

# Análisis de patrones sísmicos asociados a algunas explosiones y emisiones de ceniza importantes del volcán Popocatepetl, México

Felipe De la Rosa Moreno\*  
Carlos M. Valdés González\*\*  
Carlos A. Gutiérrez Martínez\*\*\*

*Recibido 23 de abril, 2003; aceptado el 15 de junio, 2003*

## **Abstract**

Based on the seismic events detected at Canario (PPPV) station, located on the North side of Popocatepetl Volcano, five different types of volcanic events were determined using wave-form and spectral characteristics: volcano-tectonic events (VT), long period (LP), rock-fall events, explosions and tremors. From these types of events, the LP were subdivided into seven different families. The behavior of these families before and after periods of volcanic activity (June 30, 1997; December 24, 1997; January 1, November 24, and December 18, 1998; December 18, 2000 and January 22, 2001) at Popocatepetl, showed that the events of three families, clearly preceded the eruptive activity.

## **Resumen**

Mediante la clasificación de los eventos sísmicos detectados en la estación Canario (PPPV) ubicada sobre la ladera Norte del Popocatepetl, se determinaron 5 tipos diferentes de eventos volcánicos con base en la forma de onda y características espectrales: volcano-tectónicos (VT), periodo bajo (LP), derrumbes, explosiones y tremores. De estos cinco tipos de eventos, los LP fueron subdivididos en 7 familias diferentes. El análisis del comportamiento de los eventos de estas familias antes y después de cinco periodos importantes de actividad del volcán Popocatepetl (30 de Junio 1997; 24 de diciembre 1997; 1 enero, 24 noviembre y 18 de diciembre de 1998; 18 de diciembre de 2000 y 22 de enero de 2001), mostró que en el caso de 3 familias, los eventos sísmicos se presentaron antes de la actividad eruptiva.

\* Instituto de Geofísica (UNAM), felrm2002@yahoo.com.mx

\*\* Instituto de Geofísica (UNAM), carlosv@ollin.igeofcu.unam.mx

\*\*\* Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), cgm@cenapred.unam.mx

## Introducción

El Popocatepetl es un estratovolcán andesítico-dacítico que se ubica a 60 km al sureste de la ciudad de México, entre los límites del Estado de México, Morelos y Puebla. Su altura es de 5452 msnm, tiene forma cónica, un diámetro en su base de 25 km y un área del edificio volcánico de aproximadamente 500 km<sup>2</sup>. En un radio de aproximadamente 100 km alrededor del volcán, viven cerca de 25 millones de habitantes, siendo esta una de las razones por las cuales es importante el conocimiento y monitoreo del estado de actividad del Popocatepetl.

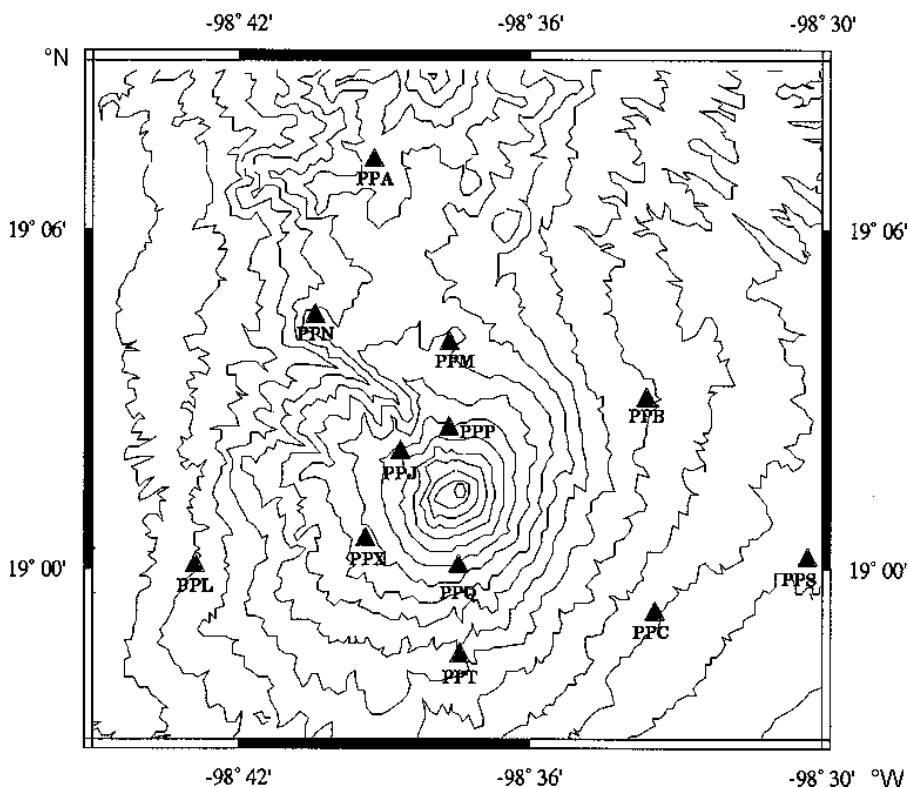
A partir del 21 de diciembre de 1994, el volcán inició una etapa de reactivación, en la que se han producido: emisiones importantes de ceniza, formación de domos y explosiones importantes, así como una gran variedad de señales sísmicas de tipo volcano-tectónico (VT), de periodo largo (LP) y de tremor volcánico. La actividad eruptiva del volcán ha comprendido: emisiones importantes de ceniza que han alcanzado miles de kilómetros de distancia (i.e., GVN, 1996), explosiones que han lanzado fragmentos incandescentes hasta 5 km del cráter y flujos piroclásticos que recorrieron distancias de 15 km, llegando algunos de estos eventos a tener un VEI de 3 (Valdés-González *et al.*, 2001).

El objetivo del presente trabajo es determinar si existe un patrón de comportamiento de los eventos sísmicos, antes y después de siete periodos de actividad volcánica importante: 30 de junio y 24 de diciembre de 1997, 1° de enero, 23 de noviembre y 24 de diciembre de 1998, 18 de diciembre del 2000 y 22 de enero del 2001. En estas fechas, el volcán presentó un incremento en su actividad, concluyendo con una explosión o emisión de ceniza importante.

## Antecedentes

Después de permanecer en un estado de reposo por cerca de 66 años, el volcán Popocatepetl comenzó a mostrar síntomas de reactivación en el año 1993 y claramente entró en actividad el 21 de diciembre de 1994. Desde esa fecha se mejoró el sistema de monitoreo sísmico, el cual inicialmente contaba con 3 estaciones. Actualmente se cuenta con 27 canales de información sísmica provenientes de 7 estaciones de registro ubicadas en las laderas del volcán a distancias de entre 2.5 y 10 km del cráter, y entre los 2500 y 4300 msnm (Figura 1). El sistema de monitoreo sísmico ha permitido, hasta diciembre del 2002, registrar cerca de 2000 sismos volcanotectónicos (VT), más de 80,000 de periodo largo (LP) y un poco más de 1500 horas de tremor, indicando claramente que es un volcán activo, en el que se producen esfuerzos suficientes para fracturar roca y producir eventos VT y generar movimiento de fluidos que se manifiestan como sismos LP y tremores.

Varios estudios [i.e., Valdés-González *et al.* (2002), Arciniega *et al.* (2000) y Lermo *et al.* (1995)], han evaluado la sismicidad del Popocatepetl en diferentes etapas de actividad, o por periodos específicos.



**Figura 1.** Mapa de localización. Las estaciones sísmicas de monitoreo de la red del volcán Popocatepetl están representadas por triángulos. La estación usada en este trabajo es PPP, localizada a 2.5 km al norte del cráter.

**Sismicidad volcánica**

El monitoreo sísmico es una de las herramientas más comúnmente utilizadas para evaluar el potencial eruptivo y el nivel de actividad de un volcán (Harlow *et al.*, 1996; Moran *et al.*, 2000). En algunos volcanes [i.e., Kilauea (Klein *et al.*, 1987), el Monte Santa Helena (Endo *et al.*, 1981) y Nevado del Ruiz (Nieto *et al.*, 1990)], se ha usado la caracterización de los diferentes tipos de actividad sísmica para identificar los procesos causativos. No sólo la clasificación de los diferentes eventos sísmicos observados en un volcán es importante, sino también la evolución de estos parámetros, i.e., tasa de crecimiento, tamaño de la señal, frecuencia de ocurrencia, mezcla de eventos, etc. Hay que considerar también que estos parámetros pueden cambiar a medida que las condiciones internas del volcán son modificadas por la misma actividad, o en algunos casos, por fenómenos externos como grandes sismos (Brodsky *et al.*, 1998; Pérez-Campos, 2001).

Varios ejemplos de variación sísmica antes de etapas eruptivas son presentados por McNutt (2000) y McNutt *et al.* (2000), en donde concluye que la actividad sísmica es considerada como uno de los mejores indicadores, y a menudo confiable pronosticador de erupciones en el corto y mediano plazo (días-semanas). Pero también menciona que a pesar de los avances logrados en las últimas décadas en cuanto a predicción de erupciones, todavía hay mucho que hacer en el entendimiento de las señales sísmicas y que existe la posibilidad de presenciar comportamientos no esperados o anómalos de actividad.

Con base en los estudios de sismicidad volcánica, ha sido posible establecer que: los sismos de tipo VT ocurren como enjambres y no en una relación evento principal y réplicas, como ocurre con sismos de origen tectónico; los sismos LP y el tremor están relacionados con movimiento de fluidos someros y a baja escala; y que la presencia de sismicidad, en sus diferentes tipos, es un síntoma inequívoco de actividad volcánica.

## Datos

Los datos usados en este trabajo corresponden, inicialmente, al análisis de los sismogramas analógicos de la componente vertical, de un sensor de periodo corto (1 Hz), de la estación ubicada en el flanco Norte del volcán a una altura de 4170 msnm y a 2.5 km del cráter. Posteriormente fueron usados los registros digitales de la misma estación, los cuales son transmitidos en tiempo real al Centro de detección y digitizados por un sistema A/D de 12 bits a 100 muestras por segundo y almacenados en forma electrónica.

Se utilizó una sola estación sísmica base, en la que los efectos: de fuente, trayectoria, de sitio e instrumental, se consideraron constantes, partiendo de la idea de que cada familia que se reconozca está compuesta por eventos originados en la misma zona y tienen la misma fuente, o se producen en fuentes muy cercanas y por lo tanto sus efectos de fuente y trayectoria son similares.

La estación referencial se seleccionó por las siguientes razones:

1. Es una estación alejada de fuentes de ruido cultural
2. Tiene una posición cercana a las fuentes de eventos sísmicos
3. Las diferencias entre los eventos se distinguen con claridad
4. Se ubica en un macizo rocoso, y hace que las alteraciones por efecto de sitio sean mínimas.

## Clasificación de eventos sísmicos observados en el volcán Popocatepetl

Para el presente estudio se consideraron siete distintos periodos de actividad del Popocatepetl, en los cuales se presentó una explosión o emisión de ceniza importan-

te. Para la evaluación de los cinco primeros periodos de actividad, se consideraron 30 días antes y 30 después del evento importante. Para los dos periodos restantes de actividad se consideraron 4 y 9 meses, respectivamente. En total, 931 eventos fueron analizados y se clasificaron considerando su forma de onda característica y tipo de envolvente.

En esta clasificación se observaron eventos volcano-tectónicos (VT), eventos LP o emisiones, eventos explosivos, derrumbes y tremores. Los eventos LP o emisiones se subclasificaron en 7 familias, ya que a partir de que se reactivó el Popocatepetl, se han observado emisiones con diferentes formas de onda, asociados a procesos diversos de actividad.

Los eventos sísmicos asociados con una erupción volcánica tienen características especiales: "En una misma estación se pueden observar eventos con formas de onda y contenidos de frecuencia muy diferentes" (Minakami, 1974). Esto puede deberse a cambios en profundidad y/o carácter de la fuente, de ahí la importancia de describir los tipos de eventos observados en el área del Popocatepetl.

Para determinar los tipos de eventos y las familias de los LP, se realizó un análisis espectral de los sismos característicos observados, y se calculó el espectro evolutivo (espectrograma) de cada señal, mismo que ayudó a comparar la distribución de la amplitud y frecuencia de las señales en función del tiempo, entre cada tipo o miembro de la familia estudiada. En el cálculo de espectros de amplitud, se tomó únicamente la fase intensa de la señal, con una ventana de 20 segundos y este segmento de señal, se suavizó con una ventana de Hanning.

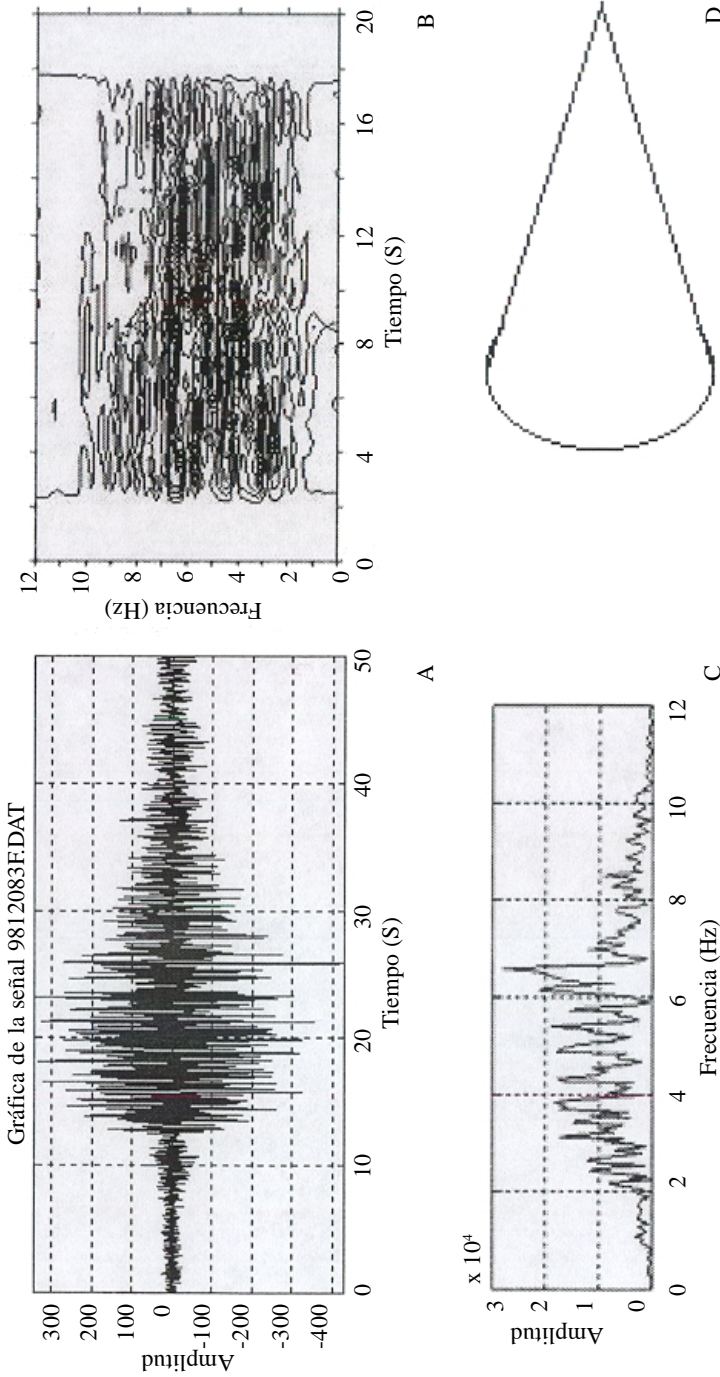
## **Descripción de los diferentes tipos de eventos y sus características**

### ***Eventos tipo VT o volcano-tectónicos***

Estos sismos están relacionados con el fracturamiento de roca en el edificio volcánico y se caracterizan por tener ondas P y S bien definidas, contienen un amplio rango de frecuencias similar al de un sismo tectónico ordinario. A estos eventos también se les denomina volcano-tectónicos (VT). En el caso del Popocatepetl, normalmente tienen una magnitud menor que 4 y en ocasiones se presentan en forma de enjambre. En la Figura 2 se presenta un ejemplo, donde tanto el espectro de amplitud (Figura 2c), como el espectrograma (Figura 2b), muestran un contenido espectral ancho, cuyas máximas amplitudes están alrededor de 5 a 8 Hz.

### ***Eventos LP o emisiones***

Este tipo de eventos están relacionados con la circulación de fluidos magmáticos en los conductos de un volcán. Los eventos LP se distinguen por tener una fase emergente, carecen de fase S y predominan en las frecuencias de 1 a 5 Hz. Chouet (1996)



**Figura 2.** Evento tipo A, ocurrido el día 12 de diciembre de 1998 a las 7:23 GMT. La Figura 2A muestra el sismograma de la señal , la Figura 2B el espectrograma, la Figura 2C el espectro de amplitud y la figura 2D la forma de la envolvente.

define a estos eventos como LP (periodo largo). Las diferentes emisiones o LP, se agruparon en 7 familias que corresponde a las siguientes:

#### *LP Familia tipo 1*

Este tipo de evento es uno de los más comúnmente observados en los registros analógicos y se caracteriza por tener un arribo emergente, la coda disminuye de forma gradual y su duración en tiempo no excede el minuto (Figura 3). La máxima amplitud es registrada varios segundos después del inicio del evento y la frecuencia de su amplitud máxima se encuentra entre 2-3 Hz. Su envolvente puede ser descrita como punta de flecha.

#### *LP Familia tipo 2*

Se caracteriza por tener una semejanza con los tipo VT, sólo que éstos, en lugar de presentar una onda impulsiva, manifiestan un pequeño arribo (conocido como nariz), de escasa amplitud pero claramente distinguible, antes de la llegada de la onda con mayor amplitud (Figura 4). La disminución de la coda es gradual, comparada por ejemplo con la Familia tipo 1.

#### *LP Familia tipo 3*

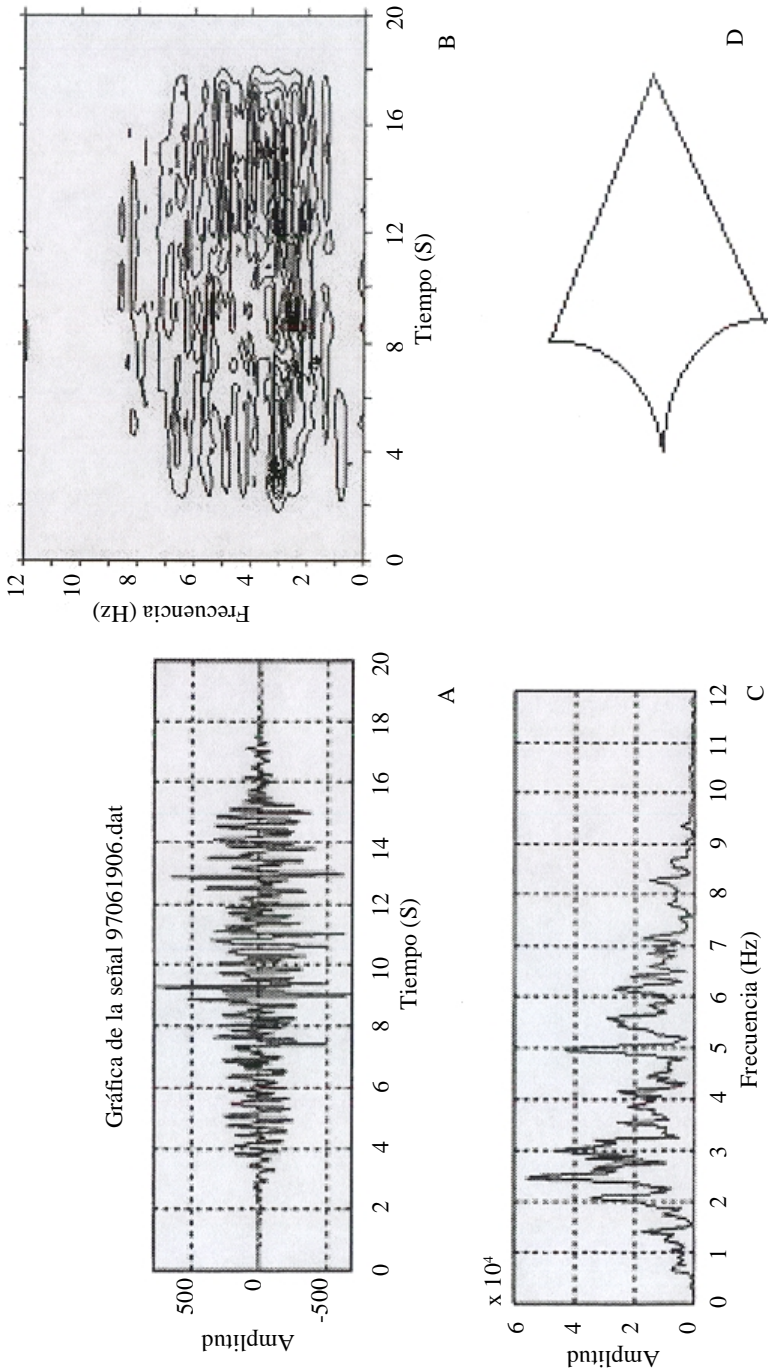
Similar al tipo 2 pero con la diferencia de tener una nariz más larga (entre 15 y 20 segundos), antes de la llegada del arribo de mayor amplitud (Figura 5).

#### *LP Familia tipo 4*

Se caracteriza porque muestra un paquete de ondas con baja amplitud seguido de una nariz, todavía de menor amplitud que puede ser larga o corta y, posteriormente, llega un paquete de ondas con las amplitudes máximas del sismograma (Figura 6). Los espectros y espectrogramas muestran que el primer arribo (nariz) consiste de ondas con una frecuencia mayor, en el rango de los 6 Hz.

#### *LP Familia tipo 5*

Presenta un arribo emergente, su duración en tiempo es normalmente menor a un minuto (Figura 7) y presenta varias ondas con amplitudes mayores. Esta familia de eventos ha ocurrido en contadas ocasiones y no ha sido posible hacer el análisis de frecuencias características debido a que son muy pocos los ejemplos claros de estos sismos. Es importante considerarlos y estudiarlos, ya que, en algunos volcanes de



**Figura 3.** LP Familia tipo 1. Evento ocurrido el día 19 de junio de 1997 a las 15:18 GMT. Descripción similar a Figura 2.



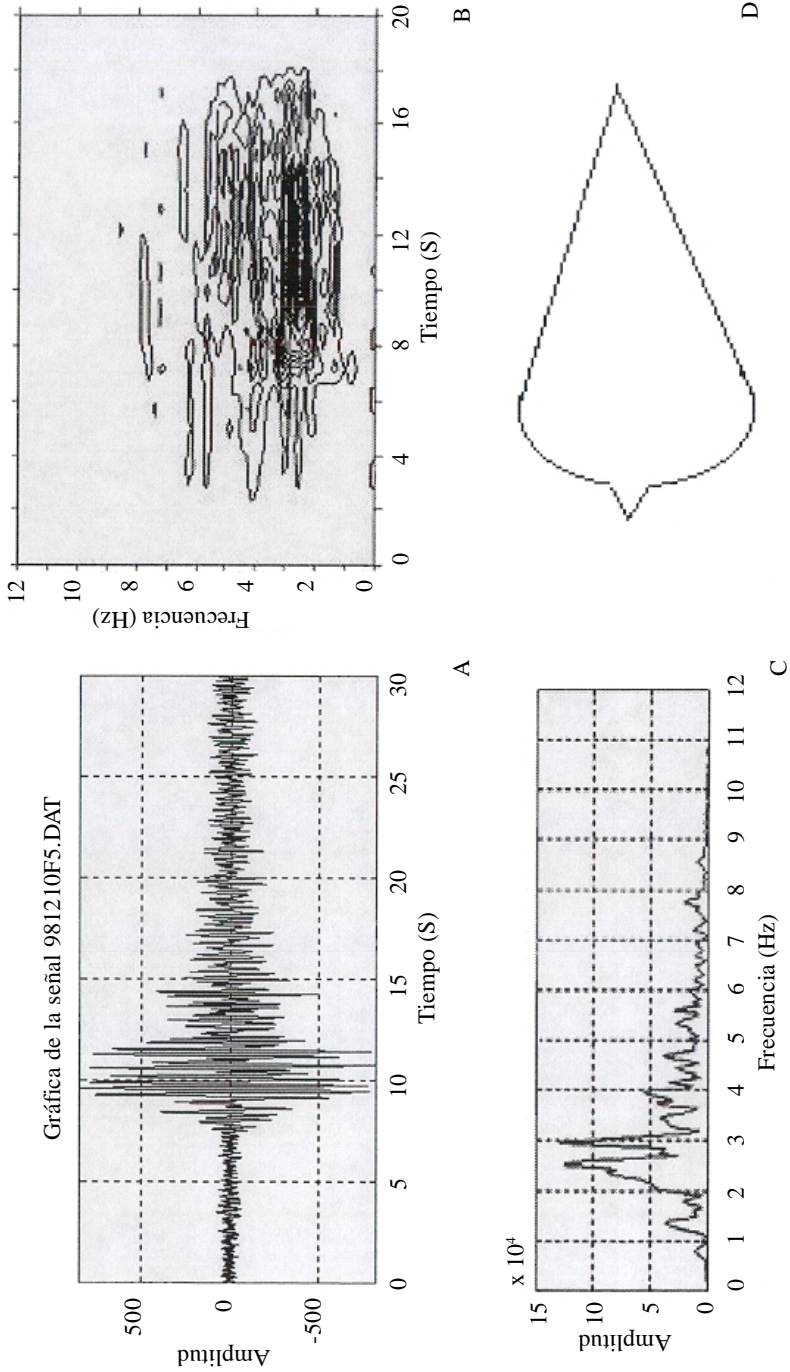
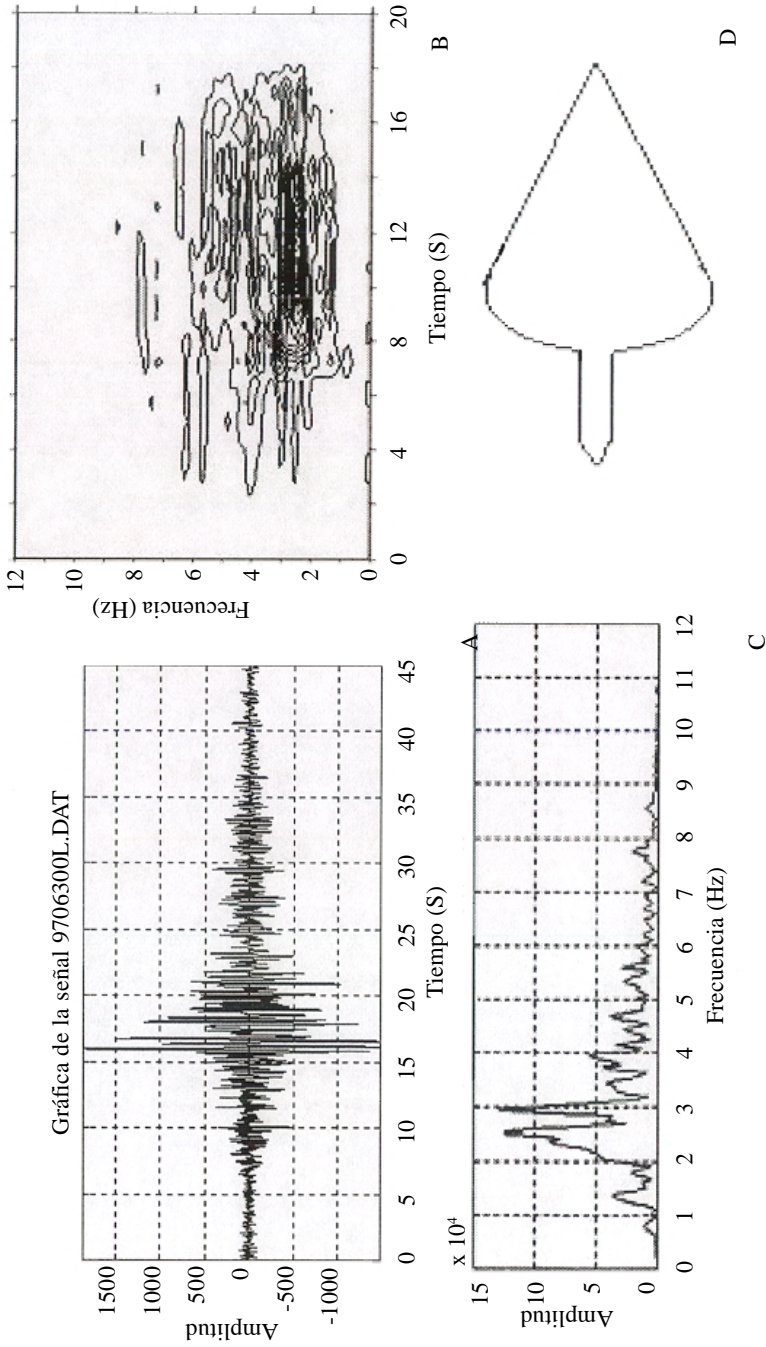
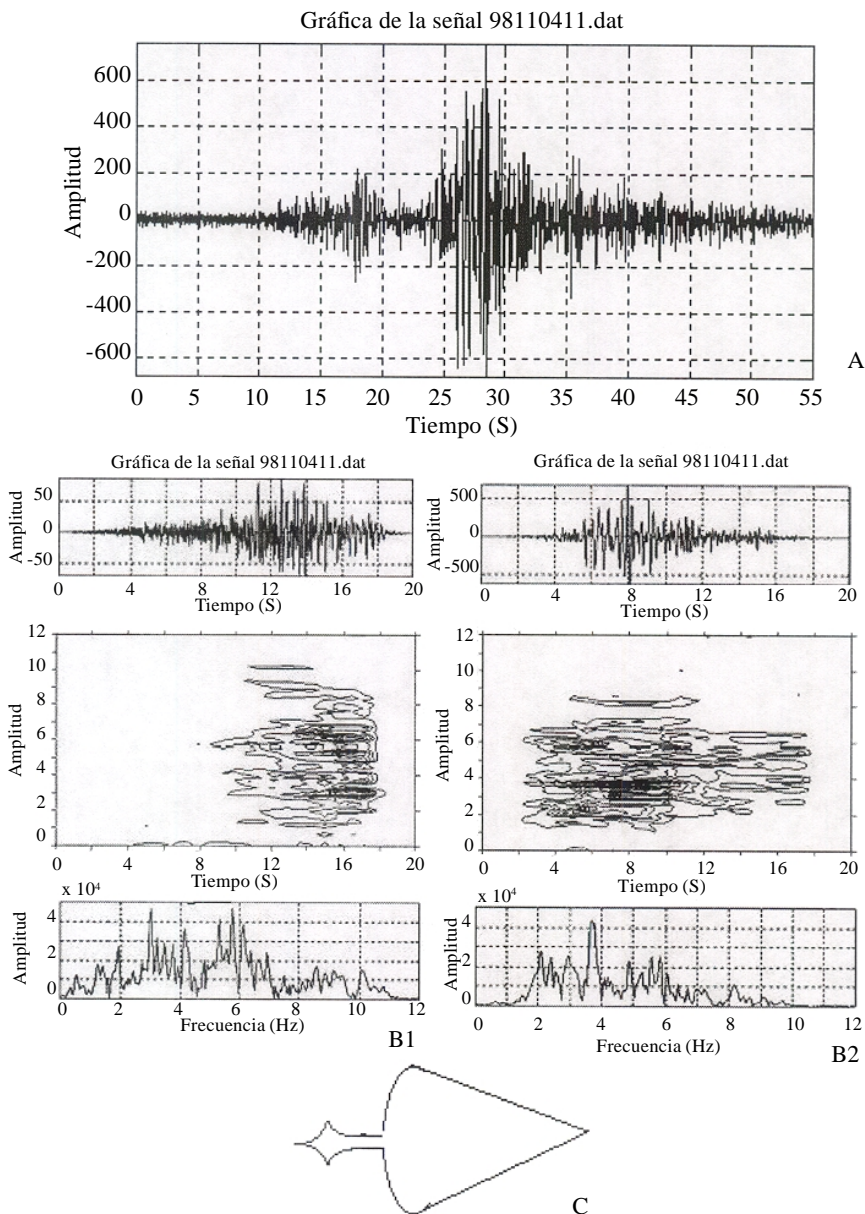


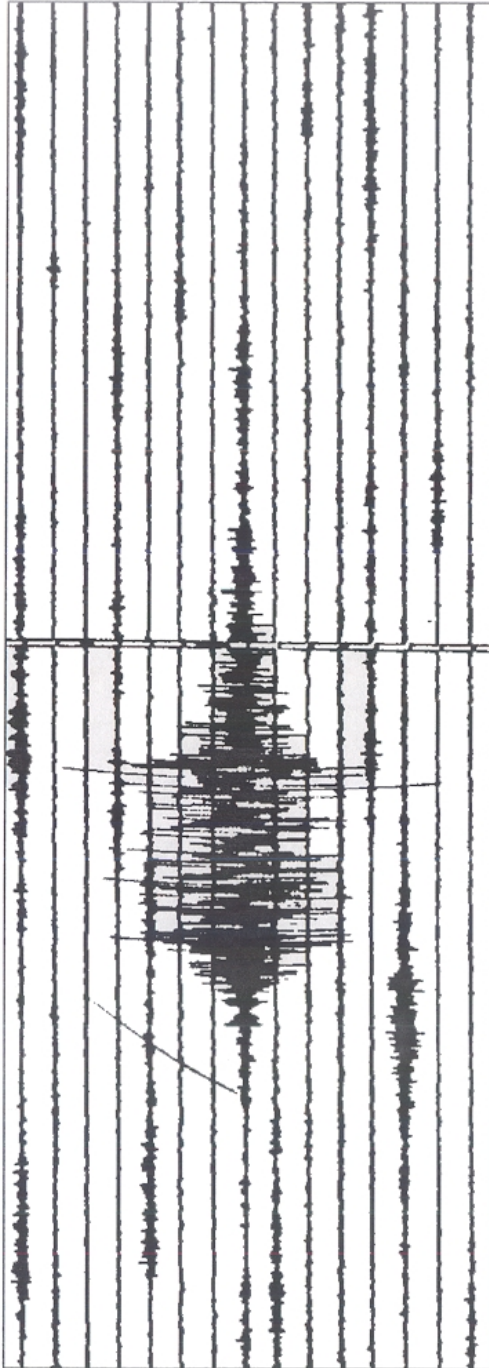
Figura 4. LP Familia tipo 2. Evento ocurrido el día 10 de diciembre de 1998 a las 19:26 GMT. Descripción similar a Figura 2.



**Figura 5.** LP Familia tipo 3. Evento ocurrido el día 30 de junio de 1997 a las 8:48 GMT. Descripción como en la Figura 2.



**Figura 6.** LP Familia tipo 4. Evento ocurrido el día 3 de noviembre de 1998 a las 03:04 GMT. Para el estudio de este tipo de señal se analizó la misma dividiéndola en dos arribos distintos. La Figura 6A muestra la forma de onda de la señal completa y las Figuras 6B1 y 6B2 corresponden al primer y segundo arribo, respectivamente. La Figura 6C muestra la forma de la envolvente.



**Figura 7.** Evento de Familia Tipo 5 ocurrido el día 8 de julio de 1997 a las 5:23 horas.

composición andesítica y dacítica como el volcán Asama, en Japón, se consideran como eventos precursores de una erupción y son conocidos como eventos tipo N (Ahoyama *et al*, 2000).

Es difícil obtener registros digitales de la forma de onda para estos eventos, ya que su baja magnitud y bajas frecuencias los hacen elusivos a los sistemas de detección. Estos sismos son caracterizados porque la coda decae muy lentamente y tienen una frecuencia estacionaria.

#### *LP Familia tipo 6*

Este tipo de evento ocurre en pocas ocasiones aunque lo hace de manera singular, pues tiene una apariencia de dos eventos juntos. La amplitud y el contenido de frecuencia de los dos paquetes principales suele ser similar y su duración típica se mantiene cercana a los dos minutos (Figura 8).

#### *LP Familia tipo 7*

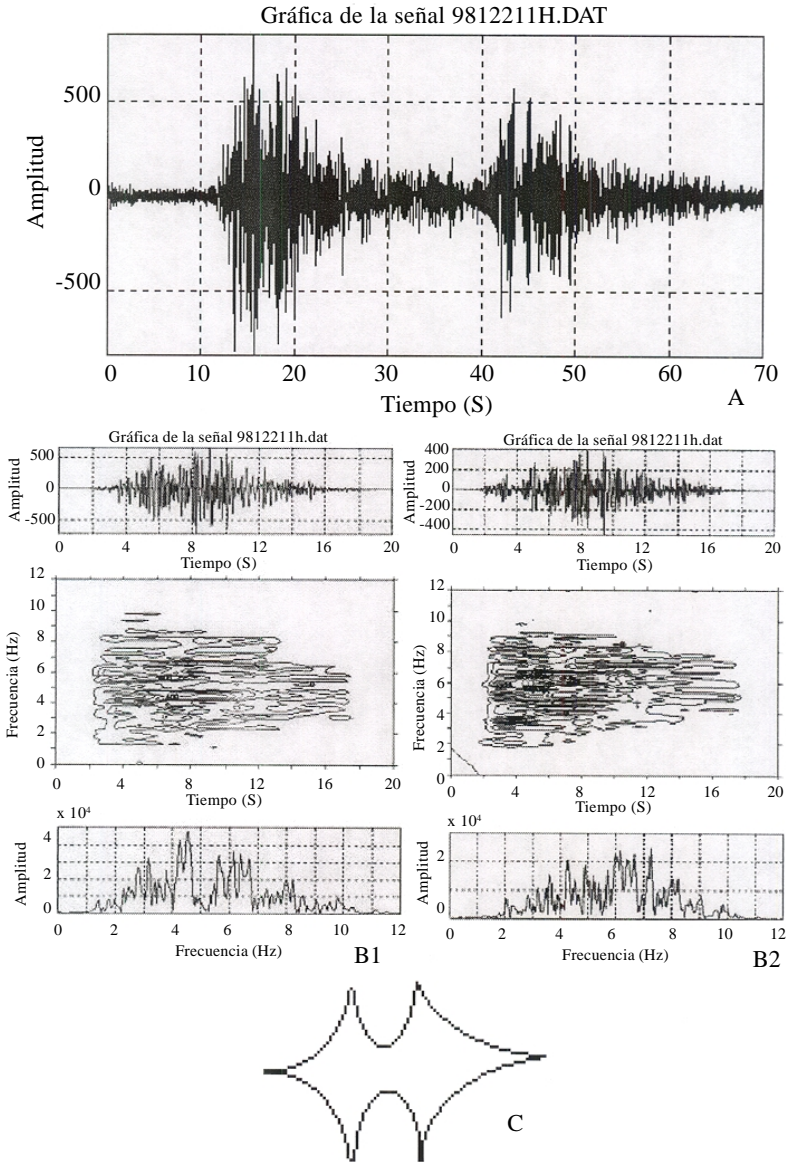
Otro ejemplo común de eventos LP son los eventos de larga duración. Ellos se distinguen por la presencia de un arribo emergente corto, seguido de una coda larga que llega a durar varios minutos. En ocasiones, estos eventos van seguidos de tremores que pueden ser armónicos o espasmódicos (Figura 9). Su espectrograma muestra que la fase de mayor amplitud corresponde a bajas frecuencias (2-3 Hz) y la coda presenta frecuencias más altas.

#### ***Eventos tipo “derrumbes”***

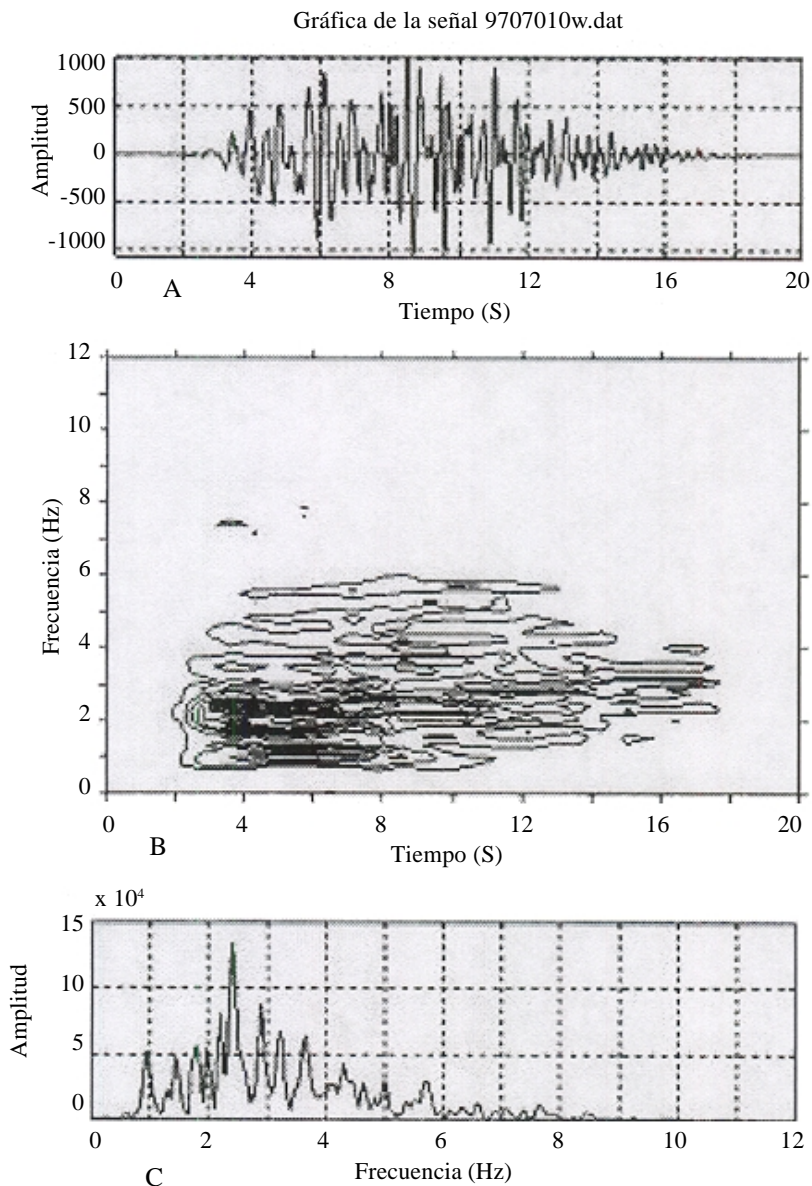
Estos eventos se producen en las laderas del volcán, por el deslizamiento de material suelto, ó en el interior del cráter por el derrumbe de alguna parte del domo. Se mencionan en ésta clasificación debido a que se observan con frecuencia en los registros analógicos. Los eventos se distinguen por no presentar paquetes de ondas bien diferenciadas, pero si un arribo emergente que crece gradualmente hasta un nivel de máxima amplitud y disminuye de nuevo en forma gradual (Figura 10). Sus características espectrales muestran frecuencias más altas (6 Hz) que los eventos LP.

#### ***Eventos tipo “explosiones”***

Estos eventos han sido observados desde la reactivación del volcán Popocatepetl y están relacionados con una liberación súbita e importante de energía. Comúnmente los registros se saturan y su duración es de más de un minuto en su fase intensa (Figura 11). Su ancho de banda es más amplio que en los eventos tipo LP.

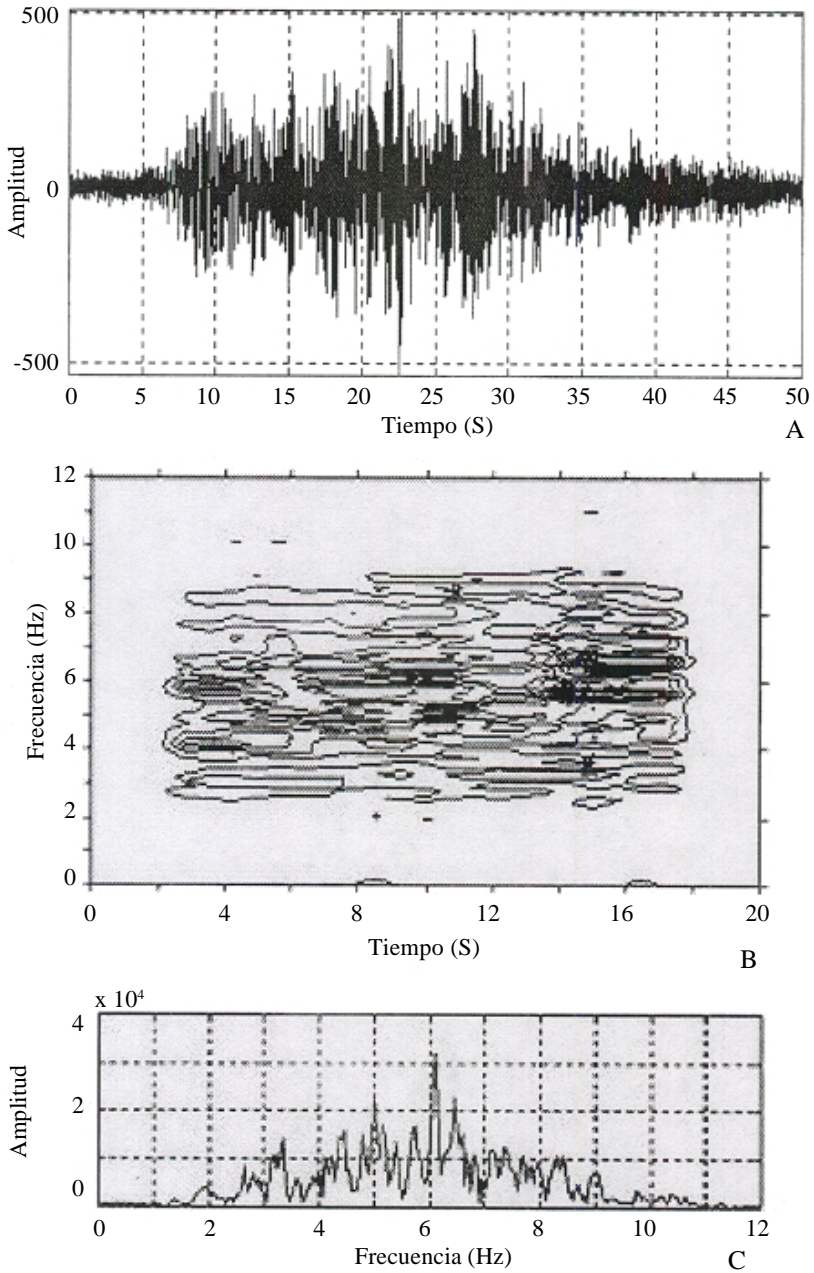


**Figura 8.** LP Familia tipo 6. Evento ocurrido el día 21 de diciembre de 1998 a las 01:16 GMT. Para el estudio de este tipo de señal se analizó, dividiéndola en dos arribos distintos. La Figura 8A muestra la forma de onda del sismograma completo. Las Figuras 8B1 y 8B2 muestran la forma de onda del primero y el segundo paquete de onda, con sus respectivos espectrogramas y sus espectros de amplitudes. La Figura 8C muestra la forma de la envolvente.



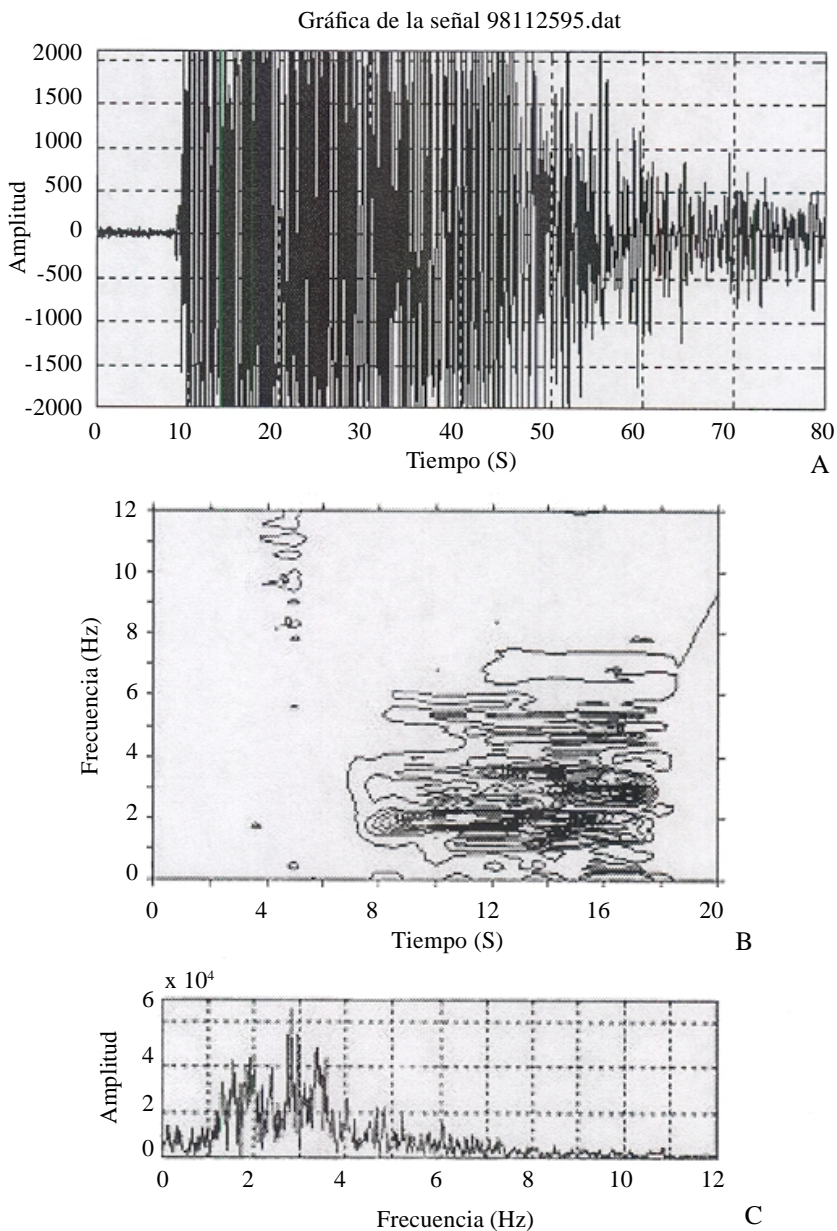
**Figura 9.** LP Familia tipo 7. Evento ocurrido el día 7 de julio de 1997 a las 22:47 GMT. La Figura 9A muestra la forma de onda de la señal, la Figura 9B el espectrograma y la Figura 9C el espectro de amplitud.

Gráfica de la señal 981211A1.DAT



**Figura 10.** Evento tipo “derrumbe”. Evento ocurrido el día 11 de diciembre de 1998 a las 22:13 GMT. La Figura 10A muestra la forma de onda de la señal, la Figura 10B muestra el espectrograma y la Figura 10C el espectro de amplitud.





**Figura 11.** Evento tipo “explosión”. Evento ocurrido el día 25 de noviembre de 1998 a las 18:05 GMT. La Figura 11A muestra la forma de onda de la señal, la Figura 11B el espectrograma y la Figura 11C el espectro de amplitud.

**Tabla 1**  
**Sismicidad anterior al evento del 30 de junio de 1997**

<i>30 de junio de 1997</i>			
<i>Evento o familia tipo</i>	<i>Aumento de actividad a partir de:</i>	<i>Días previos al evento</i>	
		<i>Observaciones</i>	
A	25 de junio de 1997	5	el día 30 hubo 7 eventos minutos antes de la explosión
1	27 de junio de 1997	3	
2	20 de junio de 1997	10	
3	29 de junio de 1997	1	
4	24 de junio de 1997	6	
5	30 de junio de 1997	0	ocurrió unos minutos antes de la emisión
6	23 de junio de 1997	7	
7	4 fechas antes del 30 de junio	14, 8, 7, 5	ocurrieron 4 eventos en fechas distintas
8	No se observan		
9	No se observan		
T1	29 de junio de 1997	1	
T2	Se observan el día 15 de junio	15	No se observa un aumento importante

### ***Eventos tipo “tremores T1 y T2”***

Esta señal sísmica se caracteriza por mantener amplitudes y frecuencias regulares o constantes por periodos de tiempo del orden de minutos, horas o hasta días. Estas señales están asociadas al movimiento de fluidos por los conductos, fisuras o reservorios del volcán. McNutt (1996) afirma que estos eventos son causados por fenómenos de presurización de fluidos en conductos del volcán que ocurren a una profundidad muy somera del cráter y puede ser armónico (T1, Figura 12) con frecuencias espectrales en bandas muy angostas y con sobretonos, o espasmódico (T2, Figura 13), cuyo espectro presenta un ancho de banda de más de 3 Hz y pueden estar asociados a flujos de lodo.

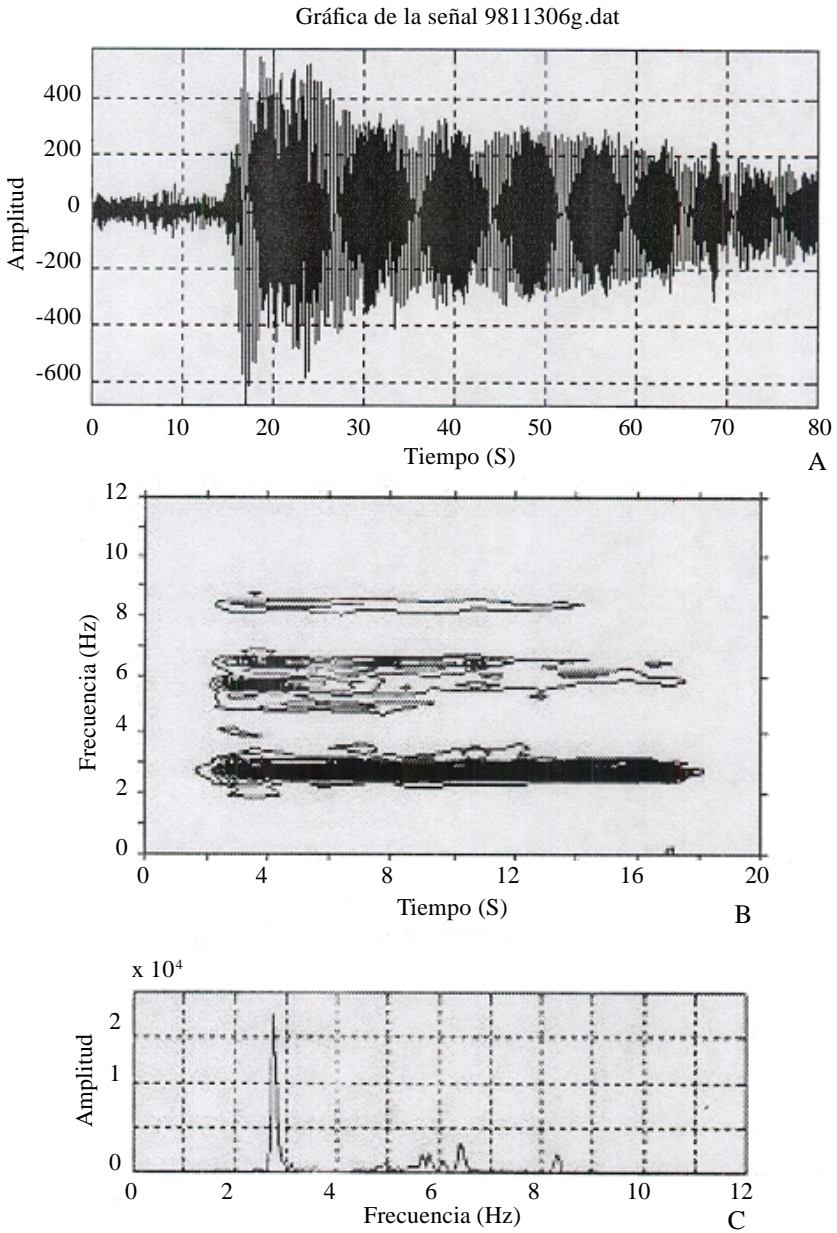
### **Análisis de periodos explosivos importantes**

#### ***Junio 30 de 1997***

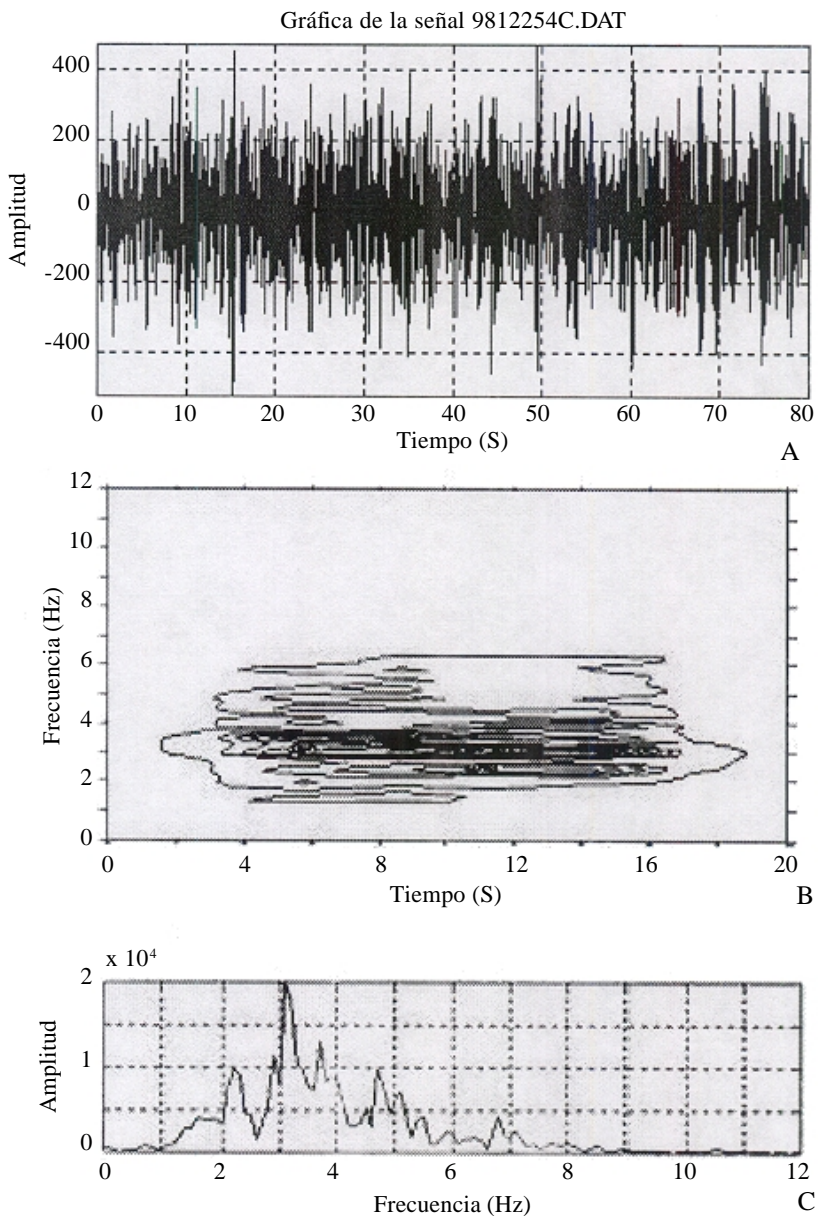
El evento principal del primer periodo de actividad analizado corresponde a la explosión del 30 de junio de 1997. Este evento fue considerado como el más grande hasta esa fecha, desde que el volcán inició su reactivación en diciembre de 1994. Como consecuencia del evento se reportó caída de ceniza en poblados cercanos al volcán y también en la Ciudad de México, así como la generación de un lahar que bajó por el flanco Norte. La Tabla 1 muestra el resumen de la actividad sísmica registrada antes del evento del 30 de junio de 1997. La Figura 14 presenta gráficamente la distribución de los eventos antes y después de la actividad del 30 de junio. Se observa claramente que los eventos tipo A, junto con las familias 1, 2, 3 y 4, se presentan antes y después del 30 de junio, mientras que las familias 5 y 8 sólo ocurren después del evento. Las familias 6 y 7 y los eventos T1 y T2 se presentan antes del 30 de junio y su ocurrencia es casi es nula después.

#### ***Diciembre 24 de 1997***

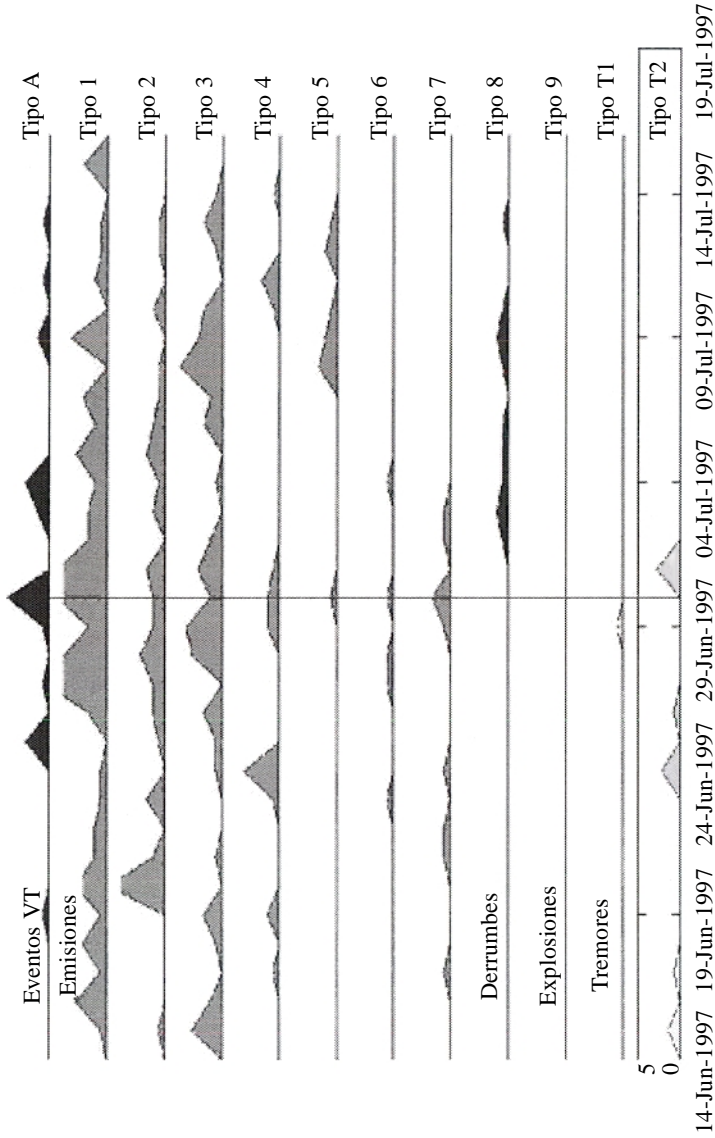
En esta fecha se presentó un evento explosivo con una duración, en su fase más intensa, de aproximadamente 2 minutos, seguido por 15 eventos tipo volcano-tectónico y varios eventos tipo LP. Mediante una cámara de video-grabación se observó la expulsión de material incandescente. El episodio completo duró aproximadamente 30 minutos, al cabo de los cuales todos los parámetros regresaron a la normalidad (Tabla 2). La Figura 15 presenta gráficamente el patrón de comportamiento antes y después del evento del 24 de diciembre de 1997. Se observa claramente que los eventos tipo A, junto con la Familia 5, se presentan antes y después del 30 de junio, mientras que las familias 5 y 8 sólo ocurren después del evento. Las familias 1 a la 4 y 6 a la 7, presentan eventos antes y después del 24 de diciembre.



**Figura 12.** Evento tipo “Tremor T1”. Evento ocurrido el día 30 de noviembre de 1998 a las 15:24 GMT. La Figura 12A muestra la forma de onda de la señal, la Figura 12B el espectrograma y la Figura 12C el espectro de amplitud.



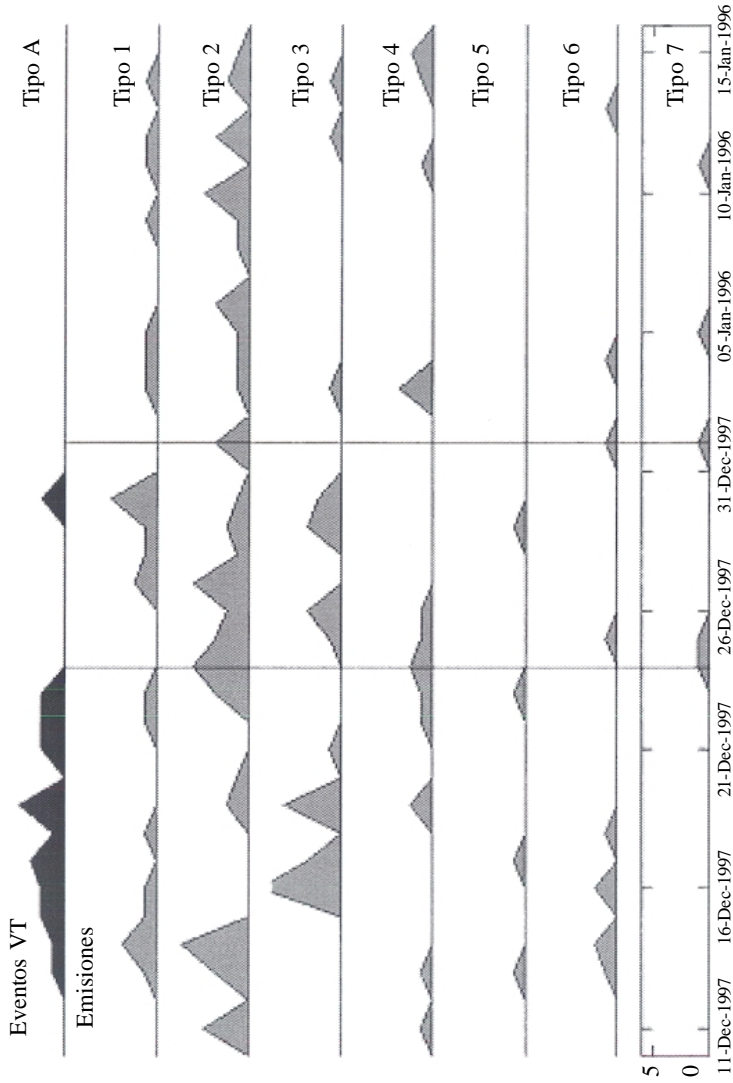
**Figura 13.** Evento tipo “Tremor T2”. Evento ocurrido el día 26 de diciembre de 1998 a las 7:55 GMT. La Figura 13A muestra la forma de onda de la señal, la Figura 13B el espectrograma y la Figura 13C el espectro de amplitud.



**Figura 14.** Patrón de eventos sísmicos observados durante junio y julio de 1997. La escala vertical representa un máximo de 7 eventos. Las líneas continuas indican las fechas de eventos explosivos.

**Tabla 2**  
**Sismicidad anterior al evento del día 24 de diciembre de 1997**

24 de diciembre de 1997			
<i>Evento o familia tipo</i>	<i>Aumento de actividad a partir de:</i>	<i>Días previos al evento</i>	<i>Observaciones</i>
A	12 de diciembre de 1997	5	ocurrieron 5 eventos previos al día 24
1	10 de diciembre de 1997	3	
2	22 de diciembre de 1997	10	
3	15 de diciembre de 1997	1	
4	10 de diciembre de 1997	6	
5	13, 17, 23 de diciembre de 1997	11, 7, 1	ocurrieron 3 eventos anteriores al día 24
6	14, 16, 18 de diciembre de 1997	10, 8, 6	ocurrieron 5 eventos antes del día 24
7	0 eventos anteriores al 24 de diciembre	0	
8	No se observan	0	
9	No se observan	0	
T1	No se observan	0	
T2	No se observan	0	



**Figura 15.** Eventos sísmicos observados en los meses de diciembre de 1997 y enero de 1998. Durante esta crisis no se identificaron derrumbes, explosiones, ni tremores.



### ***Enero 1° de 1998***

El 1° de enero se produjo una explosión que generó una columna de 5 km por encima del cráter y arrojó fragmentos incandescentes hasta una distancia de 4 km del cráter, produciendo un incendio en la zona de pastizales.

Es importante mencionar que, al igual que en otras fases eruptivas, los eventos que se presentan escasamente, son aquellos con características precursoras, tal es el caso de las familias tipos 5, 6 y 7. En esta etapa de actividad, el tremor no fue observado durante el periodo de quince días, sino más bien ocurrió antes de este intervalo de tiempo. La Tabla 3 muestra el resumen de la actividad sísmica registrada antes del evento del 1° de enero de 1998 y el patrón sísmico identificado para esta crisis se puede observar en la Figura 15.

### ***Noviembre 22 de 1998***

A partir del día 22 de noviembre, a las 19:02 horas, el volcán mostró un incremento sustancial en su actividad. Se detectaron emisiones continuas, así como episodios de tremor e incandescencia en la boca del cráter. Para el 23 de noviembre, el nivel de actividad sísmica era mayor que el día anterior. Los episodios de tremor armónico del día 24 por la mañana indicaban, junto con el aumento de la actividad, la probable formación de un nuevo domo. Estos periodos de actividad estuvieron intercalados con episodios de calma. El día 25, a las 14:10 horas, ocurrió la primera explosión que marcó el inicio de una etapa explosiva. Es importante resaltar que en esta etapa de actividad explosiva se observó una relativa calma en la mayoría de los eventos y familias.

La Tabla 4 muestra el comportamiento de la actividad sísmica y la Figura 16 muestra gráficamente la distribución de los tipos y familias de eventos. En esta etapa, sólo la familia de eventos tipo 2 muestra un incremento importante antes del inicio de actividad del 23 de noviembre. Los demás eventos se presentan con similar regularidad antes y después del evento principal o solamente después de que éste ocurrió.

### ***Diciembre 22 y 24 1998***

El 22 y el 24 de diciembre ocurrieron emisiones de ceniza importantes. El resto del mes el volcán redujo su actividad explosiva y sólo se registraron emisiones esporádicas de ceniza y pequeñas explosiones. Para cerrar el año, el volcán generó un sismo volcano-tectónico de magnitud 3.5. El proceso observado a finales de noviembre y diciembre, es un proceso de destrucción del domo que se formó anteriormente en el interior del cráter. La Tabla 5 muestra el patrón de comportamiento antes de la etapa de actividad del 22 y 24 de diciembre de 1998 y la Figura 17 ilustra gráficamente los niveles de ocurrencia.

**Tabla 3**  
**Sismicidad anterior al evento del día 1 de enero de 1998**

<i>1° de enero de 1998</i>			
<i>Evento o familia tipo</i>	<i>Aumento de actividad a partir de:</i>	<i>Días previos al evento</i>	<i>Observaciones</i>
A	30 de diciembre de 1997	1	Ocurren 2 eventos
1	30 de diciembre de 1997	1	
2	27 de diciembre de 1997	4	
3	26 y 29 de diciembre de 1997	5 y 2	Ocurren tres eventos cada día
4	10 de diciembre de 1997	5	Aparecieron hasta el día 27 y desaparecen
5	29 de diciembre de 1997	3	Aparece un evento
6	25 de diciembre de 1997 y el 1° de enero de 1998	6 y el mismo día 1°	
7	24 y 25 de diciembre de 1997		
8	No se observan	0	
9	No se observan	0	
T1	No se observan	0	
T2	No se observan	0	

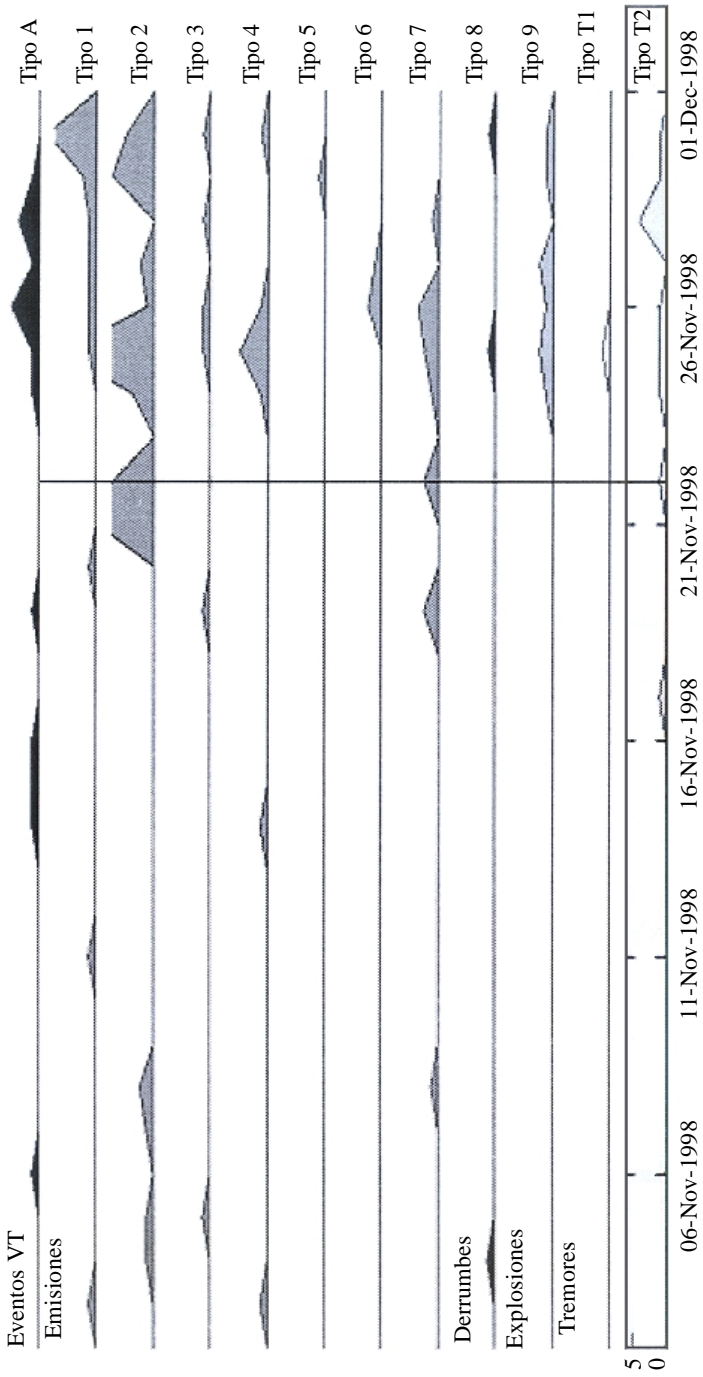
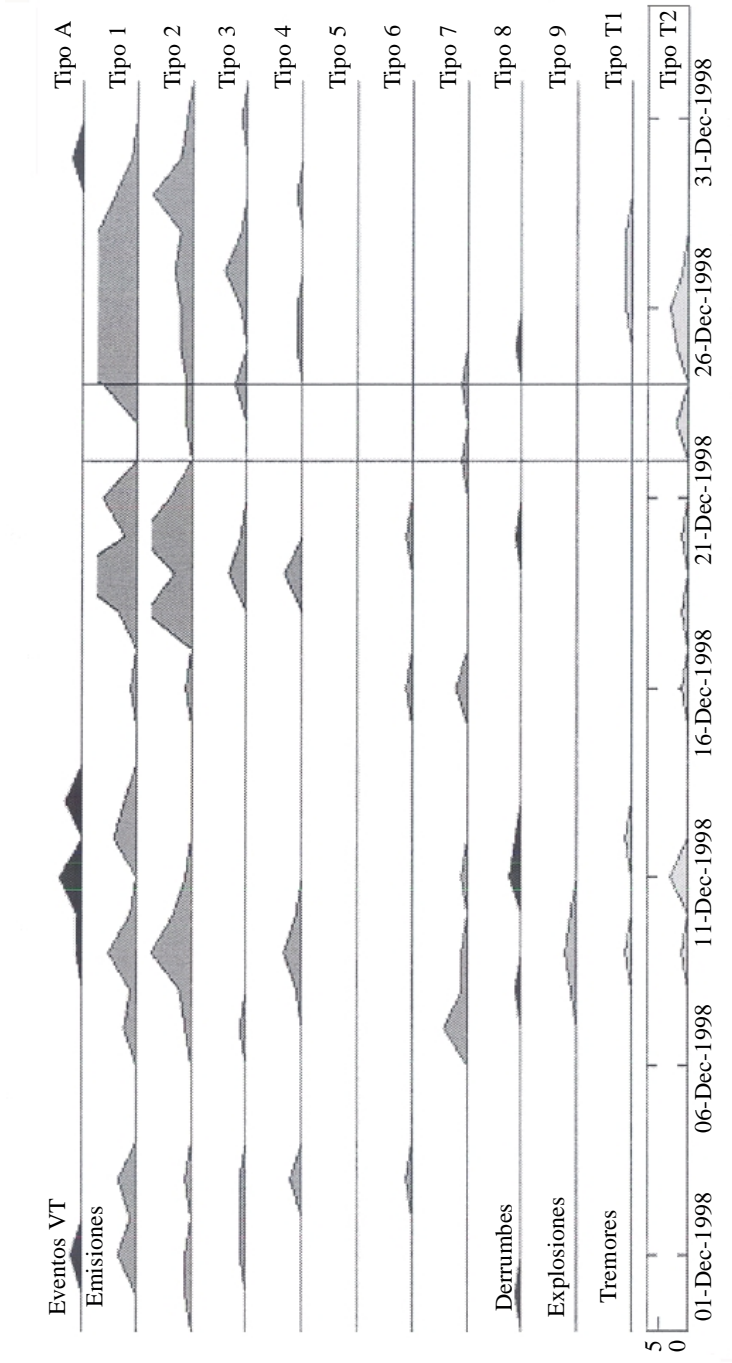


Figura 16. Eventos sísmicos observados durante el mes de noviembre del año 1998. La escala vertical tiene un máximo número de eventos de 6.



**Figura 17.** Eventos sísmicos observados durante el mes de diciembre del año 1998. La escala vertical tiene como máximo 6 eventos.

**Tabla 4**  
**Sismicidad anterior a la crisis del día 22 de noviembre de 1998**

<i>22 de noviembre de 1998</i>			
<i>Evento o familia tipo</i>	<i>Aumento de actividad a partir de:</i>	<i>Días previos al evento</i>	<i>Observaciones</i>
A	6, 14, 15 y 19 de noviembre de 1998	16, 8, 7 y 3	Ocurren estos eventos
1	3, 12, 20 de noviembre de 1998	19, 10, 2	
2	4 al 8 de diciembre de 1997	18	
3	5 y 19 de noviembre de 1998	17 y 3	
4	3 y 14 de noviembre de 1998	19 y 8	
5	No se observan		
6	No se observan		
7	8 y 19 de noviembre de 1998	14 y 3	
8	4 de noviembre de 1998	18	
9	No se observan		Se presenta el día 25 e inicia periodo de explosiones
T1	24 de noviembre de 1998	Posterior	Posterior a la fecha del día 22 de noviembre
T2	23 de noviembre de 1998	Posterior	Posterior a la fecha del día 22 de noviembre

**Tabla 5**  
**Sismicidad sobresaliente para la crisis de los días 22 y 24 de diciembre de 1998**

<i>22 y 24 de diciembre de 1998</i>			
<i>Evento o familia tipo</i>	<i>Aumento de actividad a partir de:</i>	<i>Días previos al evento</i>	<i>Observaciones</i>
A	1, 9, 11, 13 de diciembre de 1998	21, 13, 11, 9	Los días 11 y 13 ocurren dos eventos por día
1	30 de diciembre de 1998	22	Tienden a cero en fechas de mayor emisión
2	17 de diciembre de 1998	5	
3	1,2,3,7 y 19 de diciembre de 1998	1	Ocurren de forma aislada
4	3, 9, 19 de diciembre de 1998	19, 12, 3	Tres eventos por día
5	No se observan		
6	20 de diciembre de 1998		
7	7, 9, 11 y 16 de diciembre de 1998	15, 13, 11, 6	Ocurren 7 eventos en fechas distintas
8	8, 11, 20 de diciembre de 1998	14, 11, 2	Ocurren desde el 30 de noviembre
9	No se observan		
T1	9 y 12 de diciembre de 1998	13 y 10	
T2	9 y 22 de diciembre de 1998	13	

Como se ha visto en fases de actividad anteriores, los eventos de las familias tipo 1 a 4 aumentan en número antes de un evento importante, pero las emisiones de las familias tipo 5, 6 y 7, así como el tremor T1, aparecen en muy contadas ocasiones y normalmente antes de una actividad eruptiva importante.

### ***1° de septiembre al 31 de diciembre del 2000***

Con base en las observaciones en crisis anteriores, se determinó estudiar el comportamiento de las familias tipo 5, 6 y 7, así como el tremor T1, para el periodo de septiembre a diciembre del 2000, ya que estas presentan características de señales precursoras. La actividad que se presentó a mediados de diciembre, correspondió a la formación de un domo de cerca de 19 millones de m<sup>3</sup> en un plazo de aproximadamente 36 horas (Valdés-González *et al.*, 2001). Tres días después, este domo fue destruido parcialmente (<10-20%), mediante tres episodios de actividad estromboliana, con una duración de cerca de media hora cada uno y separados en tiempo por entre 4 y 6 horas.

La Tabla 6 y la Figura 18 muestran la actividad sísmica del 1 de septiembre al 31 de diciembre de 2000. De la tabla y gráfica se observa que los eventos VT fueron aumentando paulatinamente entre septiembre y diciembre, hasta culminar en diciembre 9 con un enjambre de 9 sismos VT. Los eventos LP de la Familia 5 se presentaron pocos días antes del 18 de diciembre y, en cambio, los eventos de las familias 6 y 7 ocurrieron a lo largo del periodo precursor de 4 meses. Los tremores T1 se presentaron 8 días antes de la actividad del 18 de diciembre, primero en un solo episodio de 5 minutos de duración y con amplitudes no antes registradas, las siguientes etapas de tremor se presentaron los días 15 y 16 de diciembre y en total tuvieron una duración de 36 horas y con amplitudes que en muchos episodios saturaron los sismogramas.

### ***1° de enero a septiembre 30 del 2001***

Durante este periodo se identificaron diversas fechas (Tabla 7) en las cuales ocurrieron algunos eventos explosivos, antes de los cuales se observó un incremento en la sismicidad.

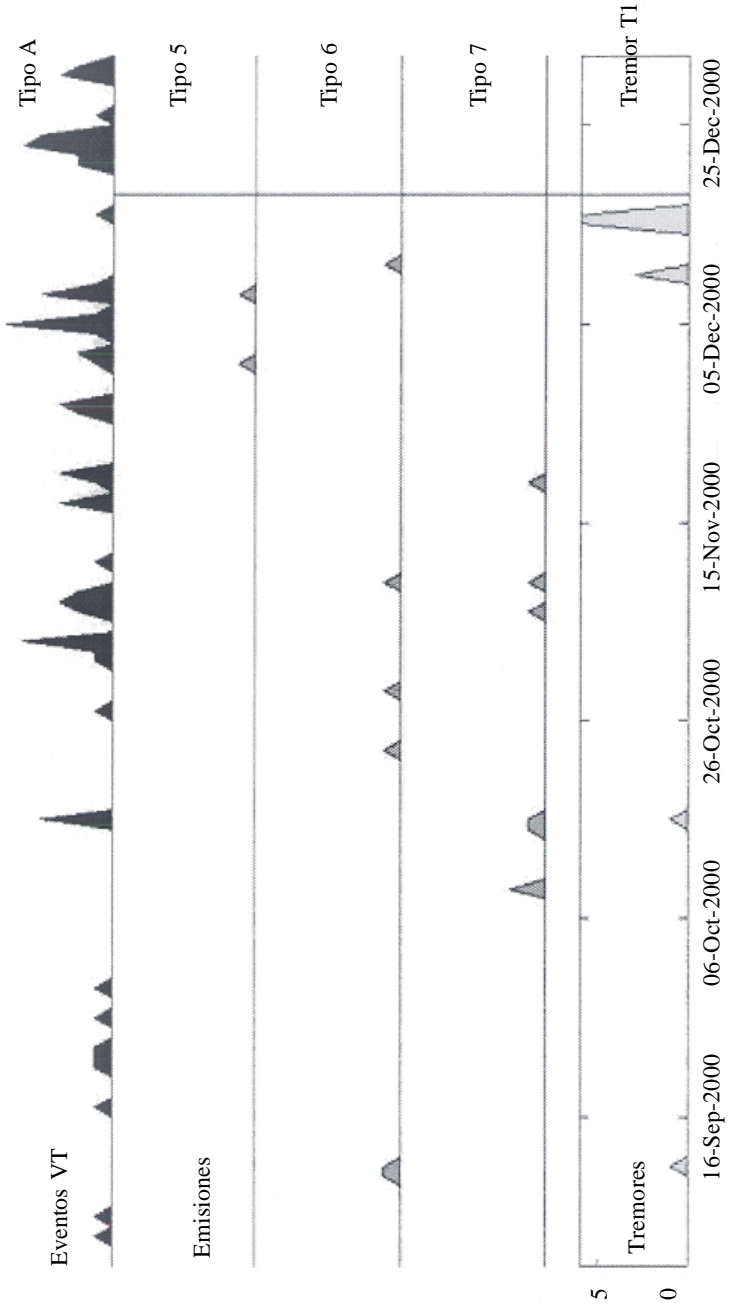
El 22 de enero del 2001 se presentó la actividad explosiva más importante desde que se reactivó el volcán en 1994 hasta la fecha. A esta actividad eruptiva se le catalogó como de IEV 3-4 (Índice de Explosividad Volcánica: Newhall and Self, 1982), produjo flujos piroclásticos, que se transformaron en lahares, los cuales bajaron por diferentes sectores del volcán, siendo el más grande el que bajó por el flanco norte y recorrió una trayectoria de 15 km.

La columna eruptiva de este evento alcanzó más de 14 km de altura, se dirigió hacia el este y formó una nube con un diámetro de cerca de 100 km, visible en la

**Tabla 6**  
**Sismicidad sobresaliente para el intervalo de tiempo del 1° de septiembre al 31 de diciembre del 2000**

<i>1° de septiembre al 31 de diciembre del 2000</i>			
<i>Evento o familia tipo</i>	<i>Aumento de actividad a partir de:</i>	<i>Días previos al evento</i>	<i>Observaciones</i>
A	16 de octubre del 2000		A partir del día 16 de octubre incrementan los eventos a razón de 4 por día y en particular el 9 de diciembre con 9 eventos
5	1° y 8 de diciembre	16 y 8 antes de la crisis del 18 de diciembre	
6	10, 11, 23 y 29 de octubre, el 9 de noviembre, el 1° y el 11 de diciembre		
7	9, 15, 16, 23 y 29 de octubre y los días 6, 9 y 19 de noviembre	30 antes de la crisis del 18 de diciembre	La última emisión de la que se tiene registro antes de la crisis, es la del día 19 de noviembre
T1	11 de septiembre, el día 16 de octubre y los días 10, 15 y 16 de diciembre	8	Los días 15 y 16 de diciembre ocurrieron eventos con amplitudes muy grandes y duración de cerca de 36 horas





**Figura 18.** Eventos sísmicos de septiembre a diciembre de 2000. La escala vertical tiene un máximo de 6 eventos por día.

**Tabla 7**  
**Sismicidad observada de enero a septiembre del 2001.**  
**Las fechas de los sobrevuelos indican el día en que se observaron**  
**los nuevos domos, así como los diámetros de los mismos**

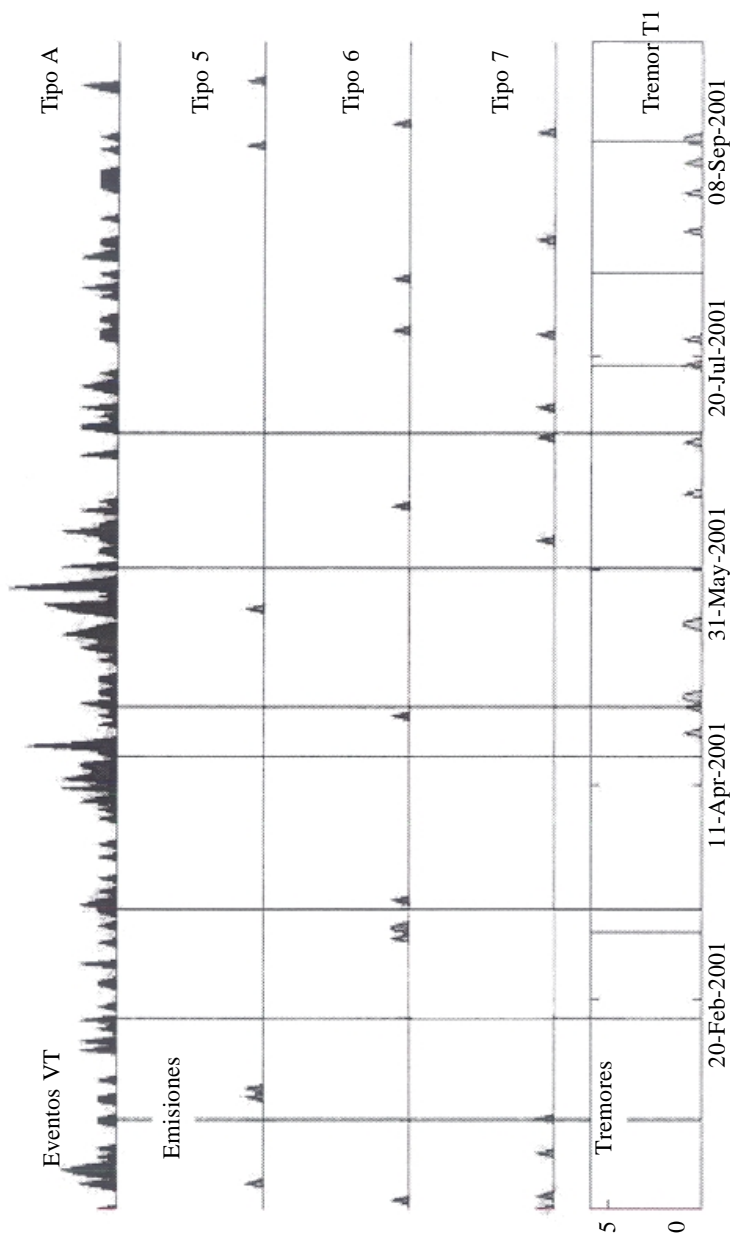
<i>1° de enero a septiembre 30 del 2001</i>				
<i>Fecha de actividad</i>	<i>Número de Emisiones</i>	<i>Días antes de la explosión</i>	<i>Fechas de Sobrevuelo</i>	<i>Diámetro del domo (m)</i>
22 enero	aumento			
6 marzo	68 por día	7 días	13 marzo	150
19 julio	75 por día	27 días	15 agosto	190
9-10 agosto	60 por día	5 días	15 Agosto	190
10 sept	66 por día	14 días	24 sept, 25 oct, 21 nov	Menor a 130

toma del satélite GOES. A este evento le antecedió un incremento en la actividad VT y la presencia de pocos eventos de las familias 5, 6 y 7 (Figura 19).

Etapas posteriores de actividad intensa, como la del 6 de marzo del 2000, fueron relacionadas con la formación de pequeños domos (150 m de diámetro y <1 millón de m<sup>3</sup>). Antes de esta etapa de actividad se observaron algunos eventos de la familia 6. La destrucción de éste domo comenzó el 16 de abril con una explosión, la cual fue precedida varios días antes por eventos VT el 19 de julio, 9-10 de agosto y 10 de septiembre. Otras etapas de actividad intensa fueron correlacionadas con la formación de domos un poco mayores que el de marzo. Algunos eventos de las familias 6 y 7 fueron registrados antes de las tres etapas de actividad de julio y agosto y sólo para la etapa de septiembre se observaron también eventos de la Familia 5.

## Discusión

El análisis de 5 etapas importantes de actividad en el volcán Popocatepetl sugiere que antes de actividad explosiva o emisiones de ceniza importante, hay un aumento en la actividad sísmica de tipo VT y LP de las familias 1 a 4, aunque esta actividad se observa también, después de que el evento importante ocurrió. Sólo los LP de las familias 5, 6 y 7, junto con los tremores T1, se presentan como eventos con ocurrencias esporádicas o inexistentes en épocas de relativa calma y con ocurrencia perceptible antes de eventos importantes. Estos eventos de las familias 5 a 7 comparten la característica de presentar varias ondas o varios segmentos de ondas con amplitudes grandes, a diferencia de las otras familias de LP, en donde la amplitud máxima ocurre en pocas ondas o segmentos de escasa duración en el sismograma. Estas grandes amplitudes reflejan movimientos importantes o de gran presión de material magmático



**Figura 19.** Actividad observada en el volcán Popocatepetl durante el periodo de enero a septiembre del 2001. Las líneas continuas largas indican las fechas de eventos explosivos, las líneas continuas cortas corresponden a fechas de incremento en la actividad sísmica.

en los conductos del volcán. La localización de estos eventos a menos de 2 km bajo el cráter (Arámbula, 2002), sugiere que la presión en los conductos es suficientemente grande para impulsar el material hasta el cráter, logrando fracturar y destruir el domo emplazado. No así los eventos LP de las familias 1 a 4, cuyas amplitudes máximas reflejan presión no crítica.

## Conclusiones

Desde diciembre de 1994 el Popocatépetl ha mostrado diferentes estados de actividad eruptiva, al igual que una diversidad de eventos sísmicos con ciertos patrones de comportamiento.

De acuerdo con el análisis realizado en este trabajo con las señales sísmicas del volcán Popocatépetl en los intervalos de tiempo de junio a julio y diciembre de 1997, enero, noviembre y diciembre de 1998, septiembre a diciembre del 2000 y enero a septiembre del 2001, se identificaron 5 familias de eventos sísmicos a partir de la clasificación de 931 eventos.

Cuando los niveles de actividad sísmica para el caso del volcán Popocatépetl tienden a aumentar y se incrementan las emisiones LP de las familias tipo 5, 6 y 7, combinadas con eventos tipo A y/o tremor armónico, sugiere la probabilidad de que ocurra un evento mayor. El incremento en el número de emisiones de otros tipos de eventos sísmicos no señala la posible ocurrencia de una emisión de ceniza considerable o una explosión, ya que estos eventos también ocurren después del evento significativo. La tasa de ocurrencia de los eventos LP de las familias 5, 6 y 7 es mucho menor que la ocurrencia de los otros eventos LP, por lo que comúnmente esas señales son ignoradas.

Los instrumentos de periodo corto utilizados para este análisis permitieron identificar diferencias significativas en patrones de actividad. Sin embargo, no puede descartarse que el uso de instrumentos de banda ancha abra la posibilidad de encontrar, a través del análisis espectral, rasgos precursores importantes.

## Agradecimientos

Al personal a cargo del monitoreo volcánico del Popocatépetl, del CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), por mantener el sistema funcionando por más de 8 años. Al Sr. Marcos Galicia por su apoyo en el mantenimiento físico de las estaciones de monitoreo del volcán. A dos revisores, por sus sugerencias que permitieron clarificar y mejorar el texto.

## Referencias

Ahoyama H. and Takeo M, 2001. Wave Properties and Focal Mechanism of N-type earthquakes at Asama Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 105, 162-182.

- Arámbula-Mendoza R., 2002. Interpretación del Tremor Armónico Registrado en el Volcán Popocatepetl, Durante la crisis eruptiva de Diciembre del 2000. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 127 pp.
- Arciniega-Ceballos A., Valdés-González C. and Dawson P., 2000. Temporal and spectral characteristics of seismicity observed at Popocatepetl volcano, central México. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 102, 207-216.
- Brodsky E.E., Sturtevant B. and Kanamori H., 1998. Earthquakes, volcanoes, and rectified diffusion. *J. Geophys. Res.*, 103, 23827-23838.
- Chouet B.A., 1996. Long-Period volcano seismicity: Its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 380, 309-316.
- Endo E.T., Malone S.D., Nose S.D. and Weaver C.S., 1981. Locations, magnitudes, and statistics of the March 20-May 18 earthquake sequence. In: Lipman, P.W. and Mullineaux D.R. (Eds.). *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, Washington, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1250, 93-107.
- GVN, 1996. *Bulletin of the Global Volcanism Network*. Smith. Inst., 21(10), 17-19.
- Harlow D.H., Power J.A., Laguerta E.P., Ambubuyog G., White R.A. and Hoblitt R.P., 1996. Precursory Seismicity and Forecasting of the June 15, 1991, Eruption of Mount Pinatubo. In: Newhall C.G. and Punongbayan R.S. (Eds.). *Fire and Mud, Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Institute of Seismology and Volcanology, Quezon City/University of Washington Press, Seattle and London, 371-382.
- Klein F.W., Koyanagi R.Y., Nakata J.S. and Tanagawa W.R., 1987. The seismicity of Kilaueas magma system. In: Decker R.W., Wright T.L. and Stauffer P.H. (Eds.). *Volcanism in Hawaii*, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1350, 1019-1186.
- Lermo J., Cuenca J., Chávez-García F., Huidobro A., Bermúdez M., Rodríguez M., Quaas R., Sánchez-Sesma F., Nava E., Mijares H. y Briones E., 1995. Características espectrales de temblores tipo-A, tipo-B y temblores asociados a la erupción del volcán Popocatepetl, México, en Diciembre de 1994. En: *Volcán Popocatepetl: Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995*, CENAPRED, 139-166.
- McNutt S.R., 1996. Seismic Monitoring and eruption Forecasting of Volcanoes, A review of the state-of-art and case histories. In: *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Scarpa R. and Tilling R.I. (Eds.), Springer, 99-145.
- , 2000. Seismic Monitoring. In: Sigurdsson H. (Ed.). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, 1095-1119.
- McNutt S.R., Rymer H. and Stix J., 2000. Synthesis of Volcano Monitoring. In: Sigurdsson H. (Ed.). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, 1165-1183.

- Minakami T., 1974. Seismology of volcanoes in Japan. In: Civetta L., Gasparini P., Luongo G. and Rapolla A. (Eds.). *Physical Volcanology*. 6, Elsevier, Amsterdam, 1-27.
- Moran S.C., Zimbelman D.R. and Malone S.D., 2000. A model for the magmatic-hydrothermal system at Mount Rainier, Washington, from seismic and geochemical observations. *Bull. Volcanol.* 61, 425-436.
- Nieto A.H., Brandsdottir B. and Muñoz F.C., 1990. Seismicity associated with the reactivation of Nevado del Ruiz, Colombia, July 1985-December 1986. *J. Volcanol. Geothermal. Res.*, 41, 315-326.
- Pérez-Campos N., 2001. Difusión rectificada en el volcán Popocatépetl, debido al sismo de Mw=7.0 del 15 de junio de 1999. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 94 pp.
- Valdés-González C. y Martínez-Bringas A., 2002. Actividad reciente del volcán Popocatépetl desde el 21 de enero del 2001 y sus implicaciones futuras. En: *Geos*, Unión Geofísica Mexicana (resúmenes), III reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, 22(2), 390-391.
- Valdés-González C., De la Cruz-Reyna S., Martínez-Bringas A., Quaa-Weppen R. y Guevara-Ortiz E., 2001. Resumen de la Actividad del Volcán Popocatépetl de Diciembre 1994 a Mayo 2001. En: *Las Cenizas Volcánicas del Popocatépetl y sus Efectos para la Aeronavegación e Infraestructura Aeroportuaria*. CENAPRED e Instituto de Geofísica, 21-41.