ésta pendiente, llamada generalmente valor  $b$ , ha demostrado ser invariante a diferentes escalas (auto-similar) desde kilómetros hasta fuentes milimétricas probadas en laboratorios (Abercrombie y Brune, 1994).

El valor  $b$  también está inversamente relacionado con el esfuerzo aplicado. Durante algunos terremotos y en ciertos experimentos de laboratorio, se ha determinado que valores bajos de  $b$  indican altos niveles de esfuerzo y viceversa (Scholz, 1968).

La formulación original de Ishimoto e Ida (1939) así como la de Gutenberg y Richter (1944) utilizaba el valor absoluto de la frecuencia de terremotos en lugar del número acumulado. Sin embargo, desde un punto de vista práctico y estadístico es preferible utilizar la distribución de frecuencia-magnitud acumulada (Wiemer y McNutt, 1998).

### 3.5 Aplicaciones del valor $b$ para el caso de erupciones volcánicas

El valor  $b$  se ha utilizado en diferentes estudios de actividad volcánica, como es el caso del trabajo realizado por Novelo y Martínez Bringas (2006) en el cual se utiliza las variaciones del valor de  $b$  para monitorear la actividad del volcán Popocatepetl durante el período de diciembre del 2000 a Enero del 2001. Algunos autores han reportado cambios de  $b$  antes y después de la ocurrencia de una explosión volcánica o de un terremoto ( Wyss, 1985; Jin and Aki, 1986;\_Novelo y Martínez Bringas, 2006). En estas investigaciones los valores de  $b$  se calcularon utilizando el método de máxima verosimilitud desarrollado por Utsu (1965):

$$b = \log 10 e / (M - M_{min}) \quad (3)$$

Donde  $M$  es la magnitud promedio de todos los terremotos con magnitudes superiores a un umbral  $M_{min}$ . En el presente trabajo se utilizarás esta metodología y  $M_{min}$  se determinará considerando la magnitud mínima de los eventos que se pueden localizar utilizando los datos de la red sismológica del volcán Popocatepetl. Es decir, la magnitud a partir de la cual, el catálogo sísmico del volcán Popocatepetl está completo.

El valor  $b$  generalmente es de 1.0 o muy cercano a este número (Zúñiga y Wyss, 2001; Felzer, 2006). Este valor en ocasiones no es aplicable a todas las regiones del mundo ya que en muchos casos existen variaciones en los cuales se presenta un valor  $b$  bajo o alto en regiones de baja o alta sismicidad (Wiemer y Wyss, 1997; Zúñiga y Wyss, 2001) y áreas volcánicas (Warren y Latham, 1970), respectivamente.

Las variaciones se atribuyen a la diversidad de procesos que ocurren dentro de un sistema. Algunos de estos procesos pueden ser, heterogeneidad en fallas (Mogi, 1962), el nivel de esfuerzos impuestos en rocas (Scholz, 1968; Wyss 1973) y variaciones de presión de poro (Warren y Latham, 1970; Wyss, 1973; Shaw, 1995).

Respecto a las zonas volcánicas el valor  $b$  puede llegar a ser hasta de 2 (Wiemer y McNutt, 1997; Wyss *et al.*, 2001). Estos valores pueden ser debido a las magnitudes utilizadas en un catálogo y el número de muestras utilizadas. Se considera que estos altos valores de  $b$  pueden ser atribuidos debido a heterogeneidades mayores a las normales (Mogi, 1962), un decremento en el estado de esfuerzos efectivo (Wyss, 1973) o en esfuerzos aplicados (Scholz, 1968), o a gradientes térmicos elevados (Warren y Latham, 1970).

Otro motivo por el cual se puede presentar un alto valor de  $b$  en zonas volcánicas, es por la presencia de enjambres sísmicos, los cuales son acumulaciones de micro-sismos en un tiempo determinado y de magnitudes relativamente invariantes (Stein y Wyssession, 2003).

Con relación a la actividad volcánica, algunos autores (Mogi, 1962; Scholz, 1968) han considerado que se pueden observar diferencias en el valor de  $b$  de los sismos registrados antes y después de alguna exhalación o explosión volcánica importante. Por ejemplo, en el volcán Kilauea los sismos VT usualmente incrementan en número antes de una erupción o intrusión magmática, y decrecen abruptamente y hasta desaparecen una vez que se inicia la actividad, dominando la actividad de LP y tremores armónicos. Similar comportamiento se ha observado en el volcán Popocatepetl en episodios de actividad importante como en noviembre de 1998 y diciembre de 2000 (Martínez-Bringas, 2006).

### **3.6 El Método de Máxima Verosimilitud**

Para el cálculo del valor  $b$  de base se utilizó el método de máxima verosimilitud debido a que es una técnica de mayor solidez que la de mínimos cuadrados, y se acerca más al valor real de  $b$  cuando el número de sismos grandes es variable (Shi y Bolt, 1980). Además, este método ajusta la recta al valor medio de los datos sobre la magnitud mínima de homogeneidad, incluida la máxima magnitud observada (Weichert, 1980), lo que a su vez normaliza el aporte que hacen los sismos de

diferentes magnitudes. Este método fue desarrollado por Aki (1965) a partir del propuesto por Utsu (1965), donde  $b$  está expresado por:

$$b = \log_{10} e (M/M_{min}) \quad (4)$$

donde  $M$  es el promedio de la magnitud de los eventos analizados y  $M_{min}$  es la magnitud mínima en una muestra dada. Aki (1965) utilizó temblores con magnitud mayor que  $M_0$ , y asumió que la probabilidad de la función de densidad  $f(M, b')$  está expresada por:

$$f(M, b') = b e^{-b'(M-M_0)}, M_0 \leq M \quad (5)$$

Donde  $b' = b / \log_{10} e$

Suponiendo que se tiene una muestra de  $n$  temblores, con magnitudes  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ . Entonces se define  $y_i$  y  $Y$  por las fórmulas:

$$y_i = \frac{\partial}{\partial b'} \log f(M, b'), \quad (6)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i$$

Del teorema de límite central, la distribución de la función  $Y$  será Gaussiana si  $n$  es suficientemente grande y si la media y varianza de  $y_i$  es finita. La media de  $y_i$  es cero, porque:

$$y = \frac{1}{b'} + M_0 - M \quad (7)$$

$$E(y) = \int_{M_0}^{\infty} y f(M, b') dM = b' \int_{M_0}^{\infty} \left(\frac{1}{b'} + M_0 - M\right) e^{-b'(M-M_0)} dM$$

La varianza de  $y$  puede obtenerse de:

$$E(y^2) = \int_{M_0}^{\infty} y^2 f(M, b') dM = b' \int_{M_0}^{\infty} \left(\frac{1}{b'} + M_0 - M\right)^2 e^{-b'(M-M_0)} dM \quad (8)$$

$$= \frac{1}{b'^2}$$

Por lo tanto la media de  $Y$  será cero, y la varianza de  $Y$  será  $n/b'^2$ .

De acuerdo con estos resultados, la probabilidad  $\varepsilon$  de  $b'Y\sqrt{n}$  que se encuentra dentro del rango de  $-d\varepsilon$  a  $+d\varepsilon$ , está dado por:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-d\varepsilon}^{d\varepsilon} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (9)$$

Para  $\varepsilon = 95\%$ ,  $d\varepsilon = 1.96$ , los límites de confianza están dados por:

$$-1.96 \leq b'Y\sqrt{n} \leq 1.96, \quad \text{esto es } -1.96 \leq \frac{b}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^n (\frac{1}{b'} + M_0 - M_i) \leq 1.96$$

Esto puede ser escrito en términos de  $b'$  como:

$$\frac{(1-\frac{d\varepsilon}{\sqrt{n}})}{\sum_1^n \frac{M_i}{n} - M_0} \leq b' \leq \frac{(1+\frac{d\varepsilon}{\sqrt{n}})}{\sum_1^n \frac{M_i}{n} - M_0} \quad (10)$$

El valor central de  $b'(\frac{1}{\sum_1^n \frac{M_i}{n} - M_0})$  en el rango anterior  $Y = 0$  es la solución.

Este es el valor de  $b'$  el cual maximiza la función de probabilidad  $\prod_i f(M_i, b)$ . El correspondiente valor de  $b$  está dado por la fórmula de Utsu (1965) y la desviación estándar de  $b$  ( $\sigma_b$ ) con un nivel de confianza del 95% por  $\sigma_b = b/n$ .

### 3.7 El software ZMAP

Parte del procesamiento de datos se realizó con el programa ZMAP (Wimer, 2001). Con ZMAP se calculó el valor  $b$ , se realizaron histogramas de magnitud, profundidad y se analizaron los resultados del acumulado de sismos. ZMAP se basa en un grupo de subrutinas escritas en lenguaje **MATLAB**<sup>®</sup>. Por esta razón, para utilizarlo, se requiere la paquetería de **MATLAB**<sup>®</sup>. El principal objetivo de estas subrutinas es analizar datos sismológicos y catálogos sísmicos.

ZMAP es una poderosa herramienta, con la cual podemos realizar infinidad de tareas en lo referente al análisis de la sismicidad de un determinado lugar. Con esta herramienta podemos elaborar mapas 3D de los sismos, generar histogramas, observar series de tiempo para diferentes parámetros, hasta crear mapas, perfiles y modelos 3D del valor  $b$ . Este programa fue implementado por Stefan Wiemer, el cual posteriormente fue mejorado por Ramón Zúñiga (comunicación personal). A partir de estas mejoras se obtuvo la primera versión la cual fue

distribuida internacionalmente y fue respaldada con una manual (Wiemer y Zuniga, 1994). A través del tiempo varios investigadores han colaborado con nuevas rutinas las cuales se han sumado a ZMAP, lo cual lo ha hecho más completo.

ZMAP está creado para que los usuarios no requieran conocimientos de programación para poder utilizarlo. Sin embargo, se puede acceder a todos y cada uno de los códigos de las rutinas y subrutinas que utiliza para modificarlos de acuerdo a nuestras necesidades. La paquetería de ZMAP es libre y se puede descargar desde internet, en donde también se encuentran pequeñas introducciones y manuales (<http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/ZMAP/intro.html>).

### **3.8 Variaciones temporales de la energía sísmica liberada en base a la magnitud**

La cantidad de energía que se libera al generarse un terremoto, puede obtenerse teóricamente por medio de la relación Gutenberg – Richter (1958):

$$\text{Log}_{10} E = 11.8 + 1.5 M \quad (11)$$

En donde la energía  $E$  se expresa en Ergios de la Magnitud y representa la cantidad de energía irradiada por el terremoto en forma de ondas sísmicas, lo que corresponde a una fracción de la energía total transferida durante un terremoto (Bullen, 1985).

La ecuación (11) se utilizará para calcular la liberación de energía diaria, semanal, mensual y anual de los sismos asociados a la actividad del Popocatepetl. También, con esta ecuación se estimarán los acumulados de energía en los mismos intervalos de tiempo. El evento más grande en un año, por lo general, representa aproximadamente el 50% de la liberación de energía sísmica anual total (Berrios, 2013).

### **3.9 Variaciones de la profundidad de los eventos registrados**

Las diversas señales que se registran de un volcán, podrían tener su origen en el fracturamiento de rocas circundantes dentro del conducto volcánico como respuesta a la acumulación y traslado del magma, al movimiento de gases y a los cambios de presión y temperatura a la que están sometidos los volcanes en actividad. Estas señales pueden ser registradas por los sismógrafos que se instalan alrededor de un volcán. El tamaño y la forma de dichas señales dependen básicamente de la intensidad de los diferentes procesos geofísicos que se desarrollan en un volcán activo (Minakami, 1974).

Los diferentes estudios sismológicos realizados sobre diferentes volcanes en el mundo han permitido observar la existencia de una gran variedad de señales que pueden ser atribuidas a dos procesos (Zobin, 2003). El primero considera a las señales que brindarían información sobre las características físicas de la fuente, tales como la ruptura de la roca sólida que rodea al volcán, traslado o acumulación de magma, circulación de fluidos, gases y en superficie la emisión de fumarolas. El segundo proceso, está relacionado con el camino que siguen las ondas sísmicas a través de los diversos estratos de los que está constituido el volcán y que luego pueden ser observados e identificados en la forma del registro de la señal (superposición de varias fases). Sin embargo, se debe tener en cuenta que la fuente que genera estas señales no es muy conocida y el medio de propagación puede alterar significativamente la forma y el contenido espectral de las señales. A diferencia de las señales que se producen en zonas de contacto de placas o deformación en superficie (fallas), las señales volcánicas son más diversas debido principalmente a la complejidad de los procesos geofísicos que tienen lugar en cada volcán (Zobin, 2003).

Las señales sísmicas se pueden generar en cualquier punto del sistema volcánico. Sin embargo, el tipo de sismicidad depende del estado físico de los fluidos magmáticos en cada etapa del ascenso de estos, por lo cual dependiendo de la profundidad en que se genera una señal sísmica será la etapa en que se encuentra el fluido que puede estar próximo a liberarse.



### 3.10 Correlación de los parámetros sísmicos con la actividad volcánica

Las variaciones de los parámetros sísmicos que serán objeto de este estudio, se correlacionarán con las principales erupciones volcánicas y explosiones mayores del Popocatepetl registrados desde su reactivación. Como se señaló anteriormente, el propósito es identificar si existen variaciones de los parámetros sísmicos analizados con las principales erupciones recientes del volcán Popocatepetl.

#### 3.11 t- test

Con la finalidad de identificar posibles variaciones de  $b$  antes y después de cada evento, se obtendrán los promedios pesados de cada período para cada parámetro analizado. Con el propósito de determinar si los cambios observados son significativos, se aplicará la prueba t-student (Mendenhall, 1979), considerando cada valor promedio como un grupo:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (12)$$

donde  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  representan los dos valores promedios comparados. Los valores de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  representan los errores o desviación estándar de la distribución de cada población;  $n_1$  y  $n_2$  es el número de componentes utilizados.

El valor resultante proporciona el grado de confianza entre dos diferentes valores. Por ejemplo, si t-test es igual a 0.68 indica que los límites de confianza son del 75%, si es igual a 1.0 los límites serán del 85%, si es igual a 1.7 serán del 95% y si es  $\geq 2.5$  serán del 99% (Mendenhall, 1979).

## Capítulo 4 Resultados: Correlación de los parámetros sísmicos con la actividad volcánica.

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de las variaciones temporales del valor de  $b$  durante los eventos importantes registrados en el volcán Popocatepetl de enero de 1995 a diciembre 2014. En estos trabajos se han analizado las variaciones temporales del valor de  $b$  antes y después de la ocurrencia de sismos (Carter y Berg, 1981; Smith, 1986; Kebede y Kulhanek, 1994), encontrándose cambios significativos que podrían ser considerados como precursores de sismos grandes a moderados. Para el caso de la actividad volcánica, se han encontrado variaciones temporales de  $b$  antes y después de un evento eruptivo (Cao y Gao, 2002; Molina y Ruiz, 2002; Legrand *et al.*, 2004 Martínez-Bringas, 2006;) por lo que también se ha considerado que puede ser un parámetro útil para el pronóstico de erupciones a corto plazo.

Para determinar la relación entre los parámetros objeto de este estudio (sismicidad, liberación de energía, número de sismos y profundidad), se realizó una recopilación de la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl (Tabla 4). Se muestran los periodos de actividad más importantes durante 1995- 2014. Se describe el tipo de actividad, la columna de ceniza más alta registrada, las horas de duración del temblor, entre otras características.

Tabla 4. Características de los principales periodos eruptivos que ocurrieron a lo largo de 1995 al 2014 en el volcán Popocatepetl (CENAPRED, 2015).

Fecha/ Parámetro	VEI	Tipo de actividad	Máxima altura de la columna (km)	Horas de temblor	SO <sub>2</sub>	Otros
21-dic-94						Emisión de ceniza después de casi 70 años de inactividad
5 marzo- 30 de abril 1996		Explosión				Crecimiento del primer domo en el fondo del cráter, una explosión importante fue la causante de la destrucción de este primer domo.
28 Octubre- 29 de Diciembre 1996	Erupciones variadas	Erupción				Erupciones importantes.
15 de marzo - 30 de Junio 1997	2.-3	Erupción	8	10 h		Esta erupción del 30 de Junio fue precedida por una serie de VT's , también se registro la presencia de temblor armónico. Se tuvo la presencia de flujos los cuales tenían dimensiones de 1-2 km de longitud
12 de Agosto- Octubre 1997			2			Destrucción y emplazamiento de lo domos.
1 de Enero del 1998			5			Erupción moderada, emisión de ceniza , incendio de algunos pastizales debido a la actividad del volcán.

21 de Marzo- 28 de abril 1998		Explosión	5			Caída de material incandescente 4km alrededor y caída de ceniza.
10 de Mayo- 13 de Julio 1998		Emisión de Vapor		15 min		Destrucción del 8° domo
13 de Agosto-31 de Agosto 1998		Explosión	5			VT con M 3.9 y una profundidad de 11.5 km , presencia de tremor armónico de baja amplitud.
8 de Septiembre 24 de Septiembre 1998		Exhalación y Explosión		7 h		Caída de ceniza.
5 de Octubre -17 de Diciembre 1998		Exhalación y Explosión	4	12 min espasmódico		En este lapso el volcán tuvo un incremento en su actividad sísmica, presentó tremor, explosiones continuamente y caída de ceniza, todo esto se atribuye a la destrucción de 9° domo.
2 de Marzo- 4 de Abril 1999		Exhalación y Explosión	2			Caída de ceniza en lugares cercanos al volcán, generación de pequeños flujos.
30 de Junio- 30 de Agosto 1999		Exhalación				ocurrió un sismo regional , el volcán presento VT's >3 y profundidades de 4-7 km. Se formaron lahares .
Septiembre - 4 Octubre 1999		Emisión de gas y vapor de agua, exhalaciones.	4			VT's M 2.2- 3.2 , caída de ceniza.
3 de Noviembre- diciembre 1999		Exhalación	3			Episodios de tremor armónico, VT's M < 3, emisión de ceniza.
7 de Enero - 2 Abril 2000		Exhalación y Erupción				Tremor armónico el cual se asocia al crecimiento del 10° domo, caída de ceniza.
9 de Mayo- 10 de Agosto 2000		Exhalación y Explosión	5			Caída de ceniza, presencia de tremor armónico.
Septiembre - 3 de Noviembre 2000		Exhalación y Explosión	6			Anomalías intensas de radiación térmica. Presencia de tremor armónico, caída de ceniza, 1° de Nov se tuvo un enjambre de VT's , lo cuales e realciona con el crecimiento de 12° domo.
2 de Diciembre 2000- 30 de Enero 2001	3.-4	Erupción	16	34	70200	Emisiones de ceniza, tremor armónico de gran amplitud. El volumen de lava emitido va de 15-19 millones de m3. Se generaron flujos y lahares.
10 de Diciembre - 31 de Diciembre 2001		Exhalación y Explosión	4	11		Registro de VT's M 2.2 y profundidad 5km , columnas de ceniza, generación de balísticos.
7 Enero - 23 de Enero 2002		Erupción baja amplitud	0.8	1.5		Exhalaciones y explosiones, emisiones de ceniza. Esto se atribuye al emplazamiento del domo 18.
19 de Febrero- 29 de Febrero 2002		Exhalación	700	8		Exhalaciones y explosiones, emisiones de ceniza
21 de Mayo- 5 Septiembre 2002		Exhalación y Erupción	2	20		Formación y destrucción de domos. Gran cantidad de VT's durante este periodo.
6 de Noviembre - 23 de Diciembre 2002		Exhalación y Erupción	5	6		Formación y destrucción de domos, generación de columnas de ceniza, presencia de tremor armónico.
4 de Febrero- 17 de Abril del 2003		Exhalación y Erupción	5	6		Destrucción del domo 25° , caída de ceniza, generación de balísticos. Volumen de 800,000 m3 de lava, posteriormente debido a la subsidencia se redujo a 300,000m3.
10 de Mayo- 6 de Agosto 2003		Explosión, Erupción y Exhalación.	3	95		Esta activida se cree que esta relacionada con la destrucción de domo 26.
9 de Marzo -30 de Julio del 2005		Explosión, Erupción y Exhalación.	2			Destrucción del domo 27°, generación de columna de cenizas las cuales caen en la poblaciones cercanas, presencia de tremor armónico de variadas amplitudes.
11 de Noviembre 2005 - 30 de Enero 2006		Explosión, Erupción y Exhalación.	5	30 min		Crecimiento del domo 28°.
25 de Julio - 6 de Diciembre 2006		Exhalación y Explosión	5			Presencia de tremor armónico de baja amplitud a tremor armónico de alta amplitud. Los inclinómetros presentaron deformación.

Mayo- Diciembre 2007		Explosión, Erupción y Exhalación.	3	10		Caída de cenizas en pueblo aledaños al volcán. Generación de tembor armónico de baja a alta amplitud.
5 de Enero- Junio del 2008		Exhalación y Explosión	3	63 min		Destrucción del domo 29°, crecimiento del domo 30° y 31°. Caída de cniza en poblaciones aledaños. Tembor armónío de alta amplitud. Presencia de Boro en algunos manantiales cercanos al volcán.
21 de Enero - 2 de Abril del 2009		Exhalación	2	4.35		Destrucción y emplazamiento de domos, producción de columnas de cenizas las cuales se depositaron en poblaciones cercanas al volcán.
10 de Septiembre- 21 de Noviembre 2009		Erupción Freática, Exhalaciones y Explosiones	3	34 min		Destrucción del domo 32°.
20 de Enero- 25 de Junio del 2010		Erupción de tipo Vulcaniano, Exhalaciones y Explosiones	3	52		Crecimiento del domo 33°. Presencia de Boro en manantiales. Destrucción del domo 33°
29 de Agosto- 23 Diciembre 2011		Explosión, Erupción y Exhalación.	2.5	25 min	5000 t/d	Destrucción y emplazamiento de domos, producción de columnas de cenizas las cuales se depositaron en poblaciones cercanas al volcán. Generación de flujos en las laderas del edificio volcánico. El 20 de Noviembre se presentó una explosión la cual se percibió hasta Laguna Verde, Ver.
16 de Abril 2012		Explosión y exhalación	1.5	45min		Destrucción y emplazamiento de domos, generación de columnas de ceniza, presencia de tembor armónico.
20 Julio del 2013		Explosión y exhalación	0.8		6 700 t/d	
11 de Febrero- 11 de Julio 2014		Erupción , Explosión	4		22 000 t/d	Destrucción y emplazamiento de domos, generación de columnas de ceniza, presencia de tembor armónico.
2 de Septiembre- Diciembre 2014		Explosión y exhalación			14,600t/d	Domo N° 53 tuvo un vol de 1.47 millones de m <sup>3</sup>

#### 4.1 Número de sismos

Utilizando el catálogo de 2790 VT's que comprenden este estudio, se realizó una serie de análisis estadísticos para determinar si estos tenían alguna relación con la actividad sísmica. El rango de magnitudes de los VT varía de magnitud 1 a 4.1 (el más grande ha sido registrado el 6 de mayo del 2013). El 71.21 % del total de se encuentran entre las magnitudes de 2.1- 3.9 (Figura 18).

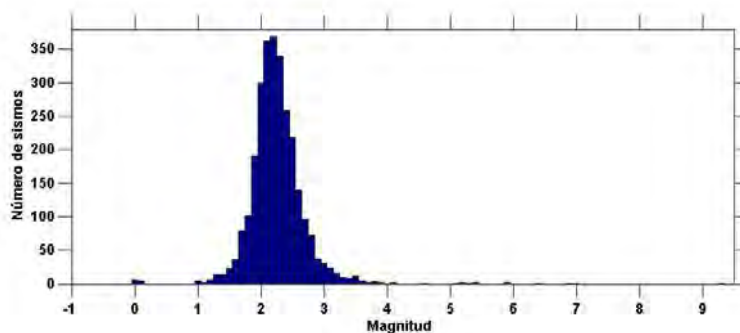


Figura 18. Distribución de magnitudes de los 2790 sismos VT localizados de enero de 1995 a diciembre de 2014 en los alrededores del volcán Popocatepetl.

La interpretación grafica de los cambios en el número diario de sismos ha sido utilizada para pronosticar erupciones, basándose en el número de eventos que ocurren durante los días previos a la erupción. Tal es el caso del volcán Asama, Japón, en el que Minakami (1960; 1974) basó su pronóstico en el aumento sistemático del número de eventos que ocurrieron durante los cinco días previos a la erupción.

En la Figura 19 se presenta la distribución de los eventos VT ocurridos durante el período analizado en este estudio. En promedio, se registraron 12 sismos por mes. Los años de 1997, 2002, 2013 y 2014 son los que mayor número de VT registraron. Durante esos dos años ocurrieron el 37% del total de sismos detectados durante los 19 años de actividad aquí analizados.

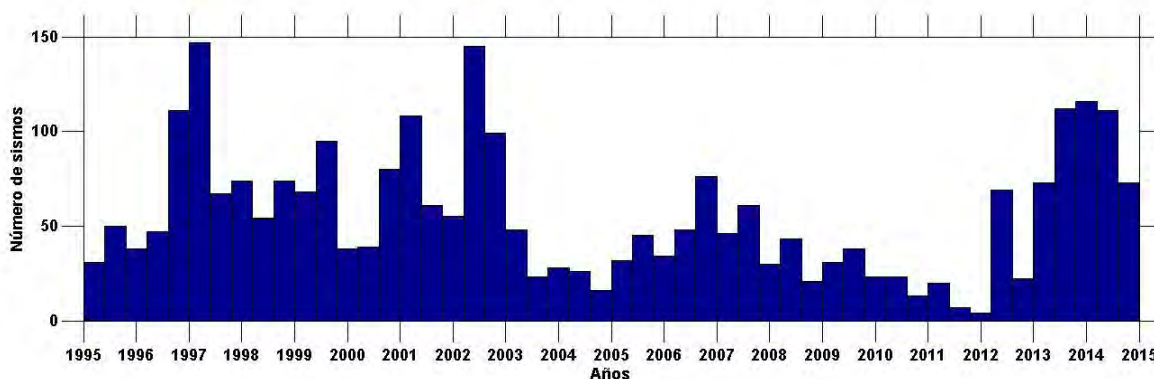


Figura 19. Distribución de los eventos VT registrados de enero de 1995 a diciembre de 2014.

Otro aspecto importante es el análisis del acumulado de sismos registrados durante los 19 años que comprende este trabajo. En la Figura 20 se muestra la gráfica acumulativa durante el período de estudio. Podemos observar que existe una pendiente suave aunque en algunos tramos se conserva estable y en otros experimenta un pequeño decrecimiento.

Durante el mes de febrero del año 1996 se registró un incremento en la cantidad de sismos, para posteriormente presentarse una erupción en los primeros días de marzo de ese año. Tenemos otro incremento de VT's en el mes de mayo del año 1999, este aumento en la cantidad de sismos precede a la actividad volcánica que se presentó en el mes de Junio del mismo año. Otro pico en el número de VT's se presenta a finales del año 2000. Este es uno de los periodos eruptivos de mayor importancia en lo referente a la actividad del Popocatepetl. También, puede observarse un

aumento en el número de sismos posterior a la erupción. Para el año 2002, tenemos un incremento en el número de los VT's lo cual podría ser antecesor a los eventos eruptivos del mes de noviembre del mismo año. Posteriormente, se presenta una baja en el registro de la sismicidad. En mayo del 2013 también se presenta un aumento en el número de los VT's y coincide con la erupción que se presentó en el mes de julio. En mayo del 2014 también se presenta un aumento en el número de VT's. Esto podría estar relacionado con la erupción de julio del mismo año.

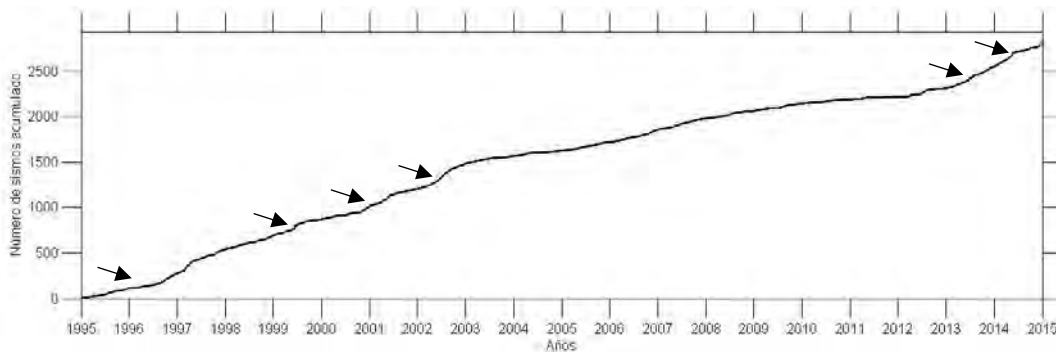


Figura 20. Gráfica acumulativa de los sismos VT con respecto al tiempo. Las flechas de color negro nos indican los aumentos en la cantidad de VT's registrados.

## 4.2 Valor $b$

Las variaciones temporales del valor  $b$  se estimaron utilizando el software Zmap (Wiemer y Zuniga, 1994) con el cual se analizaron los VT's por el método de máxima verosimilitud (Figura 21). En algunos años se puede apreciar un incremento de este valor, mientras que en otros se puede notar un considerable decremento del mismo.

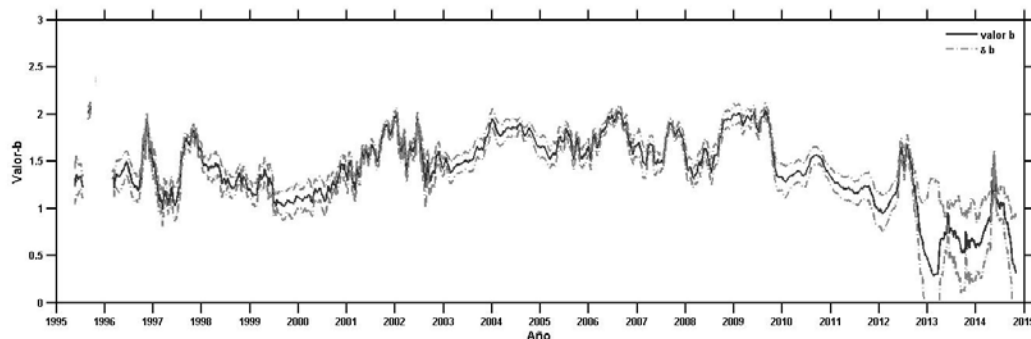


Figura 21. Variaciones del valor  $b$  de 1995 al 2014, la línea de color negro representa el valor  $b$  y las líneas de color gris representan la desviación estándar.

Para este estudio no se tomó en cuenta las dos zonas principales de VT's , se realizó un análisis indistinto del total de VTs registrados en el catálogo.

Estas variaciones del valor  $b$ , podrán estar relacionadas con los cambios internos del sistema volcánico. Algunos de estos procesos podrían ser, heterogeneidad del material, el nivel de esfuerzos a los que se encuentra sujeto el sistema volcánico y las variaciones de presión de poro. Otro motivo por el cual se puede presentar un alto valor de  $b$ , es por la presencia de enjambres sísmicos, los cuales consisten en la ocurrencia de gran cantidad de microsismos en un corto período determinado.

### **4.3 Periodos eruptivos de análisis**

De los 38 eventos eruptivos más importantes registrados durante el período de estudio (Tabla 4) se seleccionaron aquellos con más de 120 VT's registrados para asociarlos con las variaciones temporales de los parámetros de análisis. Esto con la finalidad de contar con periodos en los cuales se tenga la mayor cantidad de datos posibles para una mejor interpretación de los resultados. Otro factor que se consideró para la elección de los periodos eruptivos fue la presencia de actividad volcánica importante (altura de la columna, exhalaciones de gran tamaño, explosiones, caída de ceniza). Un total de 10 periodos fueron seleccionados considerando estos criterios (Tabla 5). Para el análisis de cada uno de los periodos se consideró la sismicidad y los parámetros de  $b$ , energía y profundidad tres meses antes de que se presentara la actividad del volcán y tres meses posteriores al evento.

**Tabla 5: Periodos seleccionados para realizar el análisis de los parámetros de estudio (valor *b* , energía, magnitud, número de sismos y profundidad).**

Periodos Eruptivos del Popocatepetl							
Periodo	Fecha/ Parámetro	VEI	Tipo de actividad	Máxima altura de la columna (km)	Horas de tremor	SO <sub>2</sub>	Otros
1	28 Octubre- 29 de Diciembre 1996	Erupciones variadas	Erupción				Erupciones importantes.
2	15 de marzo - 30 de Junio 1997	2.-3	Erupción	8	10 h		Esta erupción del 30 de Junio fue precedida por una serie de VT's , también se registro la presencia de tremor armónico. Se tuvo la presencia de flujos los cuales tenían dimensiones de 1-2 km de longitud
3	12 de Agosto- Octubre 1997			2			Destrucción y emplazamiento de lo domos.
4	5 de Octubre -17 de Diciembre 1998		Exhalación y Explosión	4	12 min espasmódico		En este lapso el volcán tuvo un incremento en su actividad sísmica, presentó tremor, explosiones continuamente y caída de ceniza, todo esto se atribuye a la destrucción de 9° domo.
5	2 de Marzo- 4 de Abril 1999		Exhalación y Explosión	2			Caída de ceniza en lugares cercanos al volcán, generación de pequeños flujos.
6	2 de Diciembre 2000- 30 de Enero 2001	3.-4	Erupción	16	34	70200	Emisiones de ceniza, tremor armónico de gran amplitud. El volumen de lava emitido va de 15-19 millones de m3. Se generaron flujos y lahares.
7	21 de Mayo- 5 Septiembre 2002		Exhalación y Erupción	2	20		Formación y destrucción de domos. Gran cantidad de VT's durante este periodo.
8	25 de Julio - 6 de Diciembre 2006		Exhalación y Explosión	5			Presencia de tremor armónico de baja amplitud a tremor armónico de alta amplitud. Los inclinómetros presentaron deformación.
9	20 Julio del 2013		Explosión y exhalación	0.8		6 700 t/d	El volcán entro en actividad considerable, se registró gran cantidad de exhalaciones
10	11 de Febrero- 11 de Julio 2014		Erupción , Explosión	4		22 000 t/d	Destrucción y emplazamiento de domos, generación de columnas de ceniza, presencia de tremor armónico.

### Periodo 1 (28 Octubre- 29 de Diciembre 1996)

Durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, 1996, se registraron erupciones de un grado importante. Para el mes de Octubre se tienen registradas dos erupciones el día 28 y 31. En el mes de noviembre los días 27, 28 y 29, y el 2, 5, 7 y 29 de diciembre (Espinasa Perena, 2012).

Durante el lapso del análisis que va de Julio de 1996 a marzo de 1997 se registraron 219 VT's, de los cuales 77 ocurrieron en los 3 meses anteriores al evento, 48 durante el evento y 94 se registraron posteriores al mismo.

Las magnitudes de los VT's son mayores a 1.5 y la mayoría se concentra entre M2 y M2.3. También podemos observar algunos eventos con magnitudes > 3. (Figura 22). Las profundidades para los VT's tienen una distribución variable que abarca desde los 2 km hasta los 18 km por debajo del volcán. La mayor concentración de sismos ocurre entre los 2 km y los 6 km. A los 5 km de profundidad se registraron 27 VT's (Figura 23).



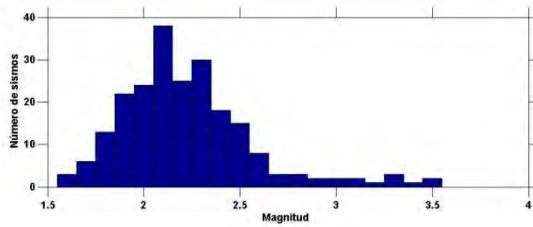


Figura 22. Histograma de magnitudes, los VT's registrados para el Periodo 1, nos muestra que se sitúan entre magnitudes de 2 y 2.5

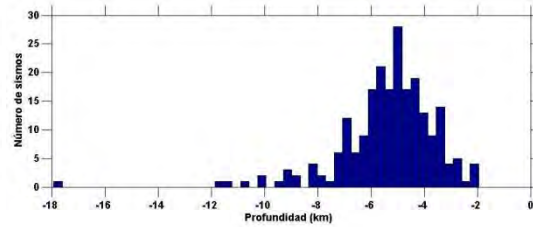


Figura 23. Histograma de profundidad, se muestra que los VT's analizados en el Periodo 1 se distribuyen en profundidades muy variadas que van de los 2 a los 6 km por debajo del volcán.

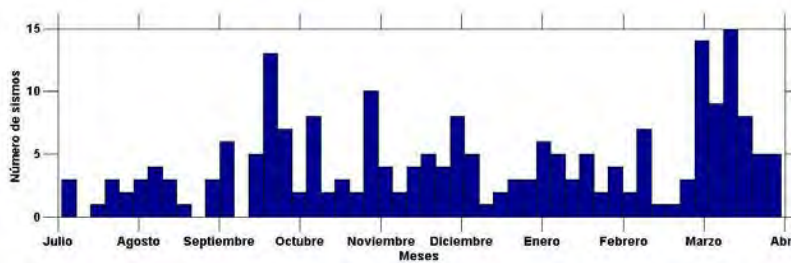


Figura 24. Distribución de VT's en el tiempo del mes de Julio a Abril

La cantidad de VT's registrada a lo largo de todo el periodo eruptivo (Figura 24) nos muestra que el número de eventos durante los meses de julio y agosto se mantuvo baja. A partir del mes de Septiembre se ve un aumento considerable en el número de eventos registrados. Durante los meses de octubre y noviembre también se presentaron picos considerables en la cantidad de eventos. A partir de diciembre, la cantidad de VT's disminuyó aunque en el mes de marzo volvió a incrementarse de manera considerable la presencia de VT's.

### Relación de parámetros

Tenemos que durante los primeros meses de este periodo eruptivo, el valor  $b$  se mantiene estable. Sin embargo, poco antes de iniciar el periodo de actividad, este valor presenta un aumento ya que de estar dentro de los valores de 1.4, súbitamente asciende hasta los 2 y al concluir la erupción este valor vuelve a descender hasta valores de 1. En este caso el valor  $b$  nos está indicando que el estado de esfuerzos antes del periodo eruptivo fue aumentando. Al generarse la erupción, este estado de esfuerzos disminuye debido a la liberación de material y gases. Después del lapso de actividad, el valor  $b$  se incrementa debido a que dentro del sistema volcánico se acumula material nuevo.

En lo que respecta al número de VT's, podemos decir que antes de que ocurriera el periodo eruptivo se presenta un incremento de este parámetro (Figura 24). En la Figura 25 se muestra el acumulado de los sismos del periodo 1. Se observa que la pendiente antes de la etapa de actividad es estable y a partir del mes de Septiembre está pendiente presenta un pequeño incremento para posteriormente mantenerse estable de nuevo. Al finalizar el periodo, se presenta un leve cambio de pendiente y en el mes de marzo se registra nuevamente un cambio significativo en la pendiente.

La energía se comporta de manera similar al acumulado de los sismos, ya que a principios del periodo se presenta una pendiente estable. A partir del mes de septiembre la energía aumenta considerablemente; para finales del periodo se observa otro incremento importante en la cantidad de energía. Por último, en el mes de marzo al igual que con la cantidad de sismos registrados se tiene un aumento en la cantidad de energía liberada (Figura 25).

Antes del que se iniciara el periodo se puede observar que las magnitudes de los VT's varían entre 1.7 y 3 (Figura 25). Durante la fase eruptiva las magnitudes de los sismos se encuentran entre 2 y 2.5 grados. Después del periodo de actividad, las magnitudes registradas se presentan de 1.7 a 3.5 grados. En cuanto a la profundidad, podemos observar que no existen cambios significativos para poderlos correlacionar con los parámetros como la magnitud, la energía, valor  $b$  y el acumulado de los sismos.

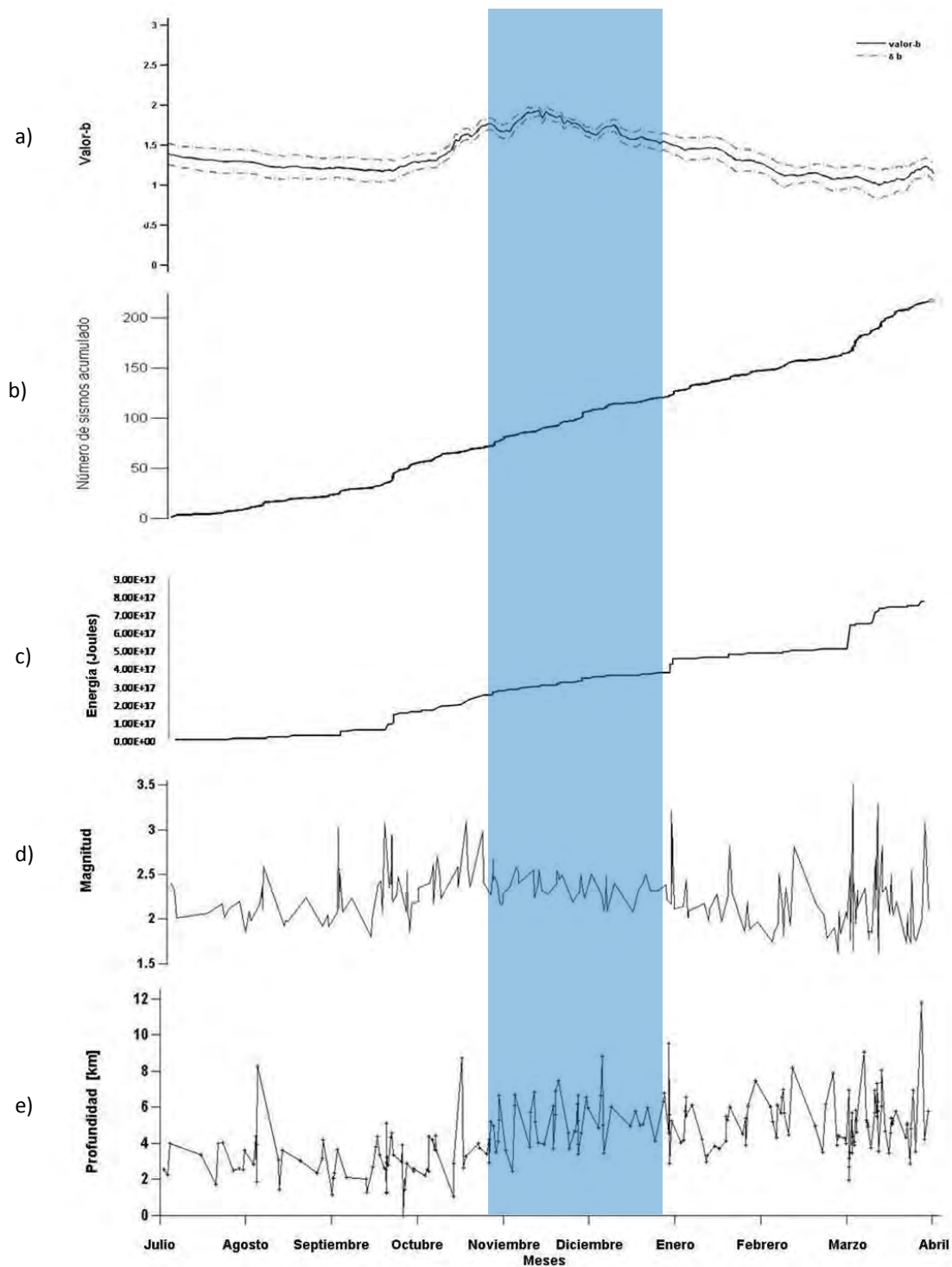


Figura 25. Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Periodo 1. La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor *b*; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.

## Periodo 2 (15 de marzo - 30 de Junio 1997)

El día 15 de marzo de 1997 tuvo lugar el emplazamiento del tercer domo, su destrucción fue principalmente por explosiones, las más importantes ocurrieron el 24 de abril y el 11 de junio, y sobre todo el 30 de junio. La erupción del día 30 de Junio fue precedida por una serie de VT's con magnitudes entre 2 y 2.7. La aparición de tremor en el registro sísmico indicó el inicio de la erupción que tuvo dos pulsos principales (Espinasa-Pereña, 2012).

Se generó una pluma que alcanzó los 8 km por encima del volcán (Espinasa-Pereña, 2012). Durante las siguientes horas se reportó caída de ceniza en muchos poblados alrededor del volcán incluyendo la ciudad de México. La intensidad de la erupción alcanzó un índice de explosividad volcánica (VEI) de 2 a 3.

Durante el lapso del análisis que va de diciembre de 1996 a agosto de 1997, se tiene registrada la cantidad de 251 VT's, de los cuales 91 VT's ocurrieron en los 3 meses anteriores al evento, 94 VT's ocurrieron durante el evento y 67 VT's se registraron posteriores al evento (Espinasa Perena, 2012).

Las magnitudes en las cuales se presentan los VT's son mayores a 1.5 y, entre M2 y M2.3 se concentra la mayor cantidad de VT's registrados, también podemos observar que se registraron algunos eventos con magnitudes <3 (Figura 26).

Las profundidades para los VT's del periodo 2 tienen una distribución muy variable, que abarca desde los 2km hasta los 18 km por debajo del volcán; la mayor concentración de los sismos va de los 2km hasta los 6km y podemos observar que a los 5km se tiene el registro de 27 VT's. (Figura 27).

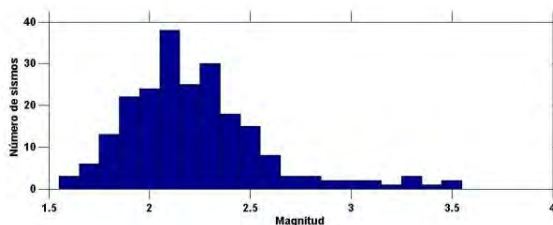


Figura 26 Distribución de magnitud para los 251 VT's que ocurrieron en el Periodo 2. Se observa que la mayoría de los VT's tienen una magnitud entre los 2 y 2.5 grados

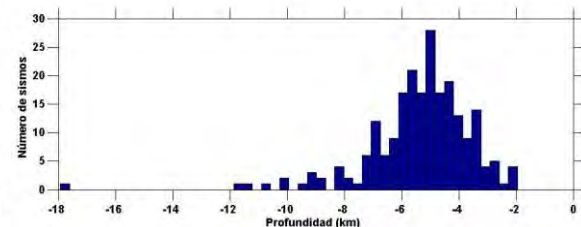


Figura 27. Histograma de profundidad. Se muestra que los VT's analizados en el Periodo 2 se distribuyen en profundidades que van de los 2 a los 6 km por debajo del volcán.

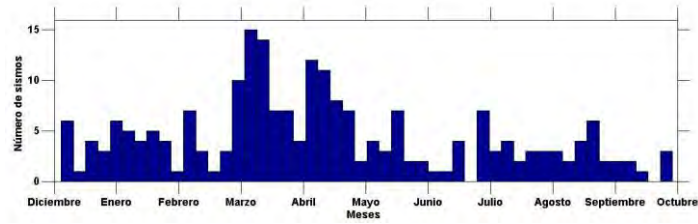


Figura 28. Distribución de VT's en el tiempo. Se observa que durante el mes de Mmarzo la cantidad de VT's tuvo un aumento considerable y fue decreciendo en fechas posteriores. El aumento en la cantidad de VT's puede ser atribuido al emplazamiento del tercer domo.

La Figura 28 nos muestra que durante los primeros tres meses antes de la erupción no se registraron tantos VT's por mes. A partir del mes de marzo que es el inicio del periodo eruptivo, podemos observar un gran incremento en la actividad sísmica la cual a finales del mes descendió drásticamente. Para el mes de abril la actividad volvió a presentar un incremento considerable. A partir de mayo, junio y julio se presentan algunos picos, aunque la actividad después de estos meses decrece de manera considerable.

### Relación de parámetros.

Durante los primeros meses del periodo tenemos un pequeño descenso en el valor  $b$ , de 1.6 a 1. A partir del comienzo del periodo eruptivo se presenta un pequeño aumento de 1 a 1.4. A mediados de junio se presenta un gran incremento en el valor  $b$  de 1.4 a 2. (Figura 29).

La Figura 29 nos muestra cómo va aumentando el número de sismos conforme al tiempo, se pueden observar que en los primeros meses hasta marzo la pendiente de los sismos es poco pronunciada. A partir del mes de marzo la pendiente se incrementó, sobretodo en el mes de abril y mayo; hasta finales del periodo en donde podemos observar que se presenta otro pequeño aumento de la pendiente.

Respecto a la energía, podemos decir que tiene alta relación con el acumulado de sismos (Figura 29). Durante el primer mes del periodo podemos observar como la pendiente va aumentando. En el mes de enero se presenta un aumento muy marcado en la pendiente de energía. De enero a marzo la pendiente se mantiene estable, a partir del primer día de marzo la energía presenta un gran aumento, este incremento continúa hasta principios de mayo. De mayo a julio la pendiente se mantiene estable, después de este lapso se presenta otro aumento en la cantidad de energía liberada. La energía liberada y la cantidad de sismos registrados se relacionan debido a que como

se observa en la Figura 29, la energía aumenta conforme aumenta la cantidad de sismos acumulados.

Las magnitudes que se presentan en los sismos registrados a lo largo del tiempo también se relacionan con los parámetros anteriormente mencionados ya que cuando se presentan sismos de mayor magnitud la energía presenta un aumento. Esta relación también se observa con el acumulado de los sismos.

La profundidad, al igual que en el periodo 2, no presentan relación con los otros parámetros ya que su distribución con el tiempo no presenta variaciones.

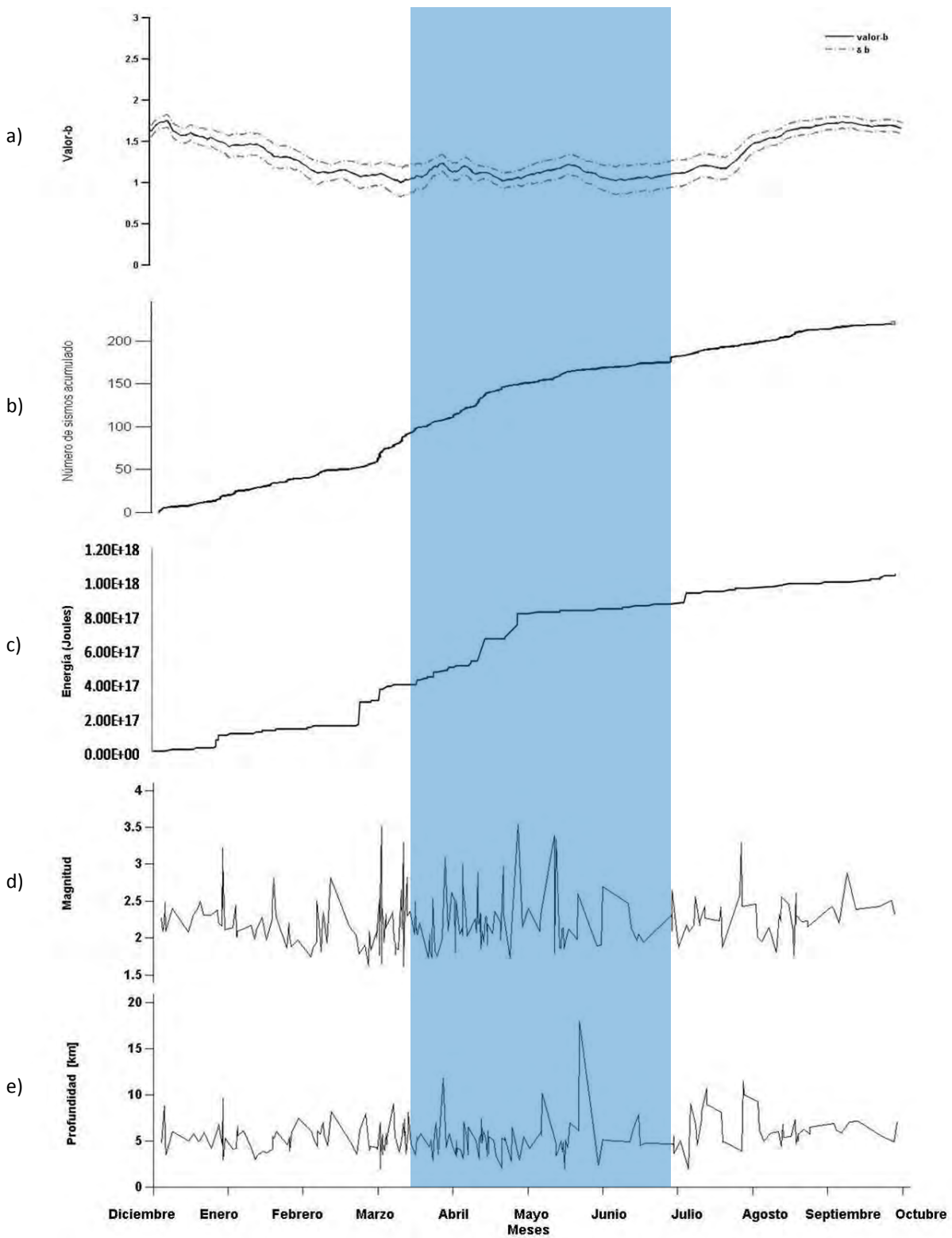


Figura 29. Variaciones temporales de los parámetros analizados. a) Variación temporal del valor  $b$  para el periodo de Julio a Abril. b) Gráfica del acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada durante el periodo analizado. d) Magnitud de los VT's registrados a lo largo del periodo. e) Profundidad registrada de los VT's. La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción.

### Periodo 3 (12 de Agosto- Octubre 1997)

El 12 de agosto se presentó una erupción moderadamente grande con la emisión de una columna de ceniza de 2 km de altura que provocó leve caída de ceniza y destruyó el cuarto domo. El 16 de agosto inicia el crecimiento del quinto domo que en octubre se elevó en forma de pistón (Espinasa Perena, 2012).

Durante el lapso del análisis que va de Mmayo 1997 a Febrero de 1998, se tiene registrada la cantidad de 144 VT's, de los cuales 51 VT's ocurrieron en los 3 meses anteriores al evento, 48 VT's ocurrieron durante el evento y 44 VT's se registraron posteriores al evento.

Las magnitudes en las cuales se presentan los VT's son mayores a 1.5. Entre M2.2 (26 VT's) y M2.3 (25 VT's) se concentra la mayor cantidad de VT's registrados. También se registraron algunos eventos con magnitudes <3 (Figura 30).

Las profundidades para los VT's del periodo, tienen una distribución muy variable, que abarca desde los 2km hasta los 18 km por debajo del volcán; la mayor concentración de los sismos va de los 4km hasta los 6km y podemos observar que entre los 4 y5 km se registraron 43 VT's (Figura 31).

La Figura 32 nos muestra que del mes de mayo a septiembre no se registró gran cantidad de VT's por mes. Durante este lapso se presentaron algunos picos de 7 VT's. A partir del mes de Septiembre se presenta un drástico descenso en el número de este parámetro. A finales del mes de octubre y principios del mes de noviembre la presencia de VT's aumenta drásticamente, después de este aumento la cantidad vuelve a disminuir.

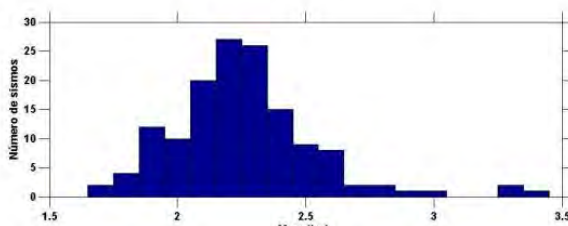


Figura 30. Los VT's registrados para el Periodo 3 nos muestran que estos se concentran entre magnitudes de 2.2 y 2.3.

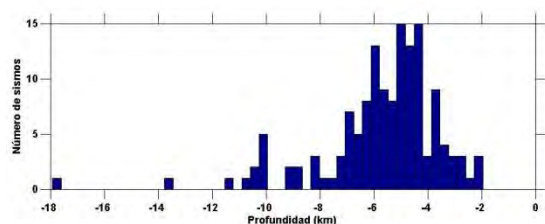


Figura 31. Para el Periodo 3 se tiene que los VT's se generan entre los 4.2 y 6 km de profundidad bajo el cráter del volcán.



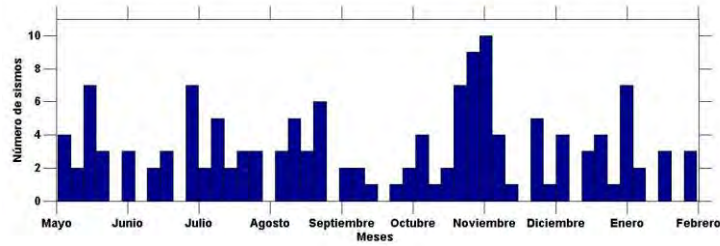


Figura 32. Distribución de VT's en el tiempo, se observa que durante el mes de Junio la cantidad de VT's tuvo un aumento considerable y fue decreciendo en fechas posteriores. Para finales de Julio el número registrado de VT's también tiene un aumento considerable. Finalmente para finales de Septiembre y durante Octubre de 1997 tenemos gran cantidad de VT's registrados.

### Relación de parámetros.

El valor  $b$  durante este periodo presenta variaciones antes, durante y después de la etapa de actividad, en los 3 meses antes de la erupción podemos observar que se presentan valores bajos de  $b$  de 1 a 1.2. A partir de agosto, el valor  $b$  presenta un aumento superando 1.5 y así continua durante todo el periodo de actividad. A mediados del mes de noviembre el valor comienza a decrecer lentamente hasta llegar a 1.4 (Figura 33)

El acumulado de sismos para este periodo cuenta con muchas variaciones, se observa que a mediados de Mayo la pendiente aumenta muy rápidamente, después de este brusco aumento la pendiente se mantiene estable. Durante el periodo eruptivo la pendiente no sufre de algún aumento considerable y la pendiente se mantiene estable. Al finalizar el periodo eruptivo la pendiente vuelve a sufrir de un aumento considerable, después de este aumento se mantiene estable. La energía liberada se sigue relacionando con el acumulado de sismo. Se puede observar que en las partes que se presenta un incremento en la pendiente, la cantidad de energía liberada también aumenta (Figura 33)

La magnitud de los VT's registrados también está relacionada con los dos parámetros anteriores. Se puede observar que cuando se presenta un evento de gran magnitud, se ve reflejado en la energía liberada y en acumulado de los sismos (Figura 33). Para este periodo podemos decir que las magnitudes a lo largo del tiempo son muy variables aunque dentro del periodo eruptivo se mantienen estables en rangos que no son muy variables.

La profundidad al igual que en el periodo 3 no presentan relación con los otros parámetros ya que no existe una clara variación de profundidades.

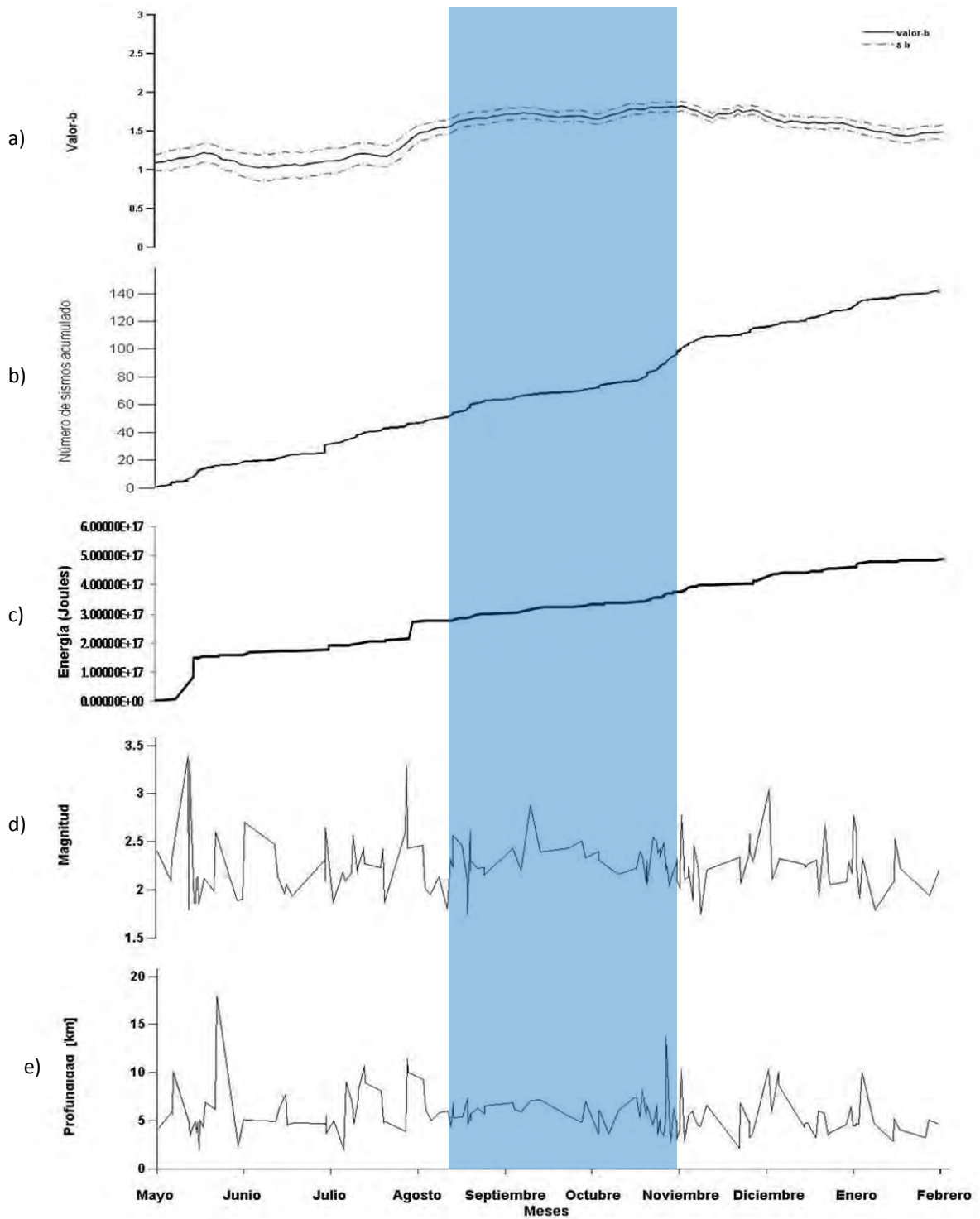


Figura 33. Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Periodo . La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.

#### **Periodo 4 (5 de Octubre -17 de Diciembre 1998)**

El 5 de octubre se registró una erupción explosiva por la noche. El 17 y 24 de octubre, ocurrieron otras explosiones moderadamente grandes. El resto de octubre e inicios de noviembre, el volcán presentó una actividad muy baja. El 9 de noviembre, ocurrió una explosión seguida por 12 minutos de tremor espasmódico. A partir del 22 de noviembre el volcán mostró un incremento sustancial en su actividad. Se detectaron exhalaciones continuas así como episodios de tremor e incandescencia en la boca del cráter. Para el día 23, el nivel de actividad sísmica era mayor que el día anterior, indicando el emplazamiento del noveno domo en el interior del cráter (Espinasa Perena, 2012).

El día 25 se presentó una explosión y el 26 cuatro explosiones más que emitieron columnas de ceniza. Como consecuencia, el radio de restricción se incrementó a 7 km del cráter del volcán. Los días 30 de noviembre y 1º de diciembre ocurrieron siete explosiones con cantidades regulares de ceniza, pero el 2 de diciembre sólo se presentaron tres exhalaciones moderadas, y la buena visibilidad hacia el volcán permitió hacer acercamientos al glaciar, en donde se vieron los cráteres producidos por los fragmentos calientes (Espinasa-Pereña, 2012).

El 7 de diciembre se presentaron tres explosiones moderadas y dos más pequeñas. El 8 de diciembre, ocurrieron cinco explosiones pequeñas que produjeron fumarolas de ceniza. El 9 de diciembre se presentaron otras dos explosiones pequeñas y se reportó incandescencia en el cráter por la madrugada (Espinasa-Pereña, 2012).

El 10 de diciembre continuó la actividad explosiva. El 17 de diciembre se presentó una explosión fuerte que lanzó fragmentos incandescentes en la cara norte del volcán. Para cerrar el año, el volcán generó un sismo volcanotectónico con magnitud 3.5 (Espinasa-Pereña, 2012). Todo el proceso observado a finales de noviembre y diciembre correspondió al crecimiento y destrucción del noveno domo. Se registraron 125 VT's de los cuales 31 VT's ocurrieron en los tres meses anteriores al evento, 45 VT's ocurrieron durante el evento y 49 VT's se registraron posteriores al evento.

Las magnitudes en las cuales se presentan los VT's van de 1.5 y llegan a superar los 3.5 grados. Se concentran entre los 1.9 y 2.1 grados. Para este periodo los eventos que mayormente se fueron de

una magnitud entre 1.9 grados y 2.1 grados. También se tiene el registro de cuatro eventos que superan M3 (Figura 34). Las profundidades de los VT's tienen una distribución variable que abarca desde profundidades de 3km hasta aproximadamente 12 km por debajo del volcán. La mayor concentración de los sismos varía entre los 4km y los 5 km. Podemos observar que a 4.5 km de profundidad se presentan 11 VT's. Por otro lado, 14 eventos que superan los 8km de profundidad(Figura 35).

La Figura 36 muestra la distribución espacial de los eventos durante el periodo. Al inicio, la cantidad de VT's es baja, aunque durante el mes de agosto ésta comienza a aumentar y posteriormente disminuye considerablemente. De octubre a enero la cantidad de VT's tiene un comportamiento de altas y bajas, después de este tiempo la cantidad de VT's aumenta considerablemente.

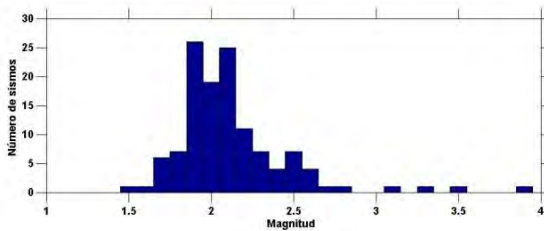


Figura 34 . Durante el Periodo 4 se presentan VT's en un rango de 1.5 a <3 grados de magnitud y se concentran principalmente entre 1.5 y 2.8 grados.

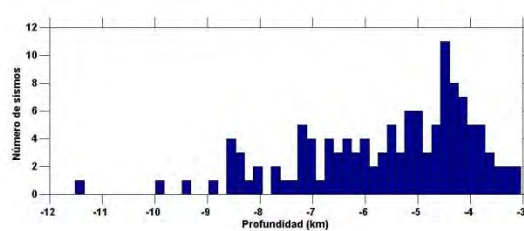


Figura 35. Las profundidades de los VT's para el Periodo 4 van de los 3 a los 11.5 km de profundidad respecto al volcán.

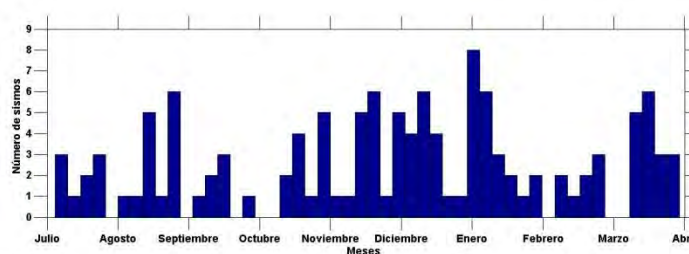


Figura 36 Durante el periodo 4 se aprecia claramente que en 6 de los meses que duro este periodo se presenta un registro alto de número de VT's , esto intercalado con periodos de poca presencia de VT's.

### Relación de parámetros.

Para el valor  $b$  podemos observar que los meses antes al evento el valor se mantiene constante en 1.5. Conforme transcurre el tiempo este valor decrece lentamente. Durante el periodo eruptivo

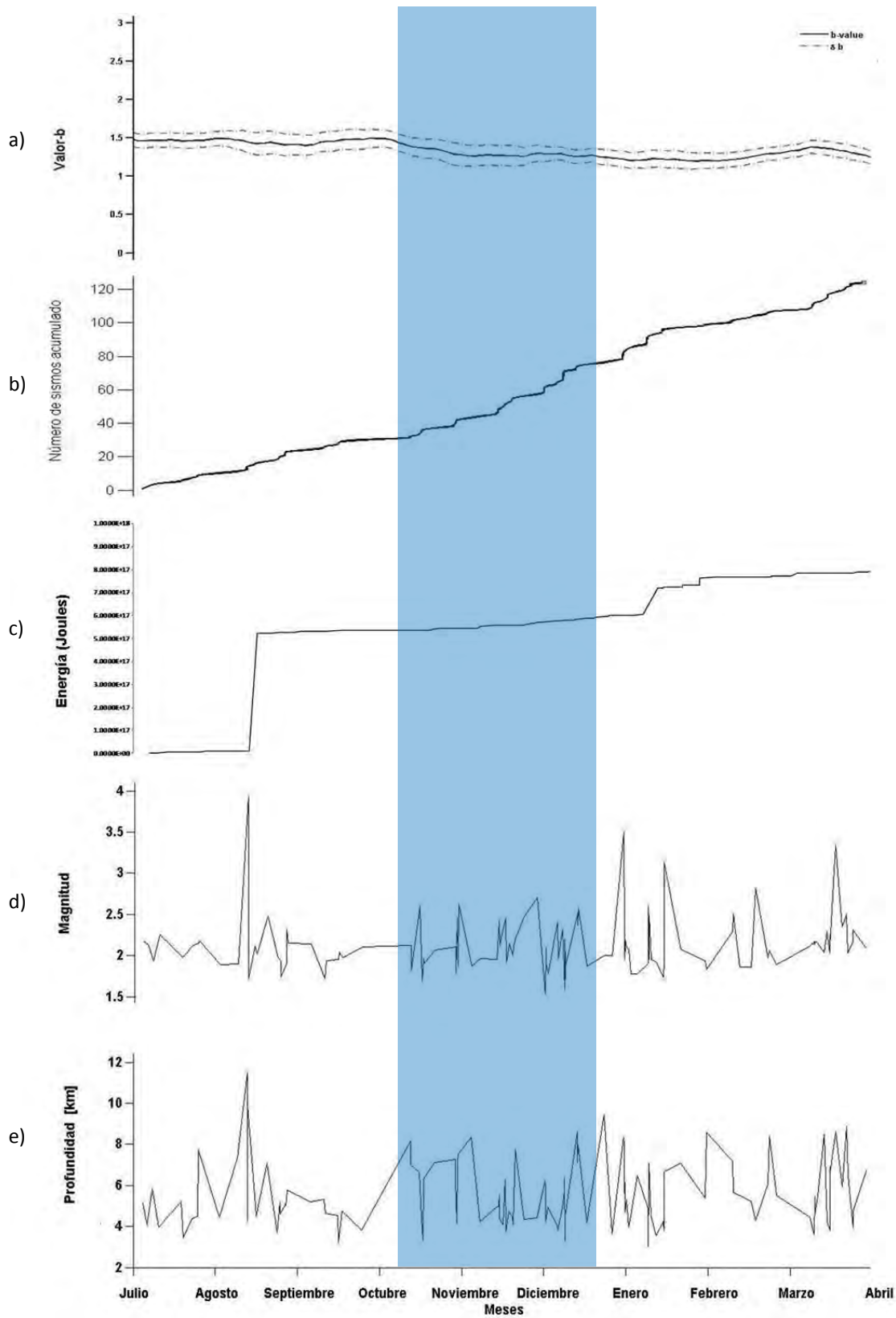
tiene variaciones insignificantes que no se ven a simple vista y el valor se mantiene en 1.4. Después del lapso de actividad este valor  $b$  se mantiene constante y presenta un pequeño aumento al final del período. Este cambio en  $b$  puede ser atribuido al cambio de esfuerzos durante el periodo (Figura 37)

En relación al número acumulado de sismos podemos observar que al inicio del periodo tenemos una pendiente la cual va aumentando conforme al tiempo de manera constante. Durante el periodo eruptivo la pendiente presenta un aumento y posteriormente se mantiene estable con algunos aumentos de pendiente menores. A mediados del mes de enero la pendiente vuelve a tener cambios, y de nuevo la pendiente se mantiene estable (Figura 37).

Con respecto a la cantidad de energía liberada podemos observar que durante el mes de julio y parte de agosto la energía se mantiene estable. Sin embargo, a mediados de agosto se presenta un aumento súbito el cual es consecuencia de un VT M4 (Figura 37). Posteriormente a este aumento la energía se mantiene estable. En enero podemos observar otro cambio de pendiente.

Las magnitudes registradas en este periodo son muy variables, de 1.5 a 4 grados. Se puede observar que el VT de M4 fue el que provocó un súbito aumento en la cantidad de energía liberada. Al presentarse un VT de considerable magnitud se ve reflejado en un cambio en la pendiente de la energía y también un pequeño cambio en la pendiente del acumulado.

La profundidad es variable durante este periodo ya que existen sismos muy someros y otros de gran profundidad, pero no se presenta alguna relación con los parámetros del estudio.



Figura

37. Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Periodo 1. La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.

### Periodo 5 (2 de Marzo- 4 de Abril 1999)

Durante el mes de marzo, la actividad del Popocatépetl sufrió un incremento con periodos de tremor armónico de baja amplitud que marcaron un nuevo crecimiento del noveno domo. El 2 de marzo hubo una exhalación moderada que emitió fragmentos incandescentes que no rebasaron la boca del volcán. Los días 12, 13, 18 y 20 de marzo ocurrieron explosiones moderadas con emisión de fragmentos incandescentes sobre el flanco norte del volcán. El 4 de abril ocurrió una explosión que fue escuchada en San Andrés Calpan, Puebla, e inclusive pudo verse la incandescencia. (Espinasa-Pereña, 2012)

Durante el lapso del análisis de diciembre de 1998 a Julio de 1999, se tiene registrada la cantidad de 141 VT's, de los cuales 43 VT's ocurrieron en los 3 meses anteriores al evento, 27 VT's ocurrieron durante el evento y 71 VT's se registraron posteriores al evento. Las magnitudes en las cuales se presentan los VT's van de 1.5 y llegan a 3.5 grados y se concentran entre los 1.9 y 2.4 grados. Para este periodo los eventos que más se registraron presentan una magnitud de 1.9 grados y 2 grados. También se tiene el registro de 8 eventos que superan M3. (Figura 38). Las profundidades para los VT's tienen una distribución muy variable que abarca desde profundidades de 2.5km hasta aproximadamente 12 km por debajo del volcán. La mayor concentración de los sismos se encuentra entre los 3.9 km y los 5 km de profundidad. Podemos observar que a los 4.5 km se registra 15 VT's. Tenemos la cantidad de 16 eventos que superan los 8km de profundidad (Figura 39).

La Figura 40 muestra la distribución espacial de los eventos durante el periodo eruptivo. Al inicio, la cantidad de VT's es relativamente alta comparada con el resto del periodo. Sin embargo, durante el mes de Junio aumenta considerablemente y posteriormente disminuye drásticamente.

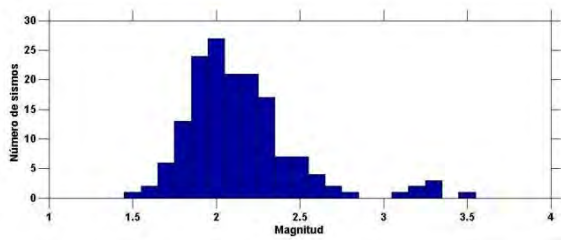


Figura 38. Las magnitudes de los VT's del periodo 5 se encuentran entre 1.6 a 3.5 grados de magnitud, entre 1.9 y 2.3 de magnitud es el rango en que se encuentran la mayor cantidad de VT's.

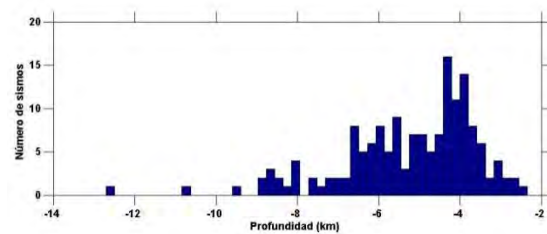


Figura 39. Las profundidades de los 141 eventos van de las 2.5 a los 12.5 km de profundidad, profundidades de 3.8 a 6.8 dominan.

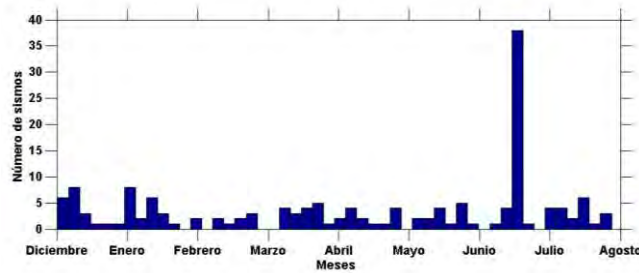


Figura 40. Para este periodo 5tenemos que en el mes de Diciembre tenemos varios VT's registrados, durante los meses posteriores se mantiene estable la cantidad de VT's registrados, pero a finales de Junio tenemos un registro de gran cantidad de VT's.

### Relación de parámetros.

Para el valor  $b$  podemos observar que los meses antes del evento éste se mantiene constante en 1.3 con algunos aumentos y disminuciones menores, conforme transcurre el tiempo este va creciendo lentamente. Durante el periodo eruptivo el valor aumenta, en este lapso presenta variaciones insignificantes. Después de la actividad este valor se mantiene constante y presenta un pequeño aumento a mediados del mes de junio, para después ir decreciendo lentamente. Este cambio en el valor  $b$  puede ser atribuido al cambio de esfuerzos durante el periodo (Figura 41).

El número acumulado de sismos podemos observar que presenta cuatro cambios de pendiente principales. El primero se presenta a la mitad de enero, en donde podemos apreciar un abrupto cambio de la pendiente, después se mantiene estable. Al comienzo del mes de enero se observa otro cambio importante en la pendiente la cual sigue aumentando hasta llegar a una etapa de estabilidad. Durante el periodo eruptivo la pendiente tiene un cambio considerable. Para el mes de Junio se presenta un drástico aumento de la pendiente, para después estabilizarse (Figura 41).

Con respecto a la cantidad de energía liberada podemos observar que durante el primer mes la energía se mantiene constante. A partir de enero esta presenta un aumento considerable que coincide con el aumento de la gráfica del acumulado (Figura 41). Para el mes de abril se presenta otro cambio importante en la pendiente y finalmente hasta el mes de julio se presenta otro cambio de pendiente importante. Las magnitudes registradas en este periodo son muy variables, de 1.5 a 3.5 grados. Como se ha visto en las erupciones anteriores la magnitud está relacionada con los parámetros mencionados anteriormente, aunque en este caso la magnitud no se empalma perfectamente con el incremento de liberación de energía ni con el aumento en la pendiente del acumulado de sismos (Figura 41). Podemos observar que el VT de M3.5 fue el detonante del



súbito aumento en la cantidad de energía liberada. Al presentarse un VT de considerable magnitud se ve reflejado en un cambio en la pendiente de la energía y también un pequeño cambio en la pendiente del acumulado.

La profundidad es muy variable durante este periodo, ya que existen sismos muy someros y otros de gran profundidad, pero no se presenta alguna relación con los otros parámetros del estudio.

no se presenta alguna relación con los otros parámetros del estudio.

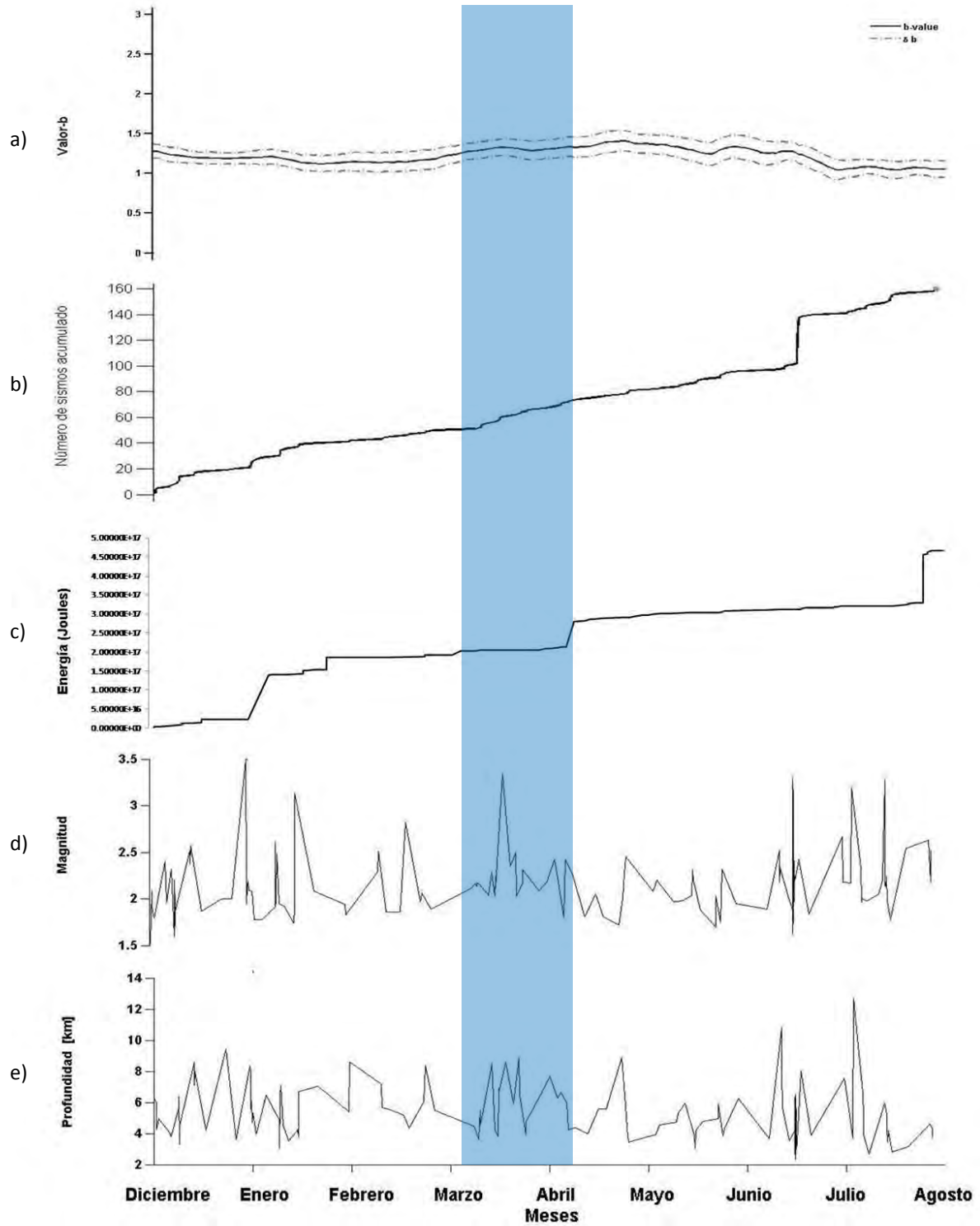


Figura 41. Variaciones temporales de los parámetros analizados. La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.

### **Periodo 6 (2 de Diciembre 2000- 30 de Enero 2001)**

El 2 de diciembre se presentó una larga exhalación con emisión de ceniza que duró cerca de 90 minutos. El 6 de diciembre ocurrió un enjambre de seis sismos volcanotectónicos de baja magnitud ( $M \sim 1.7-2.4$ ), seguido por otro enjambre similar los días 8 y 9 de diciembre. La actividad se incrementó el 12 de diciembre con un gran número de exhalaciones (hasta 200 por día), muchas de ellas con emisiones de ceniza que alcanzaron entre 5 y 6 km de altura. Por la noche era posible observar el resplandor del cráter y la emisión de fragmentos incandescentes. (Espinasa-Pereña, 2012). Una actividad similar, pero con menos exhalaciones aunque de mayor duración, se observó del 13 al 15, lo que produjo lluvias de ceniza en poblados cercanos.

El 15 de diciembre, se detectaron más episodios de tremor armónico de gran amplitud con duraciones de algunos minutos. Ese día, a las 14:04h, el tremor armónico creció a una asombrosa señal continua, con amplitudes que saturaron los instrumentos en todas las estaciones de monitoreo, incluyendo las más lejanas. Estas señales fueron sentidas por la gente a distancias de 12 a 14 km, y fueron registradas por estaciones de la Red Sismológica a distancias de más de 150 km del volcán. Este episodio de tremor armónico duró cerca de 10 horas y fue relacionado con extrusión de magma a una tasa muy alta (Espinasa-Pereña, 2012).

Una dramática caída en el nivel de actividad, ocurrió en la mañana del 16 de diciembre, y fue seguida 16 horas después por una nueva señal de tremor armónico de baja frecuencia y con amplitud creciente. Esta señal también alcanzó niveles de saturación en todas las estaciones de monitoreo sísmico, y duró cerca de 9.5 horas (Espinasa-Pereña, 2012).

Por primera vez desde que se instalaron, los inclinómetros detectaron las señales de tremor contemporáneas con los episodios de gran oscilación. La amplitud de las oscilaciones estuvo en el rango de los 100  $\mu\text{rad}$ , alcanzando amplitudes pico a pico de 200  $\mu\text{rad}$ . Entre el 13 y el 19 de diciembre las lecturas de  $\text{SO}_2$  realizadas con el espectrómetro de correlación (COSPEC) fueron mayores a las 50,000 ton/día. El 19 de diciembre se llegó a 100,000 t/d, contrastando con el promedio anterior de 5,000 t/d (Espinasa-Pereña, 2012).

En cerca de 25 horas de tremor armónico acumulado, la energía sísmica liberada por el volcán excedió la del resto del año 2000. El análisis de las fotografías aéreas indicó que el domo crecía a una tasa promedio de entre 180 y 200  $\text{m}^3/\text{s}$ , durante los episodios de tremor armónico saturado (Espinasa-Pereña, 2012).

Para el 15 de diciembre, la magnitud de las señales monitoreadas y la tasa tan alta de emisión de lava que había emplazado el domo más grande observado en el actual episodio de actividad, motivó a las autoridades de Protección Civil a declarar un incremento en el nivel de alertamiento y la definición de un radio de seguridad de 13 km, lo que incluía a varias poblaciones muy vulnerables, como Santiago Xalitzintla y San Pedro Benito Juárez, Puebla (Espinasa-Pereña, 2012).

El volumen total de lava fresca acumulada en el interior del cráter del volcán Popocatepetl el 18 de diciembre se estimó entre 15 y 19 millones de m<sup>3</sup>. Este valor excedió al de todos los volúmenes combinados de los domos anteriores (Espinasa-Pereña, 2012). De hecho, el crecimiento vertical estimado para el doceavo domo fue tal que otras 20 ó 30 horas más de crecimiento habrían hecho que la parte más alta del domo alcanzara el nivel más bajo del borde del cráter, lo que habría incrementado la probabilidad de un desbordamiento del domo.

El 22 de enero a las 14:58 h se presentó un sismo volcanotectónico de magnitud 2.8 localizado al este del cráter. Diecisiete minutos después inició una exhalación de vapor de agua que alcanzó 1 km de altura (Espinasa-Pereña, 2012). Una hora más tarde comenzó una exhalación grande de ceniza que pocos minutos después incrementó su explosividad, generando flujos piroclásticos que descendieron por varias de las cañadas del volcán hasta distancias estimadas de 4 a 6 km.

Los flujos que pasaron sobre el glaciar removieron cerca de 1 millón de metros cúbicos de hielo, esencialmente destruyendo completamente el glaciar 10, para transformarse en lahares o flujos de lodo (probablemente al incorporar hielo del glaciar), los cuales descendieron otros 15 km. Los lahares acarrearón bloques de hasta 0.5 m de diámetro. El ancho promedio del flujo fue de unos 7 metros. A las 16:40 h la columna eruptiva tenía una altura de 8 km sobre el nivel del cráter. Se trató de una erupción con un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) de 3 a 4. El 29 y 30 de enero el volcán presentó otras exhalaciones con carácter explosivo, que lanzaron pequeños fragmentos sobre la ladera oriental del volcán. Estas exhalaciones y explosiones no removieron más del 10-20% del volumen del doceavo domo, por lo que el antiguo cráter quedó prácticamente relleno hasta el borde, aunque con un cráter interno de unos 320 m de diámetro. (Espinasa-Pereña, 2012).

Para el análisis de este periodo se consideró la sismicidad y los parámetros de b, energía y profundidad tres meses antes de que se presentara la actividad del volcán y tres meses posteriores al evento. Durante el lapso del análisis del septiembre del 2000 abril del 2001, se tiene registrada la cantidad de 157 VT's, de los cuales 49 ocurrieron en los tres meses anteriores al evento, 33 durante el evento y 74 se registraron posteriores al evento.

Las magnitudes en las cuales se presentan los VT's van de 1.6 y llegan < 3 grados. Se concentran entre los 2.1 y 2.3 grados. Para este periodo los eventos que más se registraron presentan una magnitud de 2.1 grados. También se tiene el registro de 4 eventos que superan M3 (Figura 42).

Las profundidades para los VT's, tienen una distribución muy variable, que abarca desde profundidades de 2 km hasta 13 km por debajo del volcán. La mayor concentración de los sismos va de los 2 km hasta los 6 km de profundidad. Podemos observar que a los 5.2 km se registran 14 VT's. Un total de 8 eventos superan los 8km de profundidad (Figura 43).

Al inicio del periodo la cantidad de VT's es baja. A partir del mes de Noviembre el registro de VT's aumenta considerablemente que son los precursores a la gran explosión del 2000. En los primeros día de diciembre se presenta el mayor número de eventos. Durante el mes de Enero también se cuenta con una alta cantidad de VT's. Posteriormente, la cantidad de eventos registrados disminuye considerablemente y es hasta el mes de abril que vuelve a aumentar la cantidad de eventos registrados (Figura 44),

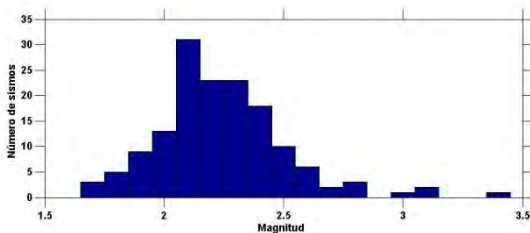


Figura 42. Durante este periodo se registraron sismos con magnitudes principalmente entre 1.6 y 2.7 grados, también se puede observar que se tiene registro de sismo con magnitudes < 3 grados.

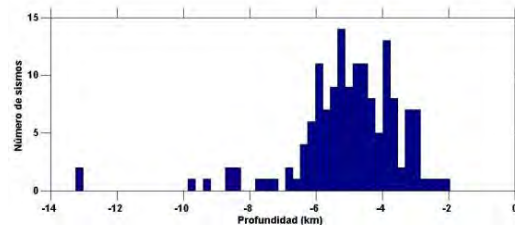


Figura 43. Las profundidades registradas para los VT's del periodo 6 van de los 2 a los 13 km bajo el volcán.

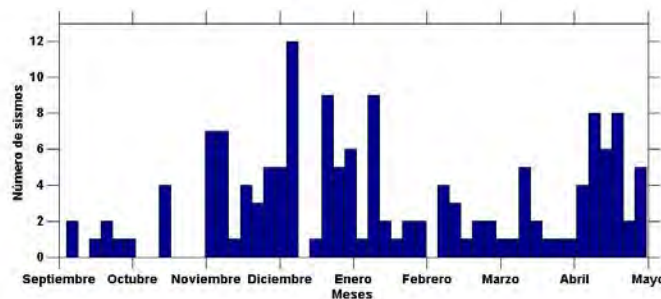


Figura 44. Par este periodo tenemos que durante los primero meses el número de VT's es muy alto, en la mitad del periodo es relativamente bajo y a finales vuelve a aumentar.

### Relación de parámetros.

Para el valor  $b$  podemos observar que los meses antes al evento el valor  $b$  se mantiene constante en 1.2 y conforme transcurre el tiempo. Éste va aumentando lentamente a 1.5 días antes del comienzo del periodo eruptivo. Durante el periodo eruptivo el valor disminuye en un inicio, después de esta disminución podemos observar que el valor  $b$  comienza a aumentar para después volver a disminuir y al final del periodo vuelve a aumentar. Después del evento  $b$  tiene un decremento (Figura 45).

La gráfica del acumulado de sismos nos muestra que durante los primeros meses del análisis tenemos que la pendiente crece de manera uniforme y presenta algunos cambios de pendiente menores. A partir del mes de noviembre esto cambia, ya que la pendiente tiene un aumento drástico que no se detiene hasta finales del periodo eruptivo. Al final del periodo se observa que es constante y que dejó de crecer con tanta rapidez (Figura 45).

Podemos observar que durante los primeros meses la energía liberada se mantiene constante. Días antes de que comience el periodo eruptivo esta presenta un gran aumento en la pendiente lo cual nos indica que algo está sucediendo con el cuerpo volcánico (Figura 45). Este aumento se ve frenado en el mes de febrero en donde la energía comienza a ser estable.

Las magnitudes registradas en este periodo son muy variables, de 1.6 a 3.4 grados. Como se ha observado en las erupciones anteriores, al registrarse un evento de alta magnitud éste repercute en la liberación de energía y en el acumulado de sismos (Figura 45). Durante el evento no se presentaron VT's de alta magnitud.

La profundidad es muy variable durante este periodo, ya que existen sismos muy someros y otros de gran profundidad, pero no se presenta alguna relación con los parámetros del estudio. En el análisis del periodo podemos observar que los VT's registrados se presentaron en un rango de 3 a 13 km.

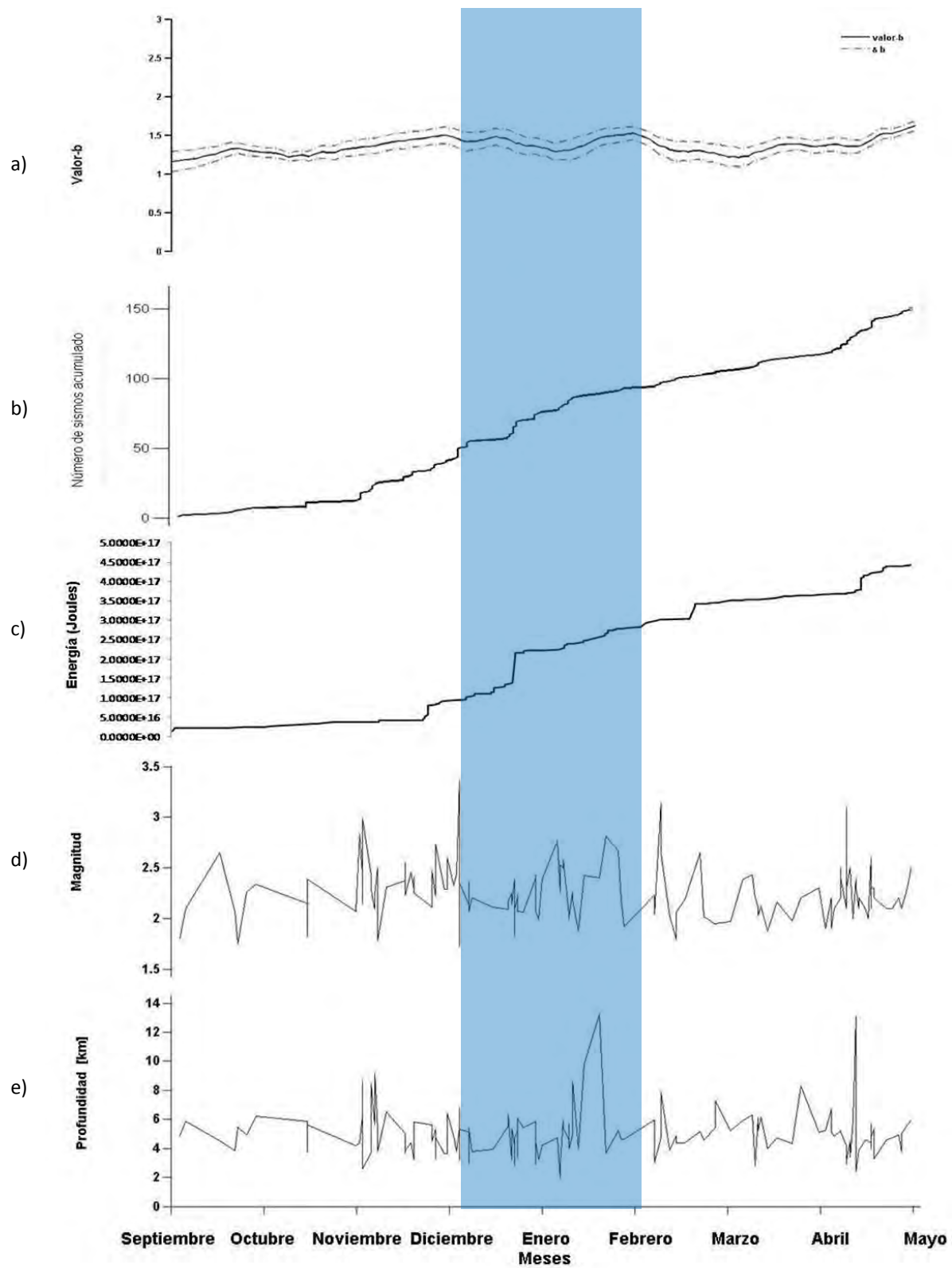


Figura 45. Variaciones temporales de los parámetros analizados. La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.

### **Periodo 7 (21 de Mayo- 5 Septiembre 2002)**

El 1º de mayo se registraron 41 exhalaciones de baja a moderada intensidad, acompañadas por vapor de agua, gas y ocasionalmente pequeñas cantidades de ceniza.

El 12 de mayo se registraron 44 exhalaciones de baja intensidad y 12 de regular intensidad que fueron acompañadas por ceniza. Poco después una explosión lanzó fragmentos incandescentes a menos de 500 metros del cráter. Al día siguiente se registraron 52 exhalaciones de baja a regular intensidad y el 14 se incrementó a 124 exhalaciones acompañadas en ocasiones por ligeras cantidades de ceniza mientras que el día 15 se presentaron 82 nuevas exhalaciones, culminando la destrucción del domo 19 (Espinasa-Pereña, 2012).

El día 18 se registró una exhalación seguida de 15 minutos de tremor, que produjo caída de ceniza fina en San Pedro Benito Juárez. Posteriormente una pequeña explosión lanzó fragmentos incandescentes a menos de 200 metros del cráter (Espinasa-Pereña, 2012).

El 21 de mayo, se registró una pequeña explosión seguida por tremor espasmódico, que produjo una columna eruptiva. Desde entonces y hasta fines de mayo el nivel de actividad disminuyó. Toda esta actividad estuvo asociada al crecimiento y posterior destrucción del domo 20 (Espinasa-Pereña, 2012).

Después de varias semanas con poca actividad, el 17 y 18 de junio el Popocatepetl registró dos erupciones que produjeron columnas eruptivas de más de 2 km de altura sobre el cráter, destruyendo el domo 20, y que fueron seguidas por tremor espasmódico que el día 18 persistió por ocho horas.

Entre el 3 y el 20 de julio se acumularon 50 horas de tremor armónico de baja amplitud y numerosos sismos volcanotectónicos de magnitud menor que 3.0. En todo este tiempo se mantuvo un promedio de 10 a 20 exhalaciones diarias (Espinasa-Pereña, 2012).

El 22 de julio se presentaron 43 pequeñas exhalaciones. Al día siguiente se dieron 80 y el 25 hubo 55 exhalaciones. La mayor acompañada por una columna de ceniza que alcanzó poco menos de 2 km sobre el cráter (Espinasa-Pereña, 2012).



Entre el 2 y el 12 de agosto se registraron 101 horas de tremor armónico de baja amplitud además de un promedio de dos sismos volcanotectónicos diarios, acompañando el emplazamiento del domo 21. Entre el 15 y el 17 de agosto se presentaron 196 exhalaciones de vapor de agua, gas y pequeñas cantidades de ceniza (Espinasa-Pereña, 2012). También se detectaron episodios de tremor armónico y espasmódico, con amplitudes reducidas.

Entre el 20 y el 29 de agosto se sumaron otras 20 horas de tremor armónico de amplitud variable, manteniendo un promedio de entre 20 y 30 exhalaciones diarias. Sin embargo, el domo 21 perdió volumen por desgasificación, debido a su carácter escoriáceo (Espinasa-Pereña, 2012).

Del 30 de agosto al 2 de septiembre se presentó un total de 170 exhalaciones de pequeña a moderada intensidad acompañadas por pequeñas cantidades de ceniza aunque el día 3 disminuyó a menos de cinco. El 5 de septiembre se detectaron cuatro microsismos volcanotectónicos de magnitud menor que 3.0, uno localizado bajo el cono volcánico y tres más localizados a 7 km del cráter, en el sector sureste. Las profundidades de todos estos eventos se mantuvieron entre 3.8 y 4.3 km. (Espinasa-Pereña, 2012)

El 9 de septiembre se incrementó nuevamente el número de exhalaciones diarias a 21 y se registraron episodios de tremor armónico de amplitud variable acumulando un total de 11 horas, acompañando un último episodio de crecimiento del domo 21 (Espinasa-Pereña, 2012). Durante el lapso del análisis de febrero a diciembre del 2002, se tiene registrada la cantidad de 266 VT's, de los cuales 69 ocurrieron en los 3 meses anteriores al evento, 130 VT's ocurrieron durante el evento y 66 VT's se registraron posteriores al evento.

Las magnitudes en las cuales se presentan los VT's van de 1.6 y llegan a 3.5 grados. Se concentran entre los 2 y 2.3 grados. Para este periodo los eventos que se registraron presentan una magnitud de 2.1 grados. También se tiene el registro de 3 eventos que superan M3 (Figura 46).

Las profundidades para los VT's del periodo, tienen una distribución variable que abarca desde profundidades de 3 km hasta 26 km por debajo del volcán. La mayor concentración de los sismos va de los 4 km hasta los 6 km de profundidad. Podemos observar que a los 4 km registran 50 VT's. Tenemos la cantidad de 4 eventos que superan los 8km de profundidad (Figura 47).

Al inicio del periodo la cantidad de VT's es baja. A partir del mes de Abril el registro de VT's aumenta paulatinamente y se mantiene en aumento hasta el mes de junio. julio es el mes en el

que se registra la mayor cantidad de VT's y a partir de esta fecha el registro de eventos decrece considerablemente (Figura 48)

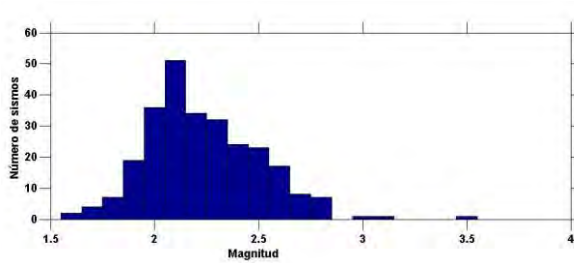


Figura 46. Las magnitudes para los eventos registrados durante este periodo van de 1.6 a 2.8 grados.

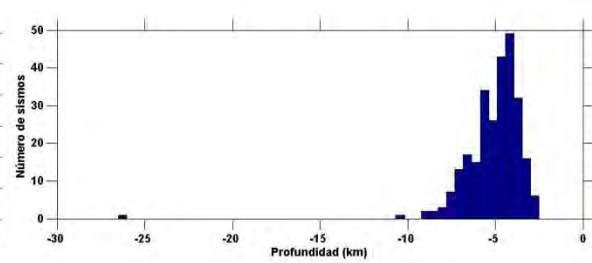


Figura 47. Las profundidades de registradas para este periodo van de 3 a 9 km por debajo del volcán. Se tiene el registro de un VT con profundidad < 10km.

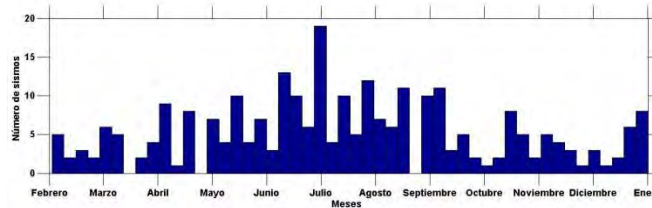


Figura 48. Para el periodo 7 tenemos gran actividad sísmica durante la primera mitad, después se puede observar que la actividad sísmica decrece considerablemente.

### Relación de parámetros.

Para el valor  $b$  podemos observar que los meses antes al evento el valor se mantiene constante en 1.6 y conforme transcurre el tiempo este va aumentando lentamente a 1.7. Posteriormente presenta una caída hasta 1.3. Después de la drástica caída el valor  $b$  comienza a aumentar lentamente. Durante el periodo eruptivo el valor  $b$  aumenta y llega a 2. Después de este pico, el valor comienza a decrecer considerablemente hasta llegar a 1.3. Por último, el valor comienza a recuperarse lentamente (Figura 49).

La gráfica del acumulado de sismos nos muestra una pendiente la cual desde los primeros meses aumenta con rapidez. La pendiente se incrementa hasta el mes de septiembre en donde el crecimiento se va haciendo más lento y estable (Fig. 49).

La energía liberada se mantiene constante. Días antes de que inicie el periodo eruptivo se presenta un aumento súbito de la energía liberada. Durante el periodo eruptivo la pendiente va en aumento constante. Después del periodo eruptivo la energía adquiere estabilidad (Figura 49).

Las magnitudes registradas en este periodo son muy variables, de 1.6 a 3.5 grados. Durante el evento ocurre un evento de 3.5 el cual se ve reflejado en el aumento de la energía en el mes de mayo.

La profundidad es variable durante este periodo, ya que existen sismos muy someros y otros de gran profundidad y no se presenta alguna relación con los parámetros del estudio. En este caso, la mayoría de los eventos no supera los 10 km de profundidad; únicamente se registró un evento de 26 km de profundidad.

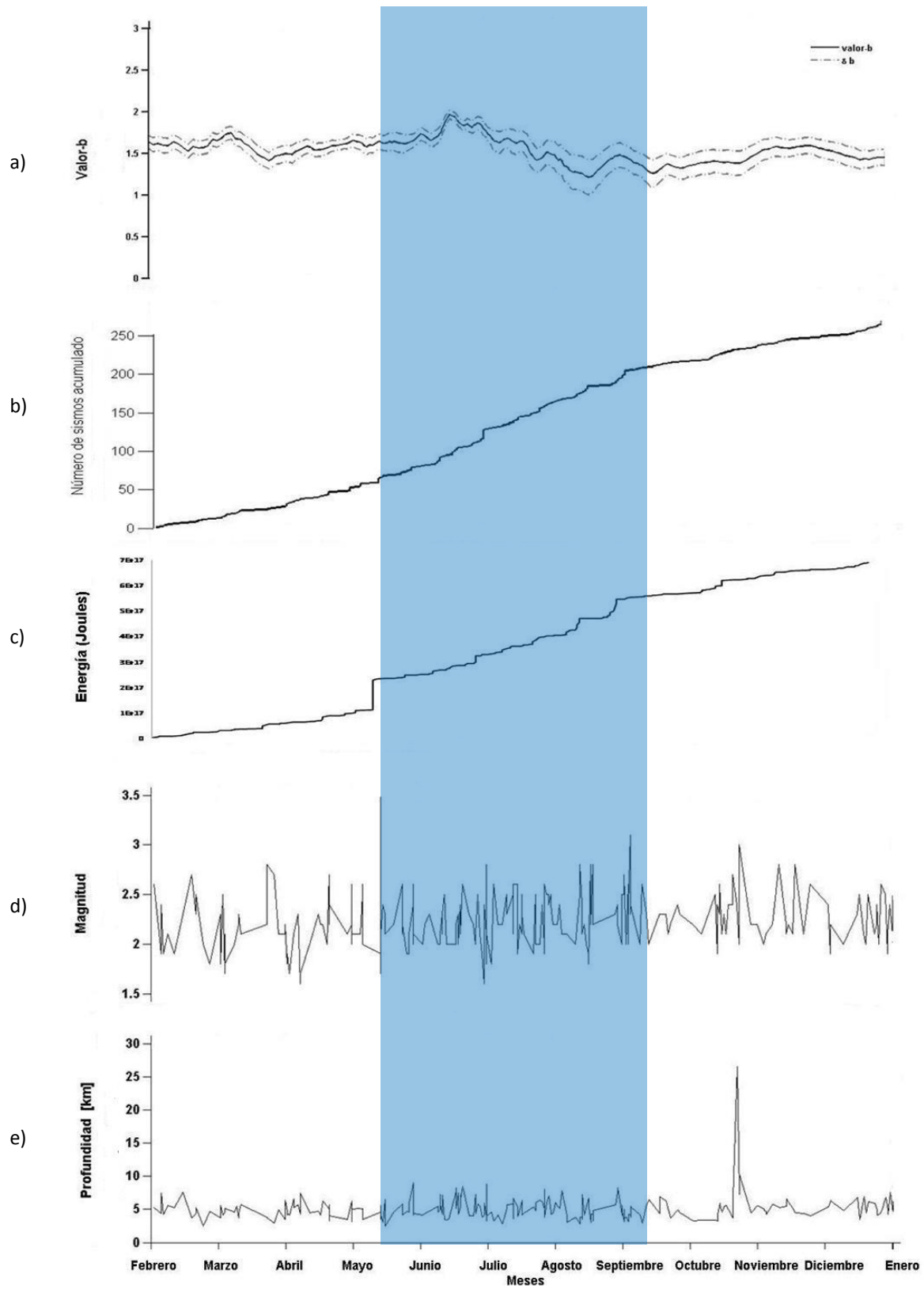


Figura 49. Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Periodo . La franja azul representa al lapso en el cual se

presenta la erupción. a) Valor *b*; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.

### **Periodo 8 (25 de Julio - 6 de Diciembre 2006)**

El 25 de julio se presentó una exhalación que generó una columna de ceniza de 5 km de altura y que fue seguida por temblor espasmódico (Espinasa-Pereña, 2012). El 3 de agosto el Popocatepetl mostró un cambio importante en su comportamiento debido a que se registró una explosión de gran amplitud y posteriormente una segunda explosión similar, precedida de una señal de temblor armónico de baja amplitud. A partir de ese momento se presentaron de manera intermitente episodios de temblor armónico de amplitud variable con una tendencia a aumentar. Por primera vez desde el episodio eruptivo de diciembre 2000-2001 a enero 2001, un inclinómetro registro deformaciones significativas. Los episodios de temblor armónico de amplitud considerable se presentaron en promedio tres veces por hora, separados por periodos de quietud relativa de similar duración (Espinasa-Pereña, 2012).

A partir del 1 de noviembre, comenzaron a registrarse nuevamente episodios de temblor armónico persistiendo por varias horas. El día 5 se registró actividad similar sólo que más persistente y de mayor amplitud. El 6 de diciembre se registró un VT de magnitud 2.7 localizado por debajo del cráter. Posterior a este evento comenzaron a aparecer exhalaciones continuas de amplitudes variables y acompañadas por temblor (Espinasa-Pereña, 2012).

Durante el lapso del análisis de abril del 2005 a marzo del 2006 se tiene registrada la cantidad de 141 VT's, de los cuales 35 VT's ocurrieron en los 3 meses anteriores al evento, 69 VT's ocurrieron durante el evento y 35 VT's se registraron posteriores al evento. Las magnitudes en las cuales se presentan los VT's varían de 1.7 a 3 grados y se concentran entre los 2.3 y 2.4 grados. Para este periodo los eventos que más se registraron presentan una magnitud de 2.2 grados (29 eventos) (Figura 50).

Las profundidades para los VT's del periodo, tienen una distribución muy variable que abarca desde profundidades de 2.8 km hasta 14.2 km por debajo del volcán. La mayor concentración de

los sismos se encuentra entre los 5 km y 6 km de profundidad. Podemos observar que a los 5.4 km se localizan 19 VT's. Cuatro eventos superan los 8 km de profundidad (Figura 51).

A inicio del periodo la cantidad de VT's es alta y va disminuyendo con el tiempo. Posteriormente, la cantidad de VT's va presentado altas y bajas (Figura 52). Octubre presenta una mayor cantidad de registros comparado con los meses anteriores y Ddiciembre vuelve a presentar un súbito aumento en la cantidad de VT's registrados. Durante el resto del periodo se presenta una baja cantidad de VT's.

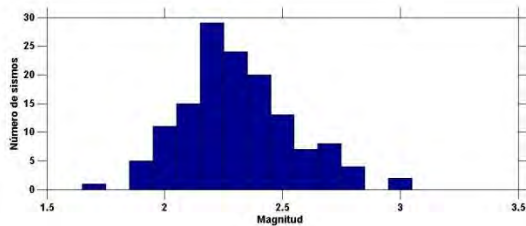


Figura 50. Las magnitudes para el periodo 8 van de 1.9 a 2.8 grados, se puede ver un sismo de 3 grados durante el periodo.

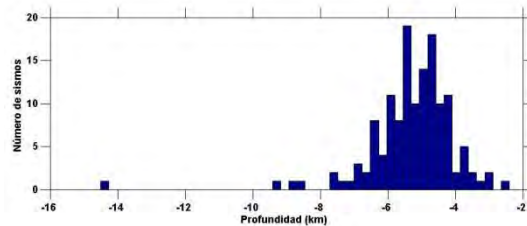


Figura 51 Las profundidades para este periodo son muy variables, van desde los 2.8 a 14.5 km. Entre 4 y 6 km se encuentra la mayor cantidad de eventos registrados.

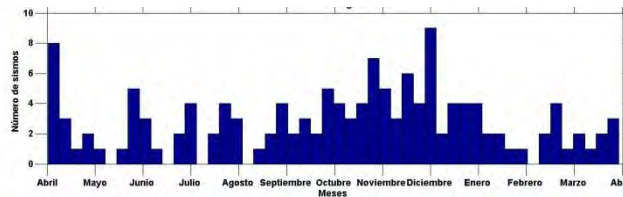


Figura 52. En este periodo se presenta una alta cantidad de VT's , en los meses de Octubre, Noviembre, Diciembre y Enero podemos observar que se registro gran cantidad de VT's

### Relación de parámetros.

Para el valor  $b$  podemos observar que los meses antes al evento el valor se mantiene constante en 1.7 y conforme transcurre el tiempo este va aumentando lentamente a 2. Días antes a que comience el período eruptivo, se registra una pequeña caída del valor  $b$ . Posteriormente, el valor aumenta y llega a 2, después de este pico comienza a decrecer considerablemente hasta llegar a 1.7, para volver a recuperarse lentamente (Figura 53).

La gráfica del acumulado de sismos nos muestra una pendiente la cual desde los primeros meses aumenta a una velocidad considerable. Durante el periodo eruptivo la pendiente se mantiene con un crecimiento uniforme. Después, la pendiente sufre cambio aunque lentamente (Figura 53).

La pendiente de la energía antes del periodo eruptivo se mantiene constante. En el mes de Junio se presenta una gran liberación de energía. Posteriormente, la cantidad de energía liberada decrece considerablemente. Durante el periodo eruptivo la pendiente se mantiene con un crecimiento uniforme. Después, la pendiente sufre otro importante cambio (Figura 53).

Las magnitudes registradas en este periodo son variables, de 1.6 a 3 grados. Durante el evento tenemos la presencia de un evento de magnitud 3 el cual se ve reflejado en el aumento de la energía en el mes de Junio. La profundidad es variable durante este periodo, ya que existen sismos muy someros y otros de gran profundidad, pero no se presenta alguna relación con los parámetros del estudio. En este caso la mayoría de los eventos no superó los 10 km de profundidad.

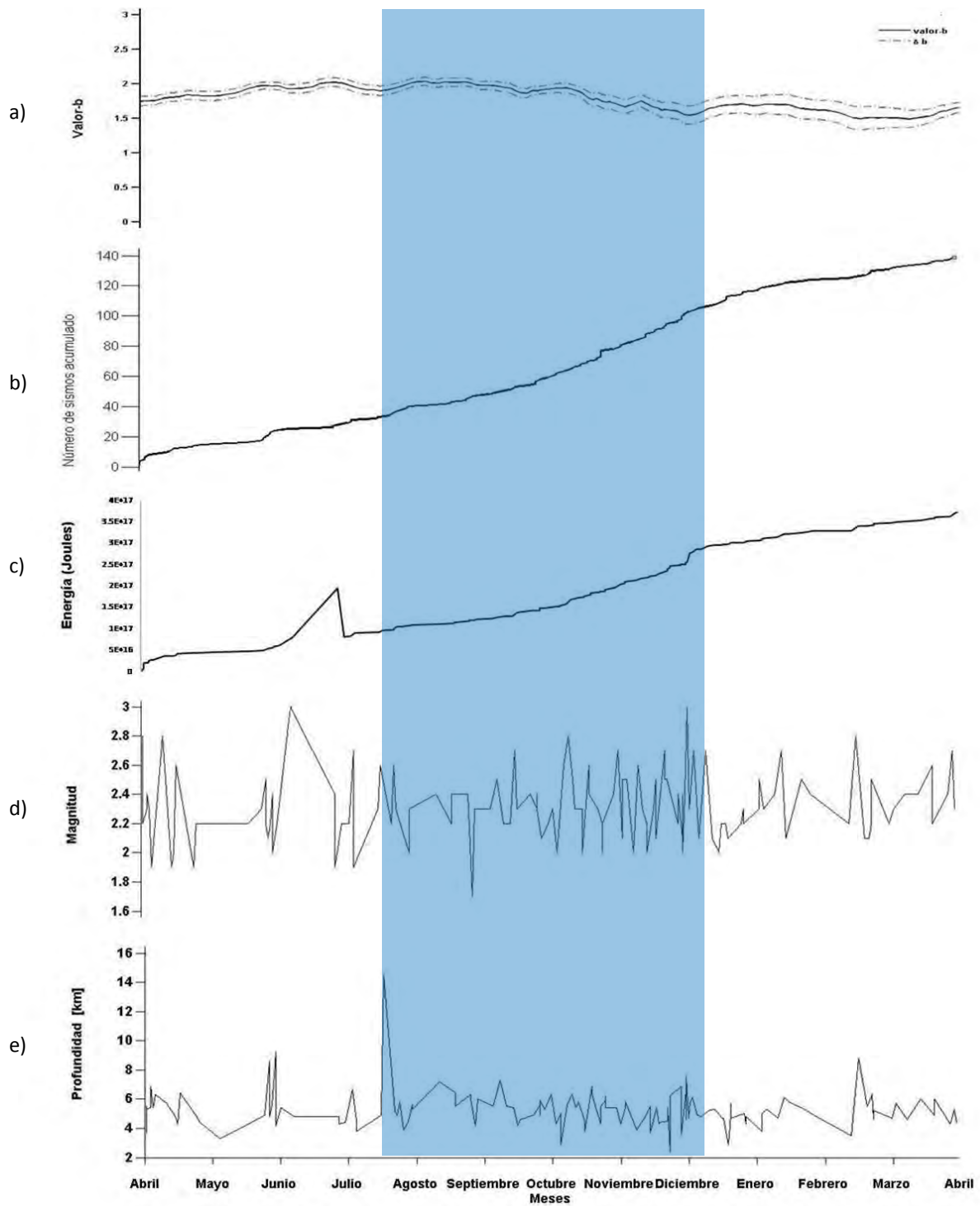


Figura 53. Variaciones temporales de los parámetros analizados. La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.



## Periodo 9 (20 Julio del 2013)

Durante el mes de julio el volcán comenzó a presentar un aumento en su actividad. El 3 de julio se registró un episodio de tremor de mediana amplitud, mismo que fue acompañado por la emisión persistente de una columna de gases y cenizas de hasta 3.5 km de altura. Así mismo, se observó la emisión de algunos fragmentos incandescentes depositados a corta distancia del cráter sobre el flanco noreste principalmente (CENAPRED, 2013). El 5 de julio se registró tremor de baja frecuencia con 27 exhalaciones de baja a mediana intensidad junto con emisión de gas, vapor de agua y ceniza que se dispersó en dirección noroeste. Además, se registraron segmentos de hasta 30 minutos de tremor armónico. El 8 de julio se presentó una explosión, cuya columna eruptiva se dirigió al noroeste con una altura de 1 km y otra el día 9 de julio, la columna eruptiva alcanzó 1.5 km (CENAPRED, 2013). El 17 de julio se presentó una explosión. Adicionalmente, se presentaron dos sismos volcanotectónicos de Mc 2.2 y de Mc 1.8. Asimismo, se registraron 2 horas de tremor de alta frecuencia. (CENAPRED, 2013). El 22 de Julio se registraron 45 exhalaciones de baja y moderada intensidad, acompañadas por emisiones de vapor de agua, gas y en ocasiones ceniza. Generó una pluma de ceniza que se dirigió al noroeste (CENAPRED, 2013).

Durante el lapso del análisis del Aabril a Ooctubre del 2013 se registraron 156 VT's, de los cuales 90 ocurrieron en los 3 meses anteriores al evento, 0 VT's ocurrieron durante el evento y 65 VT's se registraron posteriores al evento.

Las magnitudes de los VT's varían entre 1 y 4 grados y se concentran entre los 1.7 y 2.5 grados. Para este periodo los eventos que más se registraron presentan una magnitud de 2.2 grados (16 eventos) (Figura 54). Las profundidades para los VT's del periodo tienen una distribución variable entre 1 km y 17 km por debajo del volcán. La mayor concentración de los sismos se observa entre los 4 km y 6 km de profundidad. Podemos observar que a los 5 km se registran 34 VT's. Un total de 15 eventos superan los 8 km de profundidad (Figura 55).

Durante el mes de Aabril se presenta gran cantidad de eventos. Esta cantidad decrece con el tiempo y días antes de que inicie el período eruptivo la cantidad de VT's aumenta de manera drástica, decrece para el mes de Jjulio y en Aagosto se presenta otro incremento de importancia. Después de este incremento la cantidad de VT's baja considerablemente (Figura 56).

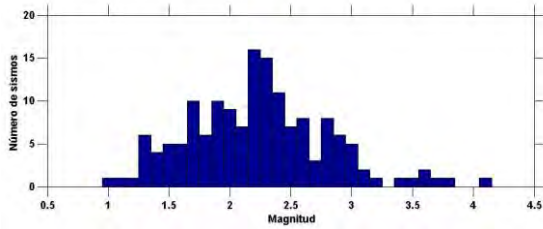


Figura 54. Las magnitudes para este periodo son muy variadas, se tiene registro de magnitudes que van desde 1 a 4.1 grados, la mayor parte de los VT's tiene magnitudes de 2 a 2.5 grados.

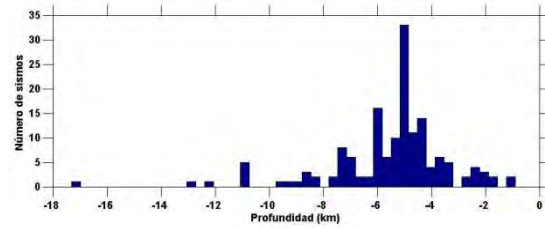


Figura 55. Las profundidades de los eventos de este periodo son variadas, pero a los 5 km se presenta la mayor concentración de VT's del periodo.

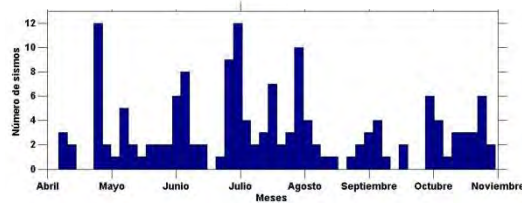


Figura 56. Al principio del periodo tenemos una gran cantidad de VT's registrados, posteriormente decrece y en los meses de Junio, Julio y Agosto tenemos un aumento considerable, después de esto la cantidad disminuye.

### Relación de parámetros.

El valor  $b$  es bajo comparado con los valores obtenidos con anterioridad. El valor  $b$  de 0.6 se mantiene constante en la mayoría del lapso del estudio. Únicamente tiene un pequeño aumento a finales del mes de Mmayo el cual decrece rápidamente (Figura 57).

La gráfica del acumulado de sismos nos muestra una pendiente que se mantienen con un crecimiento constante antes y durante el evento eruptivo. Después de este comportamiento, al final del periodo de actividad se observa un aumento en la pendiente (Figura 57).

La cantidad de energía liberada presenta un comportamiento variado. Al inicio, la pendiente se mantiene constante, para el mes de Mmayo ésta pendiente sufre un drástico aumento. Posteriormente, se estabiliza y en Jjunio también sufre cambios volviendo posteriormente a la estabilidad (Figura 57). Las magnitudes registradas en este periodo son variables, de 1 a 4.1 grados. Durante el evento eruptivo, tenemos la presencia de un sismo de 3.5 el cual se ve reflejado en el aumento de la energía en el mes de Aabril. La profundidad es variable durante este periodo, ya que existen sismos muy someros y otros de gran profundidad aunque no se presenta alguna relación con los parámetros del estudio.

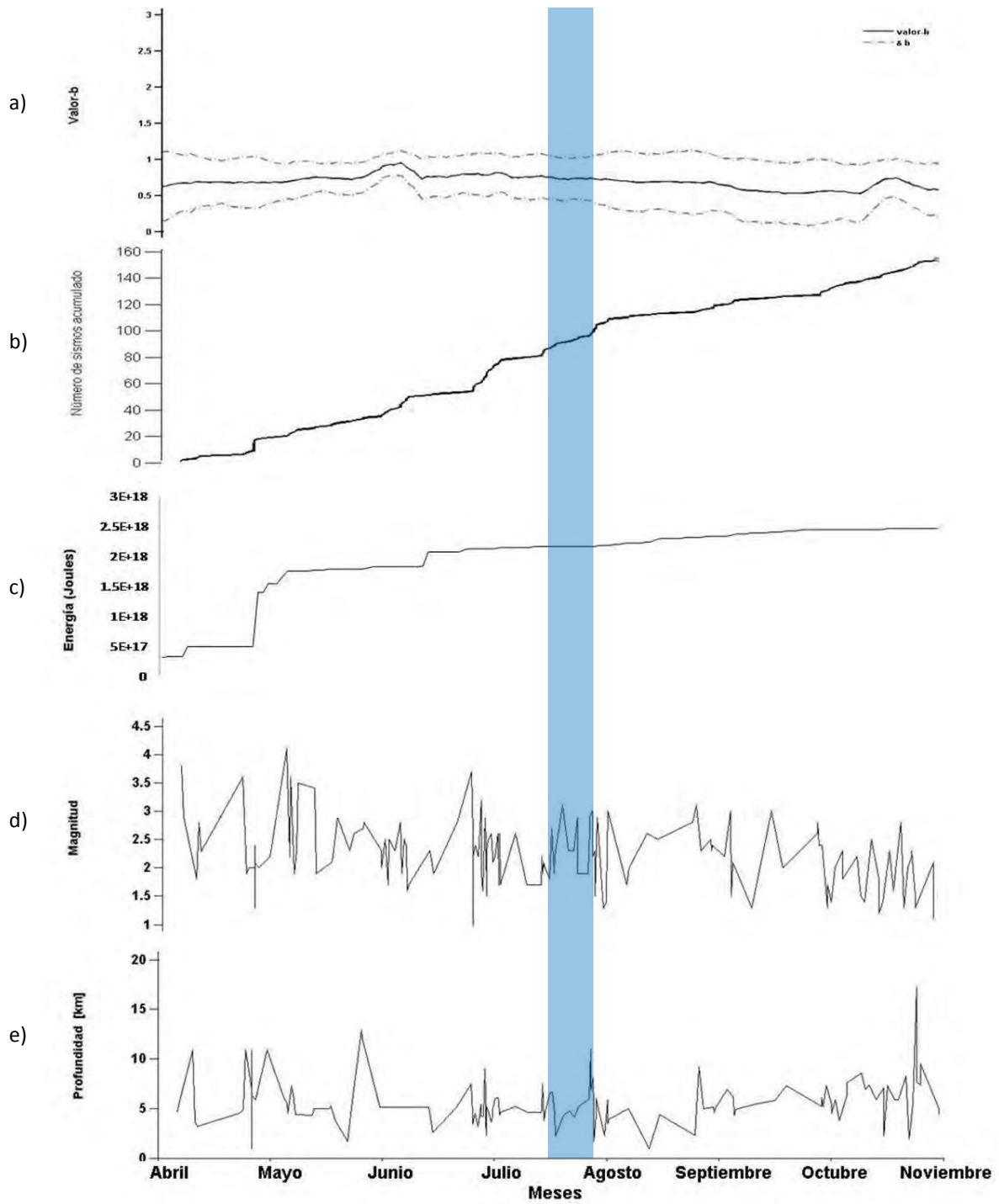


Figura 57. Variaciones temporales de los parámetros analizados. La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.

### **Periodo 10 (11 de Febrero- 11 de Julio 2014)**

Durante el mes de febrero, 2014, el domo N° 48 continuó con su crecimiento. El día 19 de febrero se presentó una pequeña erupción con emisión de vapor de agua, gas y moderadas cantidades de ceniza, que generó una columna de 1.5 km sobre el nivel del cráter. El 20 de febrero se generó una exhalación. El 21 de febrero se registró una pequeña explosión que emitió fragmentos incandescentes los cuales cayeron en su mayoría en el interior del cráter y en el Labio Inferior y generó una pluma de gases y pequeñas cantidades de ceniza, de casi 2 km de altura (CENAPRED, 2014).

Ese mismo día a las 12:33 h se presentó una explosión moderada en el Popocatepetl que lanzó fragmentos incandescentes hacia las laderas externas hasta una distancia de 600 metros del borde del cráter. La actividad generó una columna eruptiva que alcanzó una altura de 4 km sobre el volcán y que fue desplazada hacia el noreste por los vientos predominantes. Poco después, a las 15:41 se presentó una segunda erupción que generó una columna eruptiva de 2 km de altura, de color más claro, lo que indica menor contenido de ceniza, también dirigida al noreste (CENAPRED, 2014).

Durante todo marzo, el nivel de actividad fue sumamente bajo, aunque en todo momento se observó, por las noches, incandescencia sobre el cráter, lo que indica que el domo se mantuvo caliente. Sin embargo, desde principios de abril pudo registrarse un leve incremento en el nivel de actividad con la presencia de un mayor número de eventos de periodo largo por día acompañando el crecimiento del domo 49, así como algunas explosiones que lanzaron fragmentos incandescentes hacia las laderas externas y produjeron columnas eruptivas de cenizas y gases de hasta 2 km de altura, como las ocurridas el 13 de abril. El mayor crecimiento del domo debe haber ocurrido principalmente entre los días 13 y 18 de abril, cuando se detectaron varios episodios de tremor armónico de baja amplitud (CENAPRED, 2014).

El incremento de actividad durante abril culminó en una serie de explosiones durante la última semana del mes, algunas de las cuales generaron columnas de ceniza de hasta 2 km de altura y lanzaron fragmentos incandescentes a distancias de hasta 500 m desde el cráter, que luego rodaron ladera abajo hasta la base del cono principal, a 2 km del cráter (CENAPRED, 2014).

La primera indicación de la aparición de un domo en el fondo del cráter interno se vio el 2 de junio. Para el 4 de junio, día en el que se alcanzó el máximo de exhalaciones, alcanzó dimensiones de 155 x 125 metros. El número de LP's diario fue disminuyendo paulatinamente y el domo se mantuvo creciendo lentamente hasta alcanzar, el 16 de junio, dimensiones de 175 x 155 m y un espesor de 20 m, lo que permitió calcular un volumen mínimo de  $4.26 \times 10^5 \text{ m}^3$  (CENAPRED, 2014).

El 18 y 19 de junio se presentaron explosiones que generaron columnas de cenizas de hasta 2.5 km de altura y que posiblemente marcaron la destrucción del domo 50, puesto que para el 25 de junio, en las imágenes satelitales, se pudo observar que el domo conservaba un diámetro de 175 m, aunque la porción central se había desinflado y su ápice hundido por debajo de los bordes del domo (CENAPRED, 2014). Después de este periodo, se confirmó la presencia del domo N° 51 y entre el 8 y el 11 de julio se presentaron explosiones que generaron columnas de cenizas que posiblemente marcaron la destrucción del domo 51. (CENAPRED, 2014).

Durante el lapso del análisis del abril a octubre del 2013 se tiene registrada la cantidad de 253 VT's, de los cuales 80 VT's ocurrieron en los 3 meses anteriores al evento, 131 VT's ocurrieron durante el evento y 41 VT's se registraron posteriores al evento. Las magnitudes en las cuales se presentan los VT's varían entre 1 y 3.6 grados y se concentran entre los 1.9 y 2.5 grados. Para este periodo los eventos que más se registraron tienen una magnitud entre 2.7 y 2.8 grados (24 eventos) (Figura 58).

Las profundidades para los VT's tienen una distribución variable, que abarca profundidades de 0.8 km hasta 32 km por debajo del volcán. la mayor concentración de sismos ocurre entre los 4 km y los 6 km de profundidad. Podemos observar que a los 6 km registran 25 VT's. Un total de tres eventos superan los 15 km de profundidad (Figura 59).

Durante los primero tres meses del período eruptivo, la cantidad de VT's es reducida, pero días antes de que ocurra la erupción se observa un aumento considerable en la cantidad de VT's registrados. Después, esta cantidad decrece y vuelve a aumentar en el mes de Mayo. A partir del mes de Junio la cantidad de VT's es mucho menor (Figura 60).

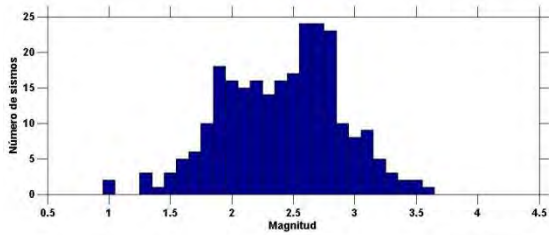


Figura 58. Las magnitudes en las que se registran los VT's del periodo 10 oscilan entre 1 y 3.6 grados, la mayor cantidad de VT's está entre 1.9 y 2.8 grados.

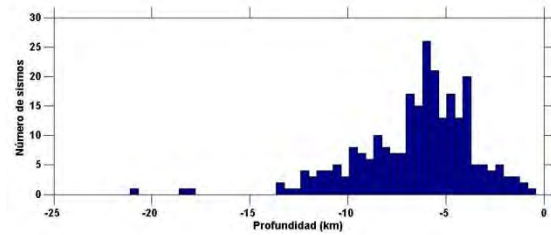


Figura 59. Para este periodo la profundidad es muy variada, podemos observar profundidades muy someras 1 km y otras mayores 20.5 km, la mayor concentración de profundidades está localizado entre 4. Y 6 km por debajo del volcán.

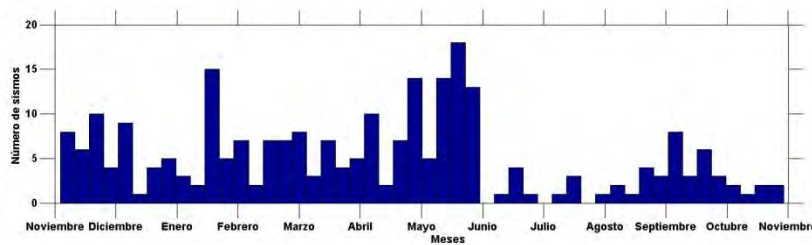


Figura 60. El periodo 10 presenta gran cantidad de sismicidad, durante el mes de enero y febrero tenemos un pico que se puede observar. Durante los meses posteriores la cantidad de VT's se mantiene estable, en el mes de mayo y Junio podemos observar los picos más altos en lo que respecta al registro de VT's, en los meses posteriores podemos observar que la actividad baja drásticamente.

### Relación de parámetros.

Para el valor  $b$  podemos observar que es bajo comparado con los valores obtenidos con anterioridad. Este valor se mantiene constante en los primeros meses del período eruptivo. Posteriormente presenta un aumento hasta tener un valor  $b$  de 1 mintiéndose constante y luego decrecer considerablemente hasta 0.4 (Figura 61).

La gráfica del acumulado de sismos nos muestra una pendiente que se mantienen con un crecimiento constante antes y durante el evento eruptivo. Al final del periodo de actividad se presenta un aumento en la pendiente en el mes de Junio, para después recuperar la estabilidad (Figura 61).

La cantidad de energía liberada presenta un comportamiento similar a la gráfica del acumulado, esta va teniendo un gran aumento antes y durante el periodo eruptivo y al final del periodo de actividad se torna constante (Figura 61). Las magnitudes registradas en este periodo son muy variables, de 1 a 3.6 grados (Figura 61). Durante la erupción tenemos la presencia de un VT de una

magnitud considerable 3.5 y 3.6 los cuales afectan a la pendiente durante los primeros meses del análisis, al registrarse eventos de menor magnitud la pendiente se vuelve estable.

La profundidad es variable durante este periodo ya que existen sismos someros y otros de gran profundidad y no se presenta alguna relación con los parámetros del estudio.

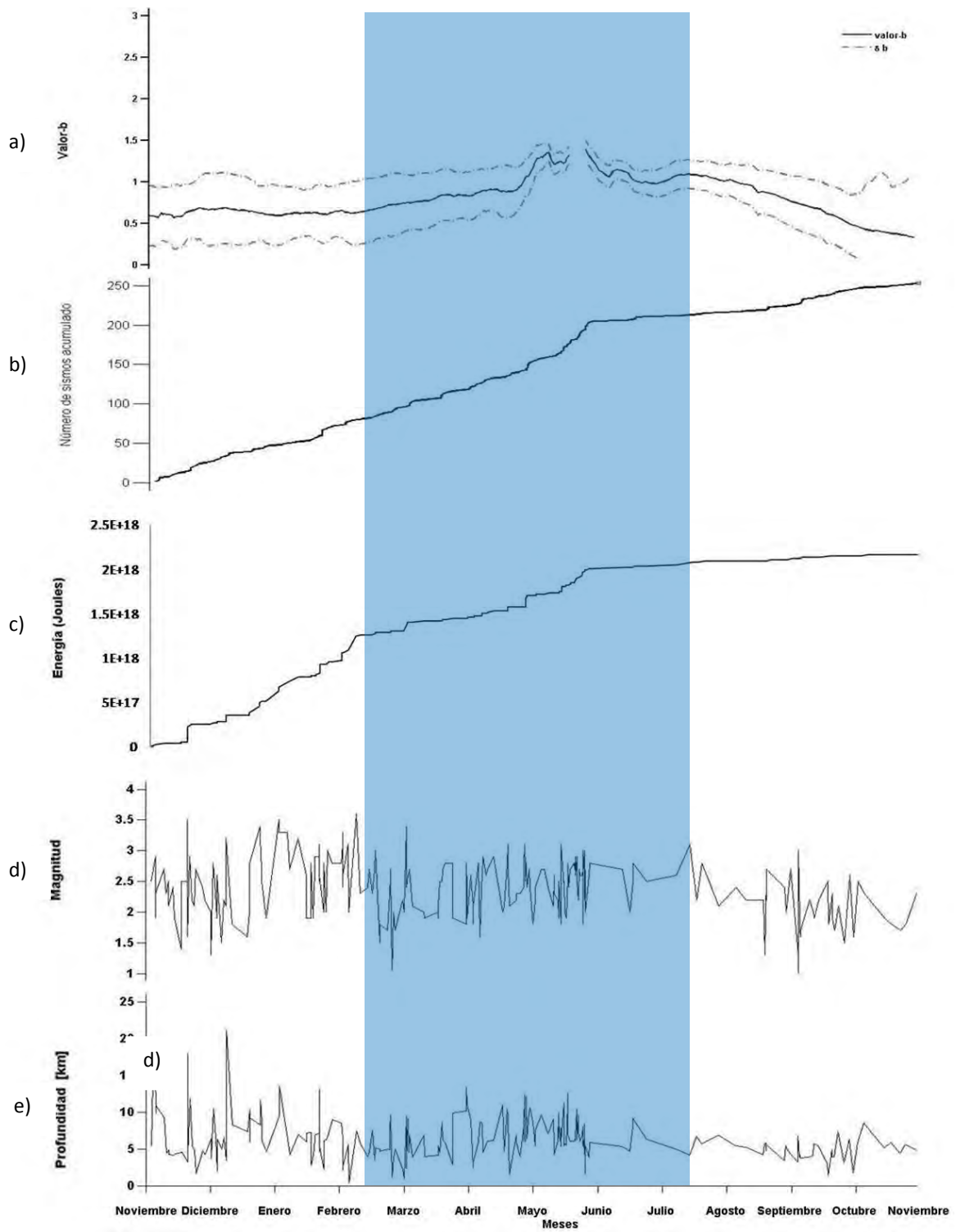


Figura 61. Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Periodo . La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor *b*; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's.



## Capítulo 5: Discusión y Conclusiones

Varios investigadores han realizado el análisis de las variaciones temporales del valor de  $b$  antes y después de la ocurrencia de un sismo (Carter y Berg, 1981; Smith, 1986; Kebede y Kulhanek, 1994, Novelo-Casanova et al, 2006), encontrando cambios significativos que podrían ser considerados como precursores de sismos grandes a moderados. Para el caso de la actividad volcánica, se ha encontrado variaciones temporales de  $b$  antes y después de un evento eruptivo (Cao y Gao, 2002; Molina y Ruiz, 2002; Legrand *et al.*, 2004; Martínez-Bringas, 2004) .

Asimismo, se ha observado que las variaciones temporales de  $b$  *proveen diversa información* reflejando en cierta forma las condiciones de la corteza (Jin y Aki, 1986; Robinson, 1987; Novelo-Casanova *et al.*, 2006). Estas observaciones sugieren que la detección de las variaciones temporales del valor de  $b$  pueden ser una herramienta adecuada para el pronóstico de la ocurrencia de sismos o erupciones volcánicas importantes basada en las condiciones del estado de esfuerzos del medio en que ocurren.

Debido a lo antes mencionado, este trabajo se enfocó a identificar los cambios de  $b$ , *energía*, *magnitud* y *profundidad*, que podrían estar relacionadas con las variaciones en el estado de esfuerzos interno del volcán “antes”, “durante” y “después” de los eventos más sobresalientes de los 19 años que comprenden el período de este estudio.

En el capítulo anterior se realizó el análisis de las variaciones temporales de los parámetros de estudio y su correlación con los periodos eruptivos más significativos. En el presente capítulo se analizará en detalle de estos parámetros con respecto a la las cinco erupciones más importantes que se han generado desde la reactivación de la actividad del volcán Popocatepetl. Esto con el propósito de determinar si los parámetros sísmicos tienen alguna relación entre sí y su comportamiento antes, durante y después de los diferentes periodos eruptivos.

A cada periodo se la aplico la prueba t-student, la cual no proporciona un valor estadístico de contraste. Indica el grado de confianza entre dos diferentes valores. Si el valor de  $t$  es igual a 0.68, los límites de confianza son del 75%, si es igual a 1.0 los límites serán del 85%, si es igual a 1.7 serán del 95% y si es  $\geq 2.5$  serán del 99% (Mendenhall, 1979).

También se aplicó la correlación de Pearson a cada periodo, esto con la finalidad de obtener un dato cuantitativo que nos indique si los parámetros se relacionan o no.

### **Periodo 2 (15 de marzo - 30 de Junio 1997)**

Para este periodo podemos observar que antes del inicio del periodo eruptivo el comportamiento del valor  $b$  es variable, ya que se identifica un pequeño incremento en este valor (Figura 62). Conforme avanza el tiempo, este valor disminuye lentamente.

Al inicio del periodo eruptivo se presenta una explosión la cual, a partir de ese momento se observa que el valor  $b$  comienza a aumentar considerablemente. Posteriormente, decrece y se genera una exhalación dando como resultado un incremento del valor  $b$ . El mismo patrón se repite con exhalaciones posteriores. Antes de que se genere una explosión o una exhalación durante este periodo se observa que el valor  $b$  disminuye considerablemente y posterior al evento este aumenta y a finales de Junio  $b$  vuelve a incrementarse con gran rapidez.

El acumulado de sismos tiene un comportamiento en el cual nos muestra que antes de que se presente una explosión o exhalación se registrará un incremento de la pendiente. Posterior al evento eruptivo, esta pendiente tiende a estabilizarse. Esto se debe a que regularmente antes de que se presente algún evento eruptivo se registran enjambres sísmicos.

Para esta erupción podemos observar que durante los días 3 y 4 ocurrieron enjambres sísmicos. También el día 13 se presentó un pequeño enjambre para posteriormente ocurrir una explosión. Esto nos indica de que la presencia de enjambres de VT's puede preceder a un evento volcánico.

La energía por su parte podemos decir que está fuertemente relacionada con la magnitud, ya que se observa que cuando se presentan sismos de una magnitud considerable, la pendiente de energía presenta cambios importantes (Figura 62). También está relacionada con los enjambres, ya que al presentarse un enjambre observamos que la pendiente aumenta de manera importante. Esto se debe a que en un pequeño lapso de tiempo se presenta gran cantidad de eventos y por tanto una gran liberación de energía.

Se realizó la prueba t-test y el coeficiente de correlación de Pearson para cada uno de los parámetros analizados. Los resultados se muestran en la Tabla 6 y Tabla 7, respectivamente.

**Tabla 6. Resultados de la prueba t-test de cada parámetro, haciendo comparación entre el “antes”, “durante” y “después” de la erupción volcánica.**

	b ±σ sismos	Energía sismos	Magnitud sismos	Profundidad
Antes	1.21±.133	4.10246E+15	2.18	-5.191
Durante	1.11±.120	5.27451E+15	2.23	-5.068
Después	1.567±.092	2.8385E+15	2.28	-6.167
t-test (%) 1 y 2	3.230451637	-3.85745E-16	-1.36066823	-0.641966825
t-test (%) 2 y 3	-73.96541213	3.76843E-15	-1.275956664	3.957885466

En la Tabla 6 podemos observar que los resultados de la prueba t-test nos demuestran que las diferencias de los valores  $b$  y la energía antes, durante y después de la erupción volcánica tienen un 99% de confianza. Esto nos indica que estos valores son significativos y con esto podemos indicar que los cambios que ocurren en el valor  $b$  y en la energía son importantes.

En lo que respecta a la magnitud de los sismos, el límite de confianza que nos da es del 85% por lo que estos valores no son tan significativos como los anteriores. Las variaciones temporales de profundidad es un caso particular, ya que entre el “antes” y el “después” en este periodo es muy variable. Por un lado se tiene que en el intervalo de confianza entre el “antes” y el “durante” no es significativo <75 %, mientras que para el “durante” y “después” es significativo con el 99%.

**Tabla 7. Coeficientes de relación de Pearson.**

Correlación Pearson	b y magnitud	b y energía	b y profundidad	Energía y magnitud	Energía y profundidad	Profundidad y magnitud
r <sup>2</sup>	0.1267441	-0.05606728	-0.150149	0.69439133	-0.03525498	-0.10534096

En la Tabla 7 se muestra la correlación de Pearson para cada uno de los parámetros analizados. Se puede observar que la mayoría de las correlaciones son inexistentes a excepción de la correlación entre la energía y magnitud la cual es de 0.69. Este valor nos indica que estos dos parámetros tienen una correlación de moderada a buena. La correlación se debe principalmente a que al tener un VT de magnitud considerable la cantidad de energía liberada es afectada directamente. El

signo negativo del coeficiente de correlación confirma cuantitativamente la correlación negativa entre ambos parámetros.

Para este periodo podemos decir que el valor  $b$  disminuyó cuando se presentaron las explosiones del 24 de Abril, el 11 de junio, y el 30 junio. Esta disminución puede ser atribuida a la liberación de esfuerzos debido a las explosiones las cuales destruyeron al tercer domo. El incremento de  $b$  se atribuye al cambio de estado de esfuerzos dentro del volcán, también se puede deber al fracturamiento y agrietamiento dentro del sistema volcánico. Valores altos de  $b$  son característicos de regiones con una alta heterogeneidad, debido a un gran número de fracturas originadas por la presencia de magma junto con gas y fluidos volcánico (Martínez Bringas, 2006).

Durante este periodo se puede destacar el evento del 30 de Jjunio, que fue el más importante que ocurrió. Este evento estuvo precedido por 7 VT en un intervalo de 13 minutos, iniciando a las 17:56 (hora local), y sus magnitudes estuvieron entre 2 y 2.7. Todos ellos con un mecanismo compresional, indicando una larga presurización a profundidad somera (Martínez, Bringas, 2006).

Este evento tuvo una intensidad VEI 2-3 y se asoció con la destrucción de un domo, una rápida emisión y fragmentación de lava, que originó una gran nube de ceniza. En los primeros días de julio fue detectada la presencia de un nuevo domo (Espinasa-Pereña, 2012)

El evento del 30 de junio fue originado por una nueva intrusión de magma al edificio volcánico, lo que provocó su mezcla con el magma que se encontraba almacenado a profundidades someras (Straub y Martín del Pozzo, 2001), así como a la formación de un nuevo domo que fue detectado en un sobrevuelo tres días después de ocurrido el evento. Estas nuevas condiciones provocaron un estado de alta heterogeneidad en la zona del cráter. A finales del período se presenta un sismo de magnitud  $\geq 3.0$  iniciando un nuevo episodio de actividad caracterizado por la formación y destrucción de domos a través de exhalaciones y explosiones moderadas.

En el período “antes” del evento, el valor de  $b$  tiene un promedio de 1.2, con un ligero incremento, lo cual coincide con la presencia de un domo detectado en esas fechas (Figura 62). Durante el evento eruptivo el valor de  $b$  se incrementa, siendo su promedio 1.1, y “después” 1.5.

Los cambios observados en  $b$ , reflejan el estado de esfuerzos interno del volcán “antes”, “durante” y “después” del evento del 30 de junio de 1997. “Antes” del evento, la

presencia de magma y agua pudieron haber incrementado la presión de poro y disminuidos los esfuerzos efectivos. Una vez que el evento inició y la presión de los conductos empezó a liberarse, disminuyó la presión de poro y aumentaron los esfuerzos efectivos (Figura 1).

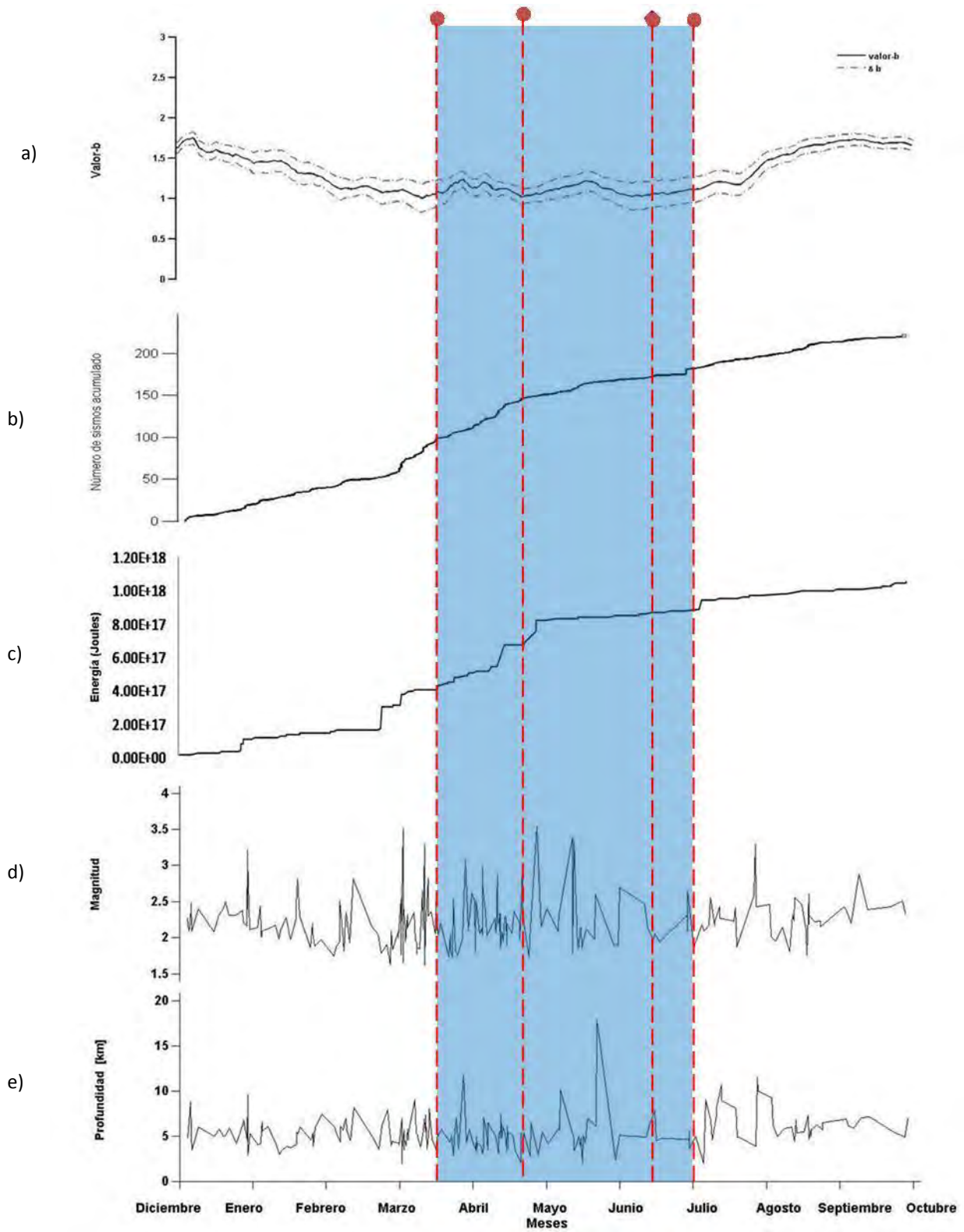


Figura 62. Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Período . La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e)

Variaciones de la profundidad de los VT's. La barra vertical sombreada representa el periodo de actividad volcánica analizado. Las líneas punteadas en rojo nos indican las explosiones presentes durante este periodo.

#### **Periodo 4 (5 de Octubre -17 de Diciembre 1998)**

Para el periodo 10 podemos observar que el valor  $b$  no es muy variable a lo largo del tiempo. Sin embargo, igualmente que en el periodo anterior, podemos observar que al presentarse una exhalación o una explosión este valor tiene una disminución y posterior a esta disminución se presenta un aumento del valor de  $b$  (Figura 63).

Podemos observar que antes de que ocurriera la exhalación del mes de Agosto el valor  $b$  se incrementó y días posteriores a la exhalación este valor disminuyó, para posteriormente presentar un pequeño aumento (Figura 63). También este comportamiento podemos observarlo en las explosiones, ya que en el lapso de tiempo en que ocurren éstas es cuando el valor de  $b$  disminuye.

El comportamiento de la energía coincide con el aumento del acumulado y su pendiente es afacetada principalmente por los VT's que se presentan y su magnitud. Posterior a que ocurra una exhalación se presentan VT's, el VT más grande registrado durante este periodo es el que se presenta el 13 de Agosto elevando el nivel de energía la cual se relaciona con el inicio de la destrucción del octavo domo. Toda la actividad eruptiva que se presenta en este periodo se debe a la destrucción del este domo. También podemos observar que durante la erupciones se presentan VT's de magnitud considerable ( $M > 2.5$ ). Esto podría deberse a la acumulación de esfuerzos que se genera cuando el magma comienza a ascender y fracturas rocas que impiden su paso generando como consecuencia los VT (Figura 63).

El 23 de noviembre inició un nuevo episodio que se caracterizó por explosiones, exhalaciones y tremor armónico y de alta frecuencia, lo que indicaba una rápida ascensión del magma hacia el cráter. Se taparon los conductos incrementándose la presión interna la cual fue liberada en subsecuentes explosiones. Este incremento inicia antes del 22 de noviembre, fecha en que inició el episodio explosivo, indicando un ascenso rápido del magma hacia el cráter, debido a que posiblemente los conductos no se encontraban obstruidos debido a la actividad ocurrida durante septiembre-octubre (Figura 63) (Espinasa-Pereña, 2012). Este nuevo magma posiblemente bloqueó los conductos incrementando la presión interna lo cual se ve reflejado también en la rápida disminución de los valores de  $b$  registrados. Los valores de  $b$  ( $\pm 1.5$ )

registrados durante el evento, podrían considerarse como el resultado de un incremento en la heterogeneidad, temperatura y condiciones de esfuerzo.

Se realizó la prueba t-test para cada parámetro analizado y también se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, los resultados se muestran en la Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 8 Resultados de la prueba t-test de cada parámetro, haciendo comparación entre el “antes”, “durante” y “después” de la erupción volcánica.

	$b \pm \sigma$ sismos	Energía sismos	Magnitud sismos	Profundidad
Antes	1.25±.324	1.79002E+16	2.089	-5.33
Durante	1.27±.646	1.46942E+15	2.1	-5.48
Después	1.22±.484	5.4854E+15	2.17	-5.8
t-test (%) 1 y 2	-4.23744542	5.76078E-14	-0.15699853	0.399449192
t-test (%) 2 y 3	1.46973278	-0.303715597	-0.736134947	1.087697756

La prueba t-test demuestra que el valor  $b$  y la energía tienen valores diferentes ya que para el valor  $b$  y energía nos dice que aplicando el test “antes” y “durante” tenemos un 99 % de confianza. Sin embargo, al aplicar este test “durante” y “después” el intervalo de confianza disminuye a 85% para el valor  $b$  y 75 % para la energía lo cual nos indica que estos ya no poseen un intervalo de confianza significativo.

En lo que corresponde a la magnitud de los sismos se obtuvo que el intervalo de confianza para éstos es de 75%. Este valor nos indica que el nivel de confianza para este parámetro no es significativo. Los resultados para las variaciones de la profundidad son variables, por un lado observamos que la prueba t-test “antes” y “durante” el intervalo de confianza es del 75%. Sin embargo, este intervalo aumenta para la prueba “durante” y “después” al 85%.

Tabla 9. Coeficientes de relación de Pearson, para cada uno de los parámetros.

Correlación Pearson	b y magnitud	b y energía	b y profundidad	Energía y magnitud	Energía y profundidad	Profundidad y magnitud
r2	-0.03575796	-0.08452715	0.14979687	0.60423497	-0.3769435	-0.34279839



Para los datos del periodo 10, también se aplicó la correlación de Pearson (Tabla 9). Se observa que la mayoría de las correlaciones son inexistentes a excepción de la correlación entre la energía y magnitud la cual es de 0.60. Este valor nos indica que estos dos parámetros tienen una correlación de moderada a buena. La correlación se puede comprobar con lo que antes se mencionó. Al tener un VT de magnitud considerable afecta directamente en la cantidad de liberación de energía como se observa en la Figura 63. Algunos de los coeficientes de correlación presentan signo negativo, esto confirma cuantitativamente la correlación negativa entre dos parámetros.

Para este periodo podemos decir que la magnitud y el valor  $b$  realmente no tienen ningún tipo de correlación al igual que el valor  $b$  y la energía ya que nuestros valores obtenidos con el coeficiente de correlación son extremadamente bajos.

Las variaciones de  $b$  reflejan las variaciones en la actividad volcanotectónica, con un rango de magnitudes de 1.7 a 2.7. Este cambio puede considerarse estadísticamente significativo ya que se encuentra en un límite de confianza del 99%.

Los valores de  $b$  obtenidos después del evento eruptivo, reflejan condiciones de relajación de esfuerzos en el edificio volcánico. La presión fue liberada, disminuyó la presión de poro, las microfracturas se cerraron, incrementó el esfuerzo efectivo, y como consecuencia los valores de atenuación disminuyeron relativamente a valores pre-eruptivos y el valor de  $b$  se incrementó.

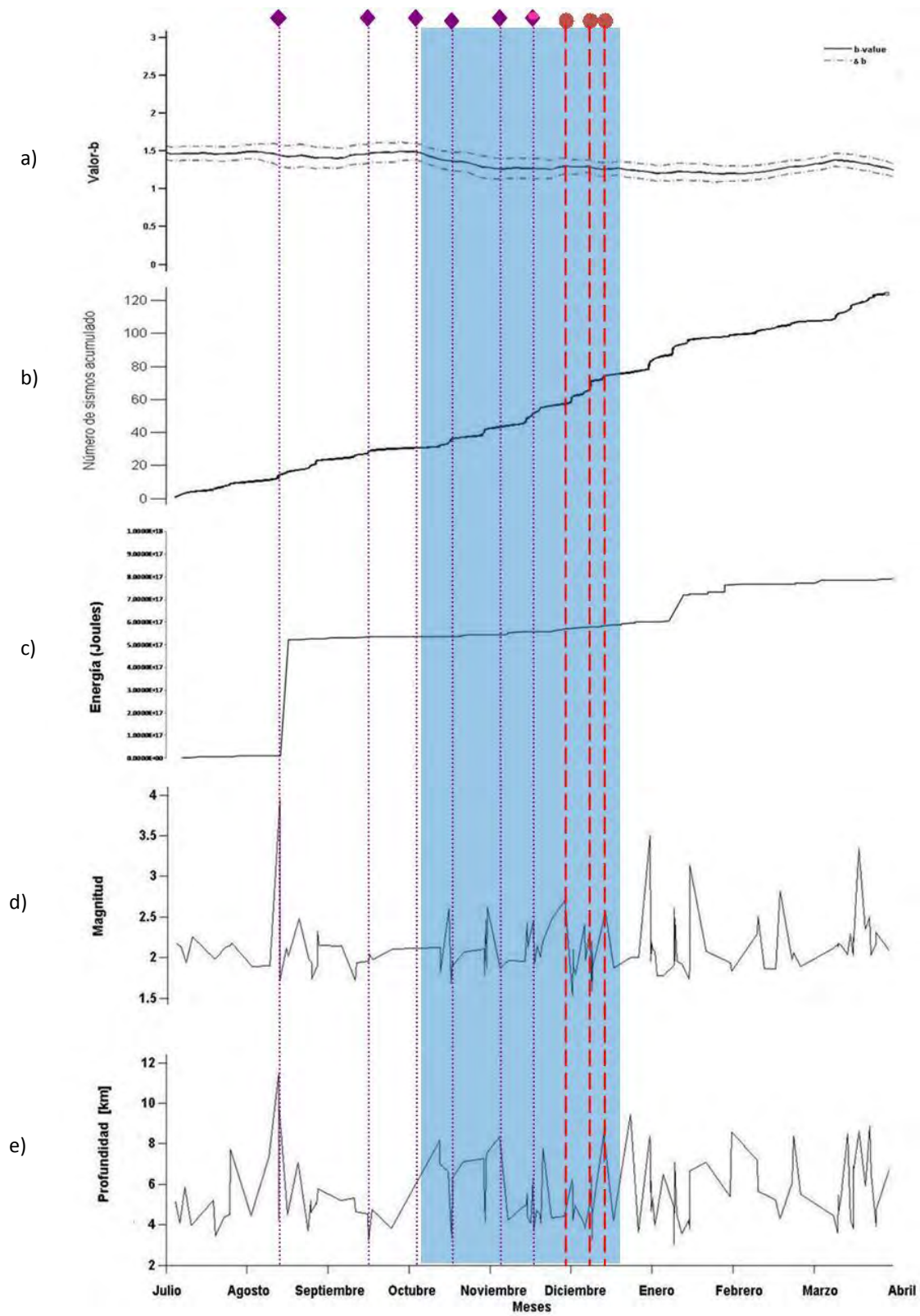


Figura 63 . Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Periodo. La franja azul representa al lapso en el cual presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's; e)

Variaciones de la profundidad de los VT's. La barra vertical sombreada representa el periodo de actividad volcánica analizado. Las líneas punteadas en rojo nos indican las explosiones presentes durante este periodo.

### **Periodo 6 (2 de Diciembre 2000- 30 de Enero 2001)**

Para este periodo el valor  $b$  presenta un comportamiento muy variado. Se observa que en la mayoría de los casos coinciden con las erupciones. Al presentarse una exhalación o una explosión el valor  $b$  tiene una disminución y posterior a esta disminución presenta un aumento. Este patrón se observa claramente “antes” y “durante” el periodo eruptivo. Sin embargo, después de las erupciones registradas este patrón no se cumple del todo.

En lo referente al acumulado de sismos podemos observar que antes de presentarse una exhalación a una explosión tenemos un considerable aumento en la pendiente. Esta pendiente se debe a que regularmente antes de que se presente algún evento eruptivo se registran enjambres sísmicos.

En lo correspondiente a la energía, podemos decir que la pendiente aumenta en las explosiones de gran tamaño. En las exhalaciones y explosiones menores también tenemos un cambio apreciable en la gráfica pero no tan importante (Figura 64). Respecto a la magnitud podemos ver que se relaciona con la energía liberada. En este caso, al contrario de las erupciones anteriores, no se ve esa fuerte relación.

A partir del mes de septiembre la actividad fumarólica y de tremor empezó a ser más frecuente y de mayor intensidad, manteniéndose en estos niveles hasta principios de Diciembre. En Septiembre es detectado un pequeño domo en la superficie. Los VT se mantienen en profundidades de 4 a 6 km. Esta actividad coincide con un ligero incremento en el valor de  $b$  probablemente debido a la vesiculación del magma que ascendía a través de los conductos a profundidades someras.

Durante el mes de octubre la gráfica del valor de  $b$  registra un ligero incremento, posiblemente los procesos que generaron la actividad durante este mes se efectuaron a profundidades más superficiales que en las que se originaron los VT (Figura 64). El decremento de los valores de  $b$  podrían estar indicando una acumulación importante de esfuerzos que estarían precediendo las condiciones de heterogeneidad de un medio en el que el calor y la densidad de grietas serían la

causa de los altos valores de  $b$  observados durante diciembre 2000- enero2001. Este valor de  $b$  refleja una alta heterogeneidad posiblemente relacionada con el magma que se encontraba ascendiendo en los conductos.

Se realizó la prueba t-test para los parámetros analizados, se hizo la comparación para “antes “, “durante” y “después” de la erupción volcánica (Tabla 10). También se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (Tabla 11).

**Tabla 10. Resultados de la prueba t-test de cada parámetro, haciendo comparación entre el “antes “, “durante” y “después” de la erupción volcánica.**

	$b \pm \sigma$ sismos	Energía sismos	Magnitud sismos	Profundidad
Antes	1.34±.096	2.72801E+15	2.26	-5.077
Durante	1.38±.112	3.22948E+15	2.23	-4.894
Después	1.38±.085	2.5758E+15	2.21	-4.999
t-test (%) 1 y 2	-3.00032538	-2.67679E-16	0.674881933	-18867.89926
t-test (%) 2 y 3	0.56987399	1.15055E-15	0.72822547	11.64623791

Los resultados de la prueba t-test muestran que las variaciones del valor  $b$  y la energía “antes “ y “durante” el evento eruptivo tienen un 99 % de confianza (Tabla 10). Sin embargo, al aplicar este test “durante” y “después “, el intervalo de confianza disminuye a 75% para el valor  $b$  y 85 % para la energía lo cual nos indica que estos parámetros ya no poseen una confianza tan grande.

En lo que corresponde a la magnitud de los sismos se obtuvo que el nivel de confianza para estos datos es de 75%. Los resultados para la profundidad son del 99% lo cual nos indica que la confianza para estos valores es alta.

**Tabla 11. Coeficientes de relación de Pearson, para cada uno de los parámetros.**

Correlación Pearson	b y magnitud	b y energía	b y profundidad	Energía y magnitud	Energía y profundidad	Profundidad y magnitud
$r^2$	0.05080003	-0.00742877	-0.0718971	0.68727059	0.0312298	-0.02492641

A los datos de este periodo, se les aplicó la correlación de Pearson, se puede observar que la mayoría de las correlaciones son inexistentes a excepción de la correlación entre la energía y magnitud la cual es de 0.68 (Tabla 11). Este valor nos indica que estos dos parámetros tienen una correlación de moderada a buena. La correlación se puede comprobar con lo que antes se mencionó, al tener un VT de magnitud considerable afectará directamente en la cantidad de energía liberada como se observa en la Figura 64, aunque en la gráfica para este periodo esto no es claramente visible. Algunos de los coeficientes de correlación presentan signo negativo, esto confirma cuantitativamente la correlación negativa entre los dos parámetros.

Para este periodo podemos decir que la magnitud y el valor  $b$  realmente no tienen ningún tipo de correlación al igual que el valor  $b$  y la energía ya que los valores obtenidos con el coeficiente de correlación son extremadamente bajos.

Alrededor del día 10 de diciembre, que inicia el período “durante” se presenta un rápido incremento del valor  $b$ , cinco días después de la ocurrencia de un sismo magnitud 3.1 ubicado en la zona Sureste a 5km de profundidad. Estos valores de  $b$  indican un cambio en la heterogeneidad del material, es decir, aumenta proporcionalmente con la heterogeneidad y densidad de grietas (Mogi, 1962, 1967).

Del 12 al 18 de diciembre se registra gran actividad sísmica consistente en un elevado número de LP (hasta 300 por día), largos episodios de tremor armónico (hasta 19.5 horas de duración) de amplitud saturada que produjeron oscilaciones pico a pico en los inclinómetros en el rango de 100-200  $\mu$ rad (Martínez Bringas, 2006). Esta actividad estuvo acompañada por grandes emisiones de ceniza.

Estos elevados valores de  $b$  reflejan las condiciones de alta heterogeneidad debido a que los sismos de la zona del cráter se encuentran cerca de los conductos por donde atraviesa el magma, el cual ascendió a una tasa muy alta (180-200  $m^3/s$ ). Esta tasa fue casi el doble de cualquier otra observada previamente (Martínez Bringas, 2006). Después del día 19 de diciembre los valores de  $b$  inician su descenso (Figura 64), regresando a los valores previos alrededor del 23 enero 2001, asimismo la actividad sísmica desciende también.

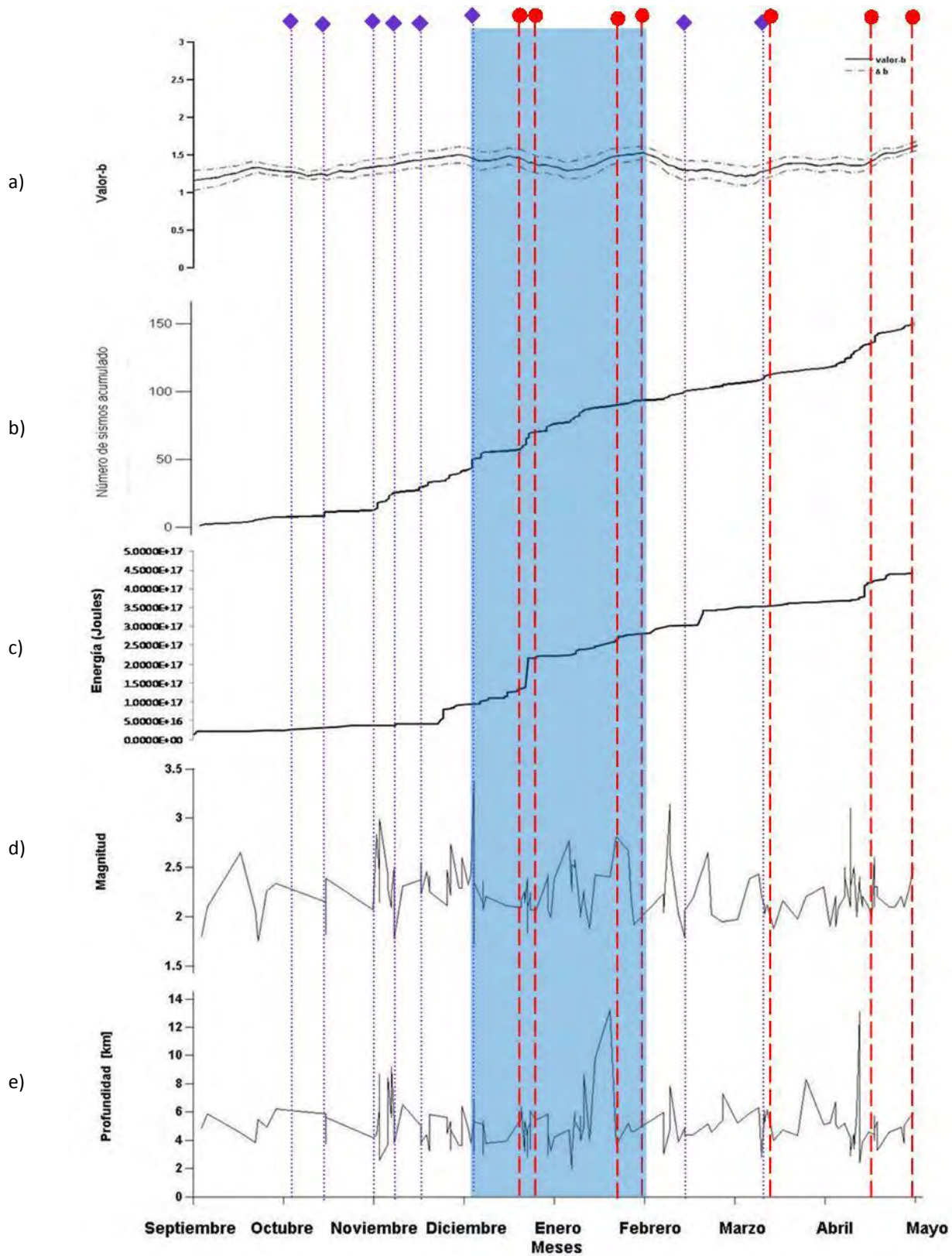


Figura 64 . Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Periodo. La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's; e)

Variaciones de la profundidad de los VT's. La barra vertical sombreada representa el periodo de actividad volcánica analizado. Las líneas punteadas en rojo nos indican las explosiones presentes durante este periodo.

### **Periodo 7 (21 de Mayo- 5 Septiembre 2002)**

Para este periodo los valores de  $b$  son variables a lo largo del periodo analizado. Al presentarse una exhalación o una explosión el valor  $b$  tiende a disminuir y posteriormente presenta un incremento. Este cambio en el valor  $b$  se debe al cambio interno de los esfuerzos dentro del sistema volcánico.

En lo referente al acumulado de sismos podemos observar que antes de presentarse una exhalación a una explosión tenemos un considerable aumento en la pendiente, esta pendiente se debe a que regularmente antes de que se presente algún evento eruptivo se registran enjambres sísmicos. Esta tendencia se registra en todos los periodos analizados.

La energía presenta una relación con las explosiones y exhalaciones. Durante la gran exhalación del mes de Mayo se observa un gran aumento en la energía liberada. Otro periodo en el que esto sucede es durante la exhalación del mes de Junio. En este periodo si se observa la relación que existe entre la energía liberada y la magnitud de los VT's registrados, ya que al presentarse un VT de gran magnitud, la energía liberada aumenta. EL VT de magnitud 3.5 se ve reflejado claramente en el aumento de la magnitud (Figura 65).

Las profundidades de los eventos registrados en este periodo en su mayoría se localizan entre los 5 y 7 km a excepción del evento registrado en octubre el cual tiene una profundidad mayor a 25 km.

Hasta mayo 11 el promedio de exhalaciones diarias se mantuvo alrededor de 20 y se presentaron nueve sismos volcanotectónicos de magnitud menor que 3.0 a profundidades mayores a los 3 km. Se registraron también más de tres horas de tremor armónico, acompañando el inicio del emplazamiento del domo 20, simultáneamente con el inicio de la destrucción del domo 19. Esto coincide con las explosiones durante el mes de mayo (Espinasa-Pereña, 2012).

Se mantuvo un promedio de 40 exhalaciones diarias hasta el 21 de mayo, en que se registró una pequeña explosión seguida por tremor espasmódico que produjo una columna eruptiva cuya altura no pudo ser confirmada por falta de visibilidad, pero se recibieron reportes de caída de ceniza en San Pedro Benito Juárez y algunas partes de la ciudad de Puebla (Espinasa-Pereña, 2012).

Desde entonces y hasta fines de mayo el nivel de actividad disminuyó hasta promediar menos de 20 exhalaciones de vapor de agua y gases diarias, aunque todavía se detectaron algunos segmentos de tremor armónico y pequeños sismos volcanotectónicos. Toda esta actividad estuvo asociada al crecimiento y posterior destrucción del domo 20.

El 17 y 18 de junio el Popocatépetl registró dos erupciones que produjeron columnas eruptivas de más de 2 km de altura sobre el cráter destruyendo el domo 20, y que fueron seguidas por tremor espasmódico que el día 18 persistió por ocho horas (Espinasa-Pereña, 2012). En el mes de Junio tenemos que el valor de  $b$  aumenta y al mismo tiempo se presentan exhalaciones y explosiones. Esta actividad coincide probablemente debido a la vesiculación del magma que ascendía a través de los conductos a profundidades someras.

La disminución de los valores de  $b$  podría estar indicando una acumulación importante de esfuerzos que estarían precediendo las condiciones de heterogeneidad de un medio en el que el calor y la densidad de grietas serían la causa de los altos valores de  $b$  observados durante el periodo. Este valor de  $b$  refleja una alta heterogeneidad posiblemente relacionada con el magma que se encontraba en los conductos.

Se realizó la prueba t-test para los parámetros que se analizaron en este periodo, los resultados se presentan en la Tabla 12. También se les aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (Tabla 13).

**Tabla 12. Resultados de la prueba t-test de cada parámetro, haciendo comparación entre el “antes”, “durante” y “después” de la erupción volcánica.**

	$b \pm \sigma$ sismos	Energía sismos	Magnitud sismos	Profundidad
Antes	1.57 $\pm$ 0.088	3.36075E+15	2.18	-4.747
Durante	1.59 $\pm$ 0.125	2.31444E+15	2.24	-5.097
Después	1.42 $\pm$ 0.123	2.4001E+15	2.26	-5.555
t-test (%) 1 y 2	-2.04982979	1.50981E-14	258.3300878	2.39378862
t-test (%) 2 y 3	10.4116508	-5.5441E-16	-0.857165649	1.140496936



En la Tabla 12 podemos observar que los resultados de la prueba t-test nos demuestran que para el valor  $b$  y la energía “antes” y “durante” tenemos un 85 % de confianza. Sin embargo, “durante” y “después” el nivel de confianza aumenta a 99%, lo cual os indica que estos datos son confiables .

En lo que corresponde a la magnitud de los sismos se obtuvo que el nivel es de 99%. Para la prueba posterior este intervalo cambia al 75%. Los resultados para la profundidad son del 85% lo cual nos indica que el intervalo de confianza para estos valores no es bueno.

El signo negativo del coeficiente de correlación confirma cuantitativamente la correlación negativa entre los dos parámetros.

**Tabla 13. Coeficientes de relación de Pearson, para cada uno de los parámetros.**

Correlación Pearson	b y magnitud	b y energía	b y profundidad	Energía y magnitud	Energía y profundidad	Profundidad y magnitud
r2	-0.16266825	-0.0454902	-0.026641	0.55983233	-0.01443603	-0.03647436

En la Tabla 13 se muestra la correlación de Pearson para cada uno de los parámetros analizados. Se puede observar que la mayoría de las correlaciones son inexistentes a excepción de la correlación entre la energía y magnitud la cual es de 0.55. Este valor nos indica que estos dos parámetros tienen una correlación de moderada a buena. La correlación se puede comprobar con lo que antes se mencionó, al tener un VT de magnitud considerable afectará directamente en la cantidad de energía liberada como se observa en la Figura 65. Podemos observar que algunos de los coeficientes de correlación presentan signo negativo, esto confirma cuantitativamente la correlación negativa entre dos parámetros.

Para este periodo podemos decir que la magnitud y el valor  $b$  realmente tienen una correlación negativa muy baja y para las demás relaciones que se realizaron, se puede decir que no existe relación alguna con estos parámetros, ya que nuestros valores obtenidos con el coeficiente de correlación son extremadamente bajos.

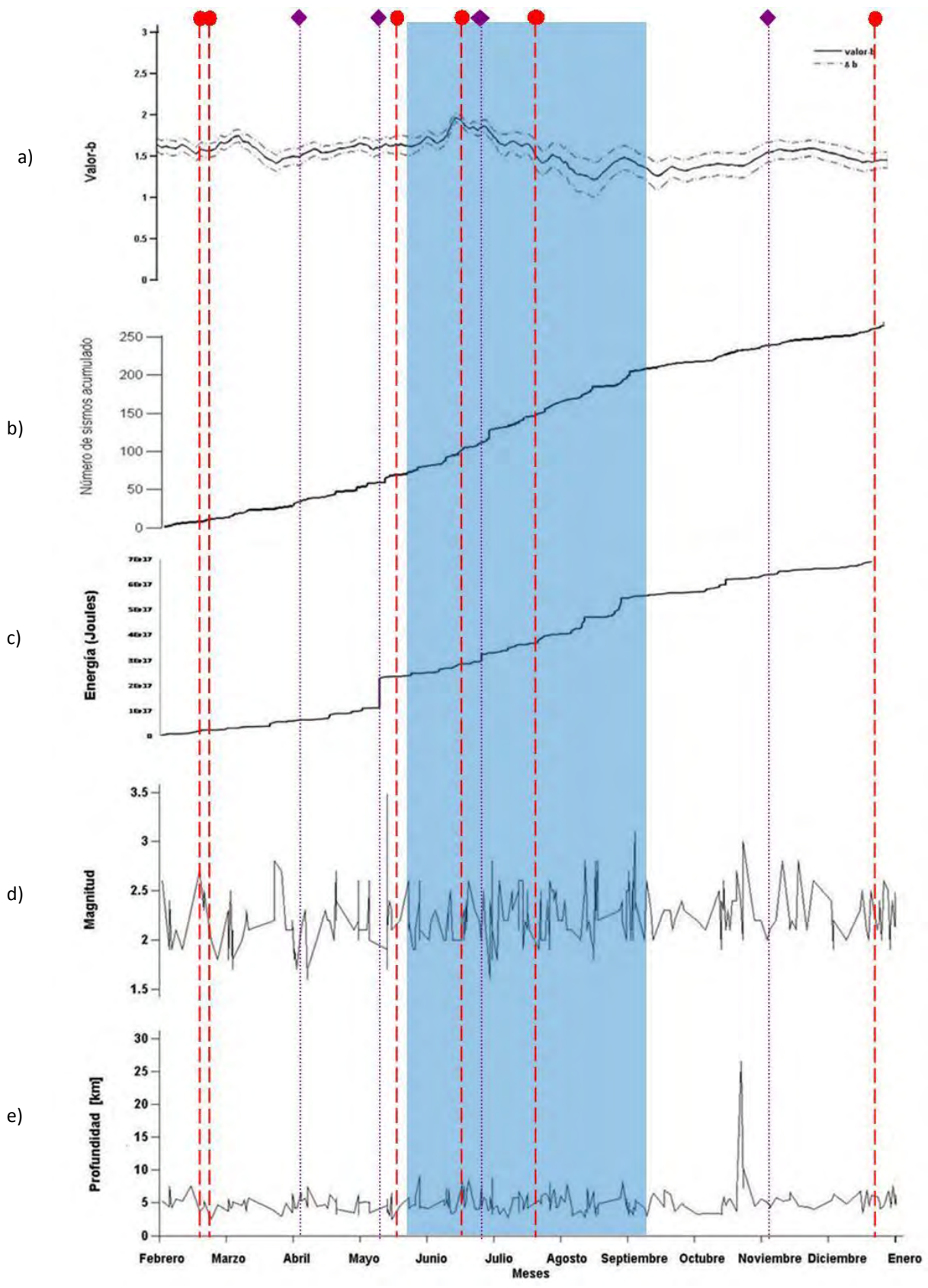


Figura 65 . Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el Periodo. La franja azul representa al lapso en el cual se

presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's; e) Variaciones de la profundidad de los VT's. La barra vertical sombreada representa el periodo de actividad volcánica analizado. Las líneas punteadas en rojo nos indican las explosiones presentes durante este periodo.

### **Periodo 10 (11 de Febrero- 11 de Julio 2014)**

Para este periodo tenemos que el valor  $b$  tiene un comportamiento de campana, ya que al principio del periodo tenemos que este valor se incrementa poco a poco hasta que a mediados del periodo se registran sus máximos valores, posteriormente el valor disminuye drásticamente.

En lo referente al acumulado de sismos podemos observar que antes de presentarse una exhalación a una explosión tenemos un considerable aumento en la pendiente. Este aumento se debe a que regularmente antes de que se presente algún evento eruptivo se registran enjambres sísmicos. Podemos observar en la Figura 66 que la mayoría de las exhalaciones y explosiones coinciden con un cambio en la pendiente del número de sismos acumulados.

La energía presenta una relación con las explosiones y exhalaciones, podemos observar que durante las explosiones y exhalaciones importantes se presenta una liberación de energía considerable, sobre todo en las explosiones se presenta una mayor cantidad de energía liberada.

En la Figura 66 se observa claramente la relación que existe entre la energía liberada y la magnitud de los VT's registrados, ya que al presentarse un VT de gran magnitud, vamos a poder ver que la energía liberada aumenta. En el mes de Noviembre se registró un VT de magnitud 3.5 y este se ve reflejado en el aumento de la liberación de energía. Las profundidades de los eventos registrados en este periodo en su mayoría se localizan entre los 5 y 7 km a excepción del evento registrado en Octubre el cual tiene una profundidad mayor a 25 km.

Durante el vuelo del 11 de febrero pudo observarse claramente el interior del cráter, lo que permitió confirmar que el domo número 48 continuó su crecimiento lento desde noviembre de 2013, rellenando parcialmente el cráter interno y alcanzado un diámetro de unos 200 m (Espinasa Perena, 2012). Para el valor  $b$  se tiene una disminución cuando se presentaron las explosiones, esta disminución puede ser atribuida a la liberación de esfuerzos debido a las explosiones las cuales destruyeron al domo, el aumento de  $b$  se atribuye al cambio de estado de esfuerzos dentro del volcán.

Desde principios de abril se registró un leve incremento en el nivel de actividad volcánica con la presencia de un mayor número de eventos de periodo largo por día acompañando el crecimiento del domo 49. Algunas explosiones lanzaron fragmentos incandescentes hacia las laderas externas y produjeron columnas eruptivas de cenizas y gases de hasta 2 km de altura, como las ocurridas el 13 de abril. El mayor crecimiento del domo se generó principalmente entre los días 13 y 18 de abril, cuando se detectaron varios episodios de tremor armónico de baja amplitud (Martínez, Bringas 2006).

En el período “antes” del evento, el valor de  $b$  tiene un promedio de 0.62, con un ligero incremento, lo cual coincide con la presencia de un domo detectado en esas fechas (Figura 66). “durante” el evento el valor de  $b$  se incrementa considerablemente, siendo su promedio 1.3, y “después” disminuye a 0.72.

Se aplicó la prueba t-test (Tabla 14) y el coeficiente de correlación de Pearson a los parámetros utilizados en el análisis (Tabla 15). Los resultados de la prueba t-test demuestran que los valores de  $b$  y la energía tienen un nivel de confianza del 99%, lo cual indica que las variaciones temporales son confiables.

**Tabla 14. Resultados de la prueba T-test de cada parámetro, haciendo comparación entre el “antes”, “durante” y “después” de la erupción volcánica.**

	$b \pm \sigma$ sismos	Energía sismos	Magnitud sismos	Profundidad
Antes	0.62±.32	1.57111E+16	2.54	-7
Durante	1.03±.26	6.07205E+15	2.43	-6.756
Después	.72±.27	2.7943E+15	2.09	-6.836
t-test (%) 1 y 2	-89.4458443	2.56367E-14	1.815144882	-0.523163197
t-test (%) 2 y 3	14.0635745	4.54111E-15	8.421255987	-1.337570148

En lo que corresponde a la magnitud de los sismos, el nivel de confianza es de 85% para “antes” y “durante”. Este valor nos indica que el intervalo de confianza para este parámetro es significativo. Posteriormente, este intervalo cambia al 99% lo cual nos indica que el intervalo de confianza es altamente significativo. Los resultados para la profundidad son del 75% para “antes” y “durante”, lo

cual nos indica que el intervalo de confianza para estos valores es bajo. Para la prueba de “durante” y “después” el intervalo aumenta al 85%.

**Tabla 15 .Coeficientes de relación de Pearson, para cada uno de los parámetros.**

Correlación Pearson	b y magnitud	b y energía	b y profundidad	Energía y magnitud	Energía y profundidad	Profundidad y magnitud
r <sup>2</sup>	0.10374524	-0.1189479	-0.121641	0.6451049	-0.277742287	-0.39825425

La correlación de Pearson también indica que la mayoría de las correlaciones son inexistentes a excepción de la correlación entre la energía y magnitud la cual es de 0.65. Este valor nos indica que estos dos parámetros tienen una correlación de moderada a buena (Tabla 15). Se observa que algunos de los coeficientes de los resultados de correlación presentan signo negativo, esto confirma cuantitativamente la correlación negativa entre dos parámetros.

Para este periodo podemos decir que la magnitud y el valor *b* realmente tienen una correlación muy baja. De igual manera, el valor *b* y la energía presentan una correlación negativa muy baja. El valor *b* y la profundidad, también presentan una correlación negativa y baja. Para el caso de la energía y profundidad, tenemos que la correlación sigue siendo baja y por ultimo para la profundidad y magnitud la correlación es más alta que en los otros parámetros, pero aun así es muy baja.

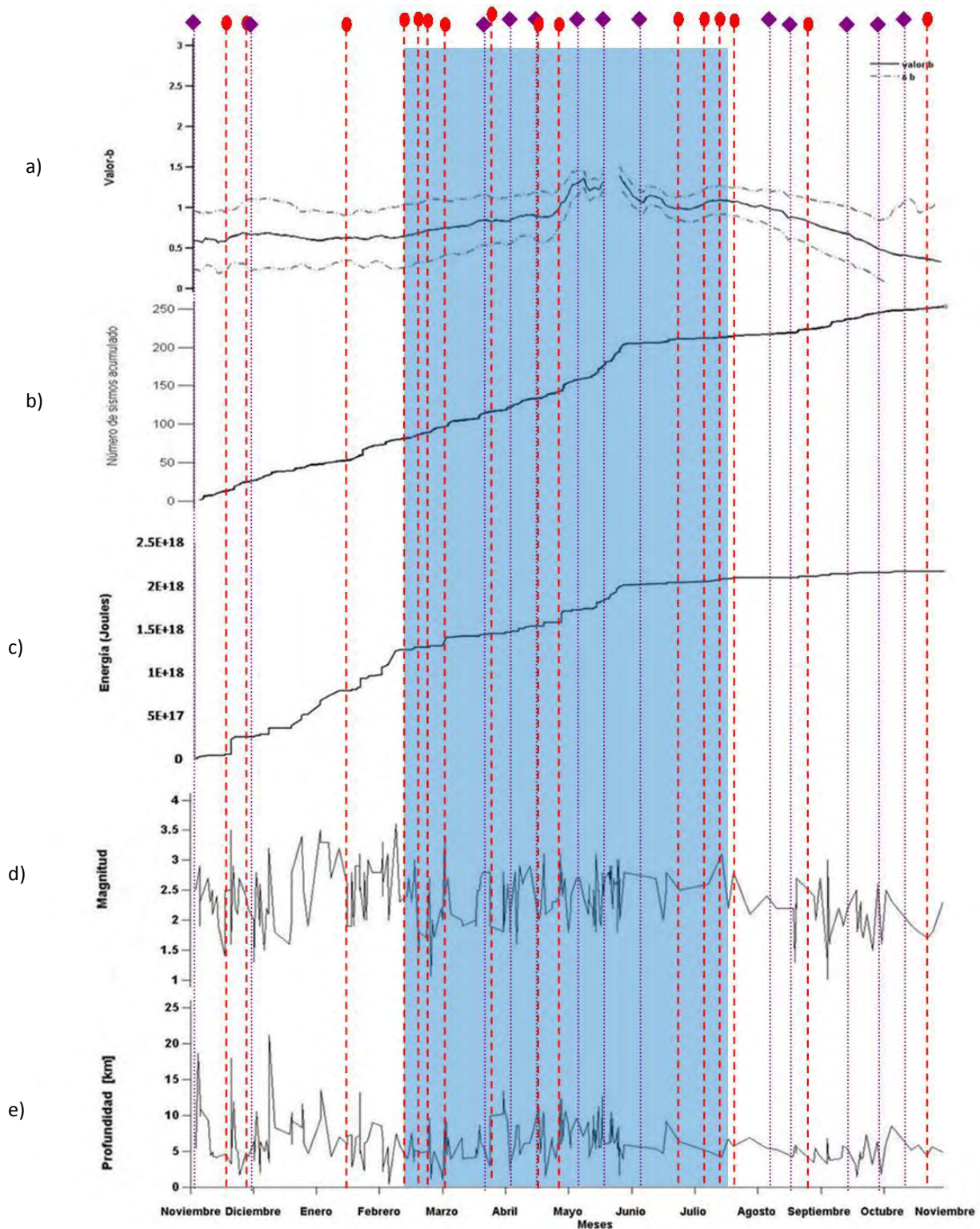


Figura 66. Variaciones temporales de los parámetros analizados durante el periodo . La franja azul representa al lapso en el cual se presenta la erupción. a) Valor  $b$ ; b) Acumulado de sismos. c) Cantidad de energía liberada; d) Variación de las magnitudes de los VT's ; e) Variaciones de la profundidad de los VT's. La barra vertical sombreada representa el periodo de actividad volcánica analizado. Las líneas punteadas en rojo nos indican las explosiones presentes durante este periodo.

Las variaciones temporales de los parámetros analizados para las cinco erupciones estudiadas coinciden en su comportamiento en la mayoría de los casos. La interpretación de estas variaciones es la siguiente:

- Durante los cinco periodos eruptivos analizados, se puede observar que las exhalaciones y explosiones están asociados con valores bajos de  $b$  debido a que al presentarse este tipo de eventos, el valor  $b$  experimenta una disminución y posterior a esta disminución se registra un aumento. Este cambio en el valor  $b$  se debe principalmente a las variaciones de los esfuerzos y del gradiente térmico dentro del sistema volcánico.
- También, durante las erupciones ocurren “enjambres sísmico” o “swarms”. Esto se puede explicar cómo una secuencia de numerosos sismos de pequeña magnitud en un tiempo relativamente corto y compartiendo una zona epicentral (Ibáñez, 2000). Estos enjambres sísmicos pueden ser una buena herramienta para la predicción de grandes erupciones (Benoit y McNutt, 1996). Los swarms de eventos VT se pueden presentar antes, durante y después de la erupción de un volcán (Zobin, 2012; Gorelchik y Zobin, 1971). Este comportamiento nos está indicando que antes de que ocurra algún fenómeno (exhalación o explosión) se altera el interior del sistema volcánico.
- Los cambios del valor de  $b$  en los cinco periodos eruptivos analizados indican un incremento en la heterogeneidad, temperatura y condiciones de esfuerzos en el medio. Este incremento, de acuerdo con Wyss (1973), probablemente está relacionado con una disminución de la amplitud de los esfuerzos aplicados.
- Las variaciones del valor  $b$  podrían indicar un cambio en la heterogeneidad del material, es decir, que el valor de  $b$  aumenta proporcionalmente con la heterogeneidad y densidad de grietas en la roca (Mogi, 1962, 1967). De acuerdo con Warren y Latham (1970) la actividad sísmica empieza abruptamente e inmediatamente después de que es aplicado un gradiente térmico. Por otro lado, el máximo de la actividad corresponde aproximadamente al máximo del gradiente térmico
- La interacción del magma con el agua freática también pudo haber contribuido al incremento de la presión de poro y a disminuir los esfuerzos efectivos.
- Los valores de  $b$  obtenidos después del evento, reflejan condiciones de relajación de esfuerzos en el edificio volcánico. La presión al ser liberada disminuye la presión de poro, las microfracturas se cierran e incrementa el esfuerzo efectivo, y como

consecuencia, los valores de atenuación disminuyen relativamente a valores pre-eruptivos y el valor de  $b$  se incrementa.

- La magnitud y la energía tienen una relación importante. En la mayoría de los casos, al presentarse un evento de magnitud considerable esta se va a reflejar directamente en la liberación de energía.
- Durante las explosiones y exhalaciones de mayor intensidad se presenta una mayor liberación de energía. Este patrón se presenta regularmente en las explosiones.
- Las variaciones de profundidad de los eventos registrados no presenta un determinado patrón, ya que se tienen registrados eventos muy someros y otros muy profundos superando los 30 km. Esto puede ser debido a que el magma al ir ascendiendo asciende a diferentes profundidades por la red de fracturas internas del volcán.
- Los resultados de la correlación Pearson, obtuvimos que los parámetros comparados (magnitud, valor  $b$ , energía liberada y profundidad) no están muy relacionados entre sí, ya que el coeficiente que se obtuvo es bajo. Sin embargo, la correlación entre la magnitud y la energía es significativa.
- Durante el último periodo de análisis (11 de Febrero- 11 de Julio 2014) se obtuvieron correlaciones lineales tanto positivas como negativas. Esto también se observó durante los periodos de mayor actividad como es el caso del periodo 10 (Tabla 10).

Un sistema volcánico se considera como un sistema abierto en el que puede ser introducida energía adicional, como lo es la energía térmica generada por el magma o la sobrepresurización del agua o gas, generando esfuerzos termoelásticos (Warren y Latham, 1970). Por este motivo, un sistema volcánico puede ser considerado como un sistema abierto, ya que se encuentra sujeto a influencias externas además de las derivadas del magma capaces de generar eventos de diferentes rangos de magnitud. En pruebas de laboratorio en las que se han aplicado gradientes térmicos sobre muestras de roca, se ha encontrado que los valores de  $b$  variaron entre 1 y 3 (Warren y Latham, 1970). Estas investigaciones muestran que la sismicidad derivada de la expansión térmica como consecuencia del gradiente térmico se manifiesta en combinación con el campo de esfuerzos externo. Los esfuerzos se elevan si las limitaciones externas e internas impiden la libre expansión térmica. Una limitación externa podría ser la roca encajonante debido al peso litostático. En ausencia de limitaciones externas, los esfuerzos internos se elevaran si la



distribución de temperatura no es uniforme en el cuerpo, o si los elementos del cuerpo tienen diferentes coeficientes térmicos (Benham y Hoyle, 1964).

Mogi (1962) sugiere que altos valores de  $b$  son indicadores de un alto grado de heterogeneidad en el material que se encuentra debajo los volcanes. Por otro lado Warren y Latham (1970) sugieren que el fracturamiento producido por esfuerzos térmicos dan como resultado altos valores de  $b$  y una mayor generación de eventos pequeños. Existen diferentes factores que influyen en las variaciones del valor de  $b$  como son el cambio en la heterogeneidad del material. Un esfuerzo no uniforme produce como resultado valores altos de  $b$  (Mogi, 1962, 1967). Un incremento en el esfuerzo efectivo disminuye el valor de  $b$  (Scholz, 1968). Alternativamente, la interacción de magma con el agua subterránea puede incrementar la presión de poro y disminuir los esfuerzos efectivos incrementando el valor de  $b$ . Durante enjambres sísmicos volcánicos el valor de  $b$  puede alcanzar niveles muy superiores a 1.

En los estudios de los volcanes Off-Ito (Wyss *et al.*, 1997), Long Valley (Wiemer *et al.*, 1998) y Monte Santa Elena (Wiemer y McNutt, 1997) se encontró que las regiones que presentan valores de  $b$  altos, reflejan zonas de heterogeneidad muy alta cercanos ya sea a cámaras magmáticas, o a conductos, o a domos resurgentes. Esto es posiblemente debido a la vesiculación del magma, mientras que los valores menores a 1 se encontraban en las áreas más alejadas.

### **Conclusiones y Recomendaciones.**

1. Los valores de  $b$  entre 1 y 2.3 aquí reportados son tan altos como los medidos experimentalmente por Warren y Latham (1970), los cuales son consistentes con actividad sísmica relacionada a vulcanismo con amplios gradientes térmicos. Con base en estos resultados, se puede considerar que los esfuerzos que afectaron al volcán durante el periodo aquí analizado fueron primordialmente de origen térmico, reflejándose esta condición principalmente en la zona debajo del cráter. Desafortunadamente, no es posible saber con exactitud cuál de estos procesos es el causante de los valores  $b$  altos observados. Sin embargo, es muy probable que éstos estén relacionados a cuerpos magmáticos cercanos.

2. Los valores de  $b \geq 1.5$ , pudieron ser correlacionados con la presencia y desarrollo de domos, ya que el gradiente térmico y heterogeneidad del material en la vecindad del magma se consideró como la principal causa del incremento en ambos parámetros. Alternativamente, la interacción del magma con el agua freática pudo haber incrementado la presión de poro y disminuir los esfuerzos efectivos.

3. La mayoría de los eventos que se estudiaron en este trabajo se presentan en periodos con altos valores de  $b$ , lo cual nos indica que en los periodos de actividad volcánica el valor de  $b$  aumenta. Esto puede fundamentarse a partir del trabajo de Mogi (1962), ya que sugiere que altos valores de  $b$  son indicadores de un alto grado de heterogeneidad en el material que se encuentra bajo los volcanes. Por otro lado, Warren y Latham (1970) sugieren que el fracturamiento producido por esfuerzos térmicos dan como resultado altos valores de  $b$ . La interacción de magma con el agua subterránea puede incrementar la presión de poro y disminuir los esfuerzos efectivos incrementando el valor de  $b$ .

4. Se observaron cambios relativos en los valores de  $b$  obtenidos entre los periodos considerados “antes”, “durante” y “después” de las erupciones en los cinco episodios de actividad analizados. Estos cambios observados pueden considerarse significativos en la mayoría de los casos, de acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba t- student que fueron del 99% de confianza.

5. Los cambios temporales en los valores  $b$  se relacionan con la actividad volcánica, y pueden ser atribuidos a cambios de esfuerzos debidos a la presión del magma en su viaje hacia la superficie, produciendo una alta heterogeneidad en las rocas. Pueden ser interpretados en términos de variación de presión o variación en el grado de saturación y viscosidad de los fluidos en los poros.

6. Los VT's son de gran ayuda para identificar periodos eruptivos, ya que éstos presentan un incremento durante las épocas de mayor actividad. Por el contrario, durante

las épocas de menor actividad, los sismos VT mantienen un comportamiento aproximadamente estable.

7. La energía tiene una relación clara con el acumulado de VT's y la magnitud de los sismos, ya que en la mayoría de los casos observamos que al registrarse un sismo de magnitud considerable, la magnitud se ve reflejada en la energía liberada y en el acumulado de los sismos.

8. Para la correlación de Pearson, podemos decir que cuantitativamente la mayoría de los parámetros comparados no están muy relacionados entre sí, ya que el coeficiente que se obtuvo es realmente bajo. Sin embargo, la correlación entre la magnitud y la energía es significativa.

9. El último periodo analizado fue el que proporcionó mejores resultados en lo que respecta a la correlación de Pearson. Se obtuvieron correlaciones lineales tanto positivas como negativas. Esto también se observó durante los periodos de mayor actividad como es el caso del periodo 10 (Tabla 10).

10. Las variaciones de  $b$  están relacionadas con cambios físicos en el interior de la Tierra. En este caso, se relacionan con un cuerpo que se encuentra a temperatura muy alta, es decir, con una zona con alto contenido de material fundido que ha dado lugar a emisiones de lava y ha contribuido a la formación de los domos ubicados en el interior del cráter. Las variaciones temporales de los parámetros analizados también podrían estar asociadas a cambios de esfuerzos confinados en el interior del volcán, debido a la ocurrencia de pequeños sismos y zonas fracturadas posiblemente rellenas con gas y fluidos.

11. La profundidad de los eventos registrados no presenta un determinado patrón, ya que se tienen registrados eventos muy someros y otros muy profundos superando los 30 km, esto puede ser debido a que el magma al ir ascendiendo por la red de fracturas, el magma al ascender va rompiendo rocas a diferentes profundidades.

12. En base a los resultados obtenidos se puede concluir que las variaciones temporales de  $b$ , de la energía, la magnitud pueden ser consideradas como una buena herramienta para el pronóstico de erupciones volcánicas a corto y mediano plazo. Pudiéndose obtener resultados más confiables si en un futuro son relacionados con otros parámetros volcánicos tales como  $Q_c^{-1}$ , deformación, geoquímica, etc.

## Bibliografía

- Armienta, M. A., De la Cruz-Reyna, S., Morton, O., Cruz, O., & Cenicerros, N. (2002). Chemical variations of tephra-fall deposit leachates for three eruptions from Popocatepetl volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113(1), 61-80.
- Berríos, P. J. S. (2013). *Nuevo método propuesto para la estimación del peligro sísmico, en términos de la magnitud máxima, para las zonas de subducción* (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción).
- BONILLA, J. M. L. (2014). Mapeo tridimensional del valor b en el Volcán Nevado del Ruíz, Colombia [3D mapping of b-value at Nevado del Ruiz Volcano, Colombia]. *Ventana Informática*, (29).
- Boudal, C., Robin, C. 1987. A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern Volcán Popocatépetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 31, pp.115-130
- Chouet B. (1985). Excitation of a buried magmatic pipe: a seismic source model for volcanic tremor. *Journal of Geophysical Research*. Vol.90. no B2. pp 1881- 1893.
- Chouet B. (1996). Long period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*. Vol 380. pp 309-316.
- Cruz-Atienza, V. M., Pacheco, J. F., Singh, S. K., Shapiro, N. M., Valdés, C., & Iglesias, A. (2001). Size of Popocatépetl volcano explosions (1997-2001) from waveform inversion. *Geophys. Res. Lett*, 28(21), 4027-4030.
- Cruz-Atienza, V. M., Pacheco, J. F., Singh, S. K., Shapiro, N. M., Valdés, C., & Iglesias, A. (2001). Size of Popocatépetl volcano explosions (1997-2001) from waveform inversion. *Geophys. Res. Lett*, 28(21), 4027-4030.
- De la Cruz-Reyna, S., & Tilling, R. I. (2008). Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatépetl Volcano, Mexico: importance of an effective hazards-warning system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1), 121-134.
- Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2), 172-187.
- Dwiyono, S. S., Hidayati, S., & Thierry, P. Signs of magma ascent in LP and VLP seismic events and link to degassing: an example from the 2010 explosive eruption at Merapi volcano, Indonesia.
-

- Espinasa-Pereña, R., Martín Del Pozzo A.L. (2006). Morphostratigraphic Evolution of Popocatepetl Volcano. *Geol. Soc. America Special Paper*, 402, 115-137.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92.
- Foulger, G. R., & Julian, B. R. (1993). Non-double-couple earthquakes at the Hengill-Grensdalur volcanic complex, Iceland: Are they artifacts of crustal heterogeneity?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(1), 38-52.
- Gómez Santiago, F. 2009. Sismicidad del Volcán Popocatepetl durante el crecimiento de dos domos de lava en agosto de 2001. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la faja volcánica transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 227-283.
- Gresta, S., Montalto, A., and Patané, G. (1991). Volcanic tremor at Mount Etna (January 1984\_March 1985): its relationship to the eruptive activity and modeling of the summit feeding system. *Bull. Volcanol.* 53, 309-320.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185-188.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F. (1956a). Magnitude and energy of earthquakes. *Annali di Geofisica*, 9, 1-15.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F. (1956b). Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am.* 46, 105-145.
- Hsu, V., Helsley, C. E., Berg, E., & Novelo-Casanova, D. A. (1985). Correlation of foreshocks and aftershocks and asperities. In *Earthquake Prediction* (pp. 878-893). Birkhäuser Basel.
- Ibáñez J. M. (2000) Sismicidad Volcánica. Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada, España.
- Iglesias, J., Jara, M., Aguilar, J., Mota, O., Terán, A., Gómez, A., ... & Sordo, E. (1987). Estudio de las intensidades del sismo del 19 de septiembre en la Ciudad de México. *Universidad Autónoma Metropolitana, México DF.*
- Jiménez, Z., Espíndola, V. H., Espíndola, J. M., 1999. Evolution of the seismic activity from the 1982 eruption of El Chichón Volcano, Chiapas, México.
- Lermo-Samaniego, J., Antayhua-Vera, Y., Chavacán-Ávila M., 2006. Análisis de la Actividad Sísmica en el Volcán Popocatepetl (México) durante el periodo 1994-1997. *Boletín de la*

Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, Núm. 2, P. 253-257.

- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379-424.
- Martín-Del Pozzo, A. L., Cifuentes, G., Cabral-Cano, E., Bonifaz, R., Correa, F., & Mendiola, I. F. (2003). Timing magma ascent at Popocatepetl volcano, Mexico, 2000–2001. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125(1), 107-120.
- Martín-Del Pozzo, A. L., Cifuentes-Nava, G., Cabral-Cano, E., Sánchez-Rubio, G., Reyes, M., Martínez-Bringas, A., ... & Arango-Galvan, C. (2002). Volcanomagnetic signals during the recent Popocatepetl (Mexico) eruptions and their relation to eruptive activity. *Journal of volcanology and geothermal research*, 113(3), 415-428.
- Martín-Del Pozzo, A. L., Cifuentes-Nava, G., Cabral-Cano, E., Sánchez-Rubio, G., Reyes, M., Martínez-Bringas, A., ... & Arango-Galvan, C. (2002). Volcanomagnetic signals during the recent Popocatepetl (Mexico) eruptions and their relation to eruptive activity. *Journal of volcanology and geothermal research*, 113(3), 415-428.
- Martínez B. Alicia. Temporal variations of  $Q_c - 1$  and b-values associated to the volcanic activity at the Popocatepetl volcano, Mexico. Tesis Doctoral. Instituto de Geofísica. UNAM.
- McNutt, S. R. (2005). Volcanic seismology. *Annu. Rev. Earth planet. Sci.*, 32, 461-491.
- Mendoza-Ponce, A. (2012). Estudio de la estabilidad del valor b para regiones sismotectónicas de México. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Mooser, F. (1969). The Mexican volcanic belt; structure and development. In *Proceedings, Pan-American Symposium on the Upper Mantle, Group* (Vol. 2, pp. 15-22).
- Narváez, V. O., & Angulo, E. R. (2007). Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la Ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (76), 61-87.
- Narváez, V. O., & Angulo, E. R. (2007). Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la Ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (76), 61-87.
- Nixon, G. T. (1989). The geology of Iztaccihuatl volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of Mexico. *Geological Society of America Special Papers*, 219, 1-59.

- Novelo-Casanova, D. A. (2005). The forecasting of the 1995 Colima-Jalisco, Mexico, earthquake (Mw= 8): A case history. *Geofísica internacional*, 44(4), 341-346.
- Novelo-Casanova, D. A., & Lee, W. H. K. (1991). Comparison of techniques that use the single scattering model to compute the quality factor Q from coda waves. *pure and applied geophysics*, 135(1), 77-89.
- Novelo-Casanova, D. A., Berg, E., Hsu, V., & Helsley, C. E. (1985). Time-space variation of seismic S-wave coda attenuation ( $Q_c - 1$ ) and magnitude distribution (b-values) for the Petatlan Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 12(11), 789-792.
- Novelo-Casanova, D. A., Bero, E., & Helsley, C. E. (1990). S wave coda Q from 3 to 20 Hz and P wave Q for foreshocks and aftershocks of the Petatlan earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 95(B4), 4787-4795.
- Ohrnberger, M. (2001). *Continuous automatic classification of seismic signals of volcanic origin at Mt. Merapi, Java, Indonesia* (Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek).
- Rincón, A. C. PARAMETROS DE LA LEY GENERALIZADA DE RECURRENCIA SIS\ IICA b-value y d-value.
- Rincón, A. C. PARAMETROS DE LA LEY GENERALIZADA DE RECURRENCIA SIS\ IICA b-value y d-value.
- Robin, C., and Boudal, C. (1987). A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern Volcán Popocatepetl. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31(1), 115-130.
- Sánchez-sesma, F., Bard, P., Campillo, M., & Chávez-García, F. J. (1994). El terremoto de Michoacán de septiembre de 1985: efectos de fuente, trayecto y sitio. *Física de la Tierra*, (6), 157.
- Shapiro, N. M., Singh, S. K., Iglesias-Mendoza, A., Cruz-Atienza, V. M., & Pacheco, J. F. (2000). Evidence of low Q below Popocatépetl volcano, and its implication to seismic hazard in Mexico City. *Geophysical research letters*, 27(17), 2753-2756.
- Siebe C., Abrams M. and Macías J.L., (1995) Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual cono del Volcán Popocatépetl, Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994–1995, CENAPRED-UNAM, México, D.F (1995), pp. 195–220.



- Siebe et al., 1996 C. Siebe, M. Abrams, J.L. Macías and J. Obenholzner, Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, Central Mexico: past key to the future?, *Geology* 24 (1996), pp. 399–402.
- Siebe, C., Abrams, M., Macías, J.L., and Obenholzner, J. (1996a). Repeated volcanic disasters in pre Hispanic time at Popocatepetl, Central Mexico: Past key to the future?: *Geology*, v. 24, p. 399–402.
- Singh, S. K., Mena, E., & Castro, R. (1988). Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(2), 451-477.
- Suárez, G., García-Acosta, V., & Gaulon, R. (1994). Active crustal deformation in the Jalisco block, Mexico: evidence for a great historical earthquake in the 16th century. *Tectonophysics*, 234(1), 117-127.
- Utsu, T. (1966). A statistical significance test of the difference in b-value between two earthquake groups. *Journal of Physics of the Earth*, 14(2), 37-40.
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373-382.
- Wiemer, S., & McNutt, S. R. (1997). Variations in the frequency-magnitude distribution with depth in two volcanic areas: Mount St. Helens, Washington, and Mt. Spurr, Alaska. *Geophysical research letters*, 24(2), 189-192.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4), 859-869.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2002). Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes. *Advances in geophysics*, 45, 259-302.
- Woessner, J., & Wiemer, S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 684-698.
- Wyss, M., & McNutt, S. R. (1998). Temporal and three-dimensional spatial analyses of the frequency–magnitude distribution near Long Valley Caldera, California. *Geophysical Journal International*, 134(2), 409-421.

- Zobin, V.M. (2012). Introduction to Volcanic Seismology, 2nd edition, Elsevier, ISBN 9780444563750.
- Zúñiga, F. R., & Wyss, M. (1995). Inadvertent changes in magnitude reported in earthquake catalogs: Their evaluation through b-value estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(6), 1858-1866.