

# CAPITULO II

## INSTRUMENTACION

MONITOREO VOLCANICO: INSTRUMENTACION  
Y METODOS DE VIGILANCIA



# MONITOREO VOLCANICO: INSTRUMENTACION Y METODOS DE VIGILANCIA

R. Quaas<sup>1,2</sup>, R. González<sup>1</sup>, E. Guevara<sup>1</sup>, E. Ramos<sup>1</sup>, S. de la Cruz-Reyna<sup>1,3</sup>

## RESUMEN

Dado el gran número de volcanes activos en México algunos de ellos con un potencial importante de erupción, es fundamental establecer oportunamente sistemas de vigilancia y monitoreo que permitan establecer el estado de su actividad y detectar variaciones que indiquen el inicio de una fase eruptiva mayor. La moderada actividad sísmica y fumarólica del volcán Popocatepetl iniciada en 1993 condujo a iniciar la instalación de estaciones sísmicas de monitoreo. Cuatro estaciones estuvieron en operación y registraron la actividad del volcán durante la pasada crisis iniciada el 21 de diciembre de 1994. A la fecha el sistema está instrumentado con 11 estaciones telemétricas, 8 de ellas con sismómetros y 3 con inclinómetros y un centro de adquisición y procesamiento de datos en Cenapred. En el presente trabajo se describen en forma detallada el sistema instrumentado en el volcán, las técnicas de observación empleadas y los sistemas para el registro y procesamiento de la información.

## 1. INTRODUCCION

México se encuentra situado en una región con importante actividad volcánica. De los 3000 volcanes que aproximadamente tiene el país, 14 son considerados activos. Lo anterior hace evidente que existe un alto riesgo asociado, el cual irá aumentando con el continuo crecimiento de la población y de las áreas urbanas, particularmente aquellas ubicadas en la cercanía de volcanes activos. México ha vivido experiencias recientes de volcanes que han presentado fases eruptivas importantes, algunas con consecuencias desastrosas. Ejemplo de ello son los volcanes: Parícutín, que hizo erupción en 1943, el Chichón en 1982, el Tacaná en 1986 y el volcán de Colima el cual ha tenido episodios de gran actividad en los últimos años. La experiencia mas reciente se vivió a finales de 1994 cuando el volcán Popocatepetl pasó de una fase moderada de actividad a un estado de gran intensidad sísmica y fumarólica con abundante emisión de gases y cenizas.

La única manera de percibir y poder evaluar el estado de actividad en un volcán es a través de la observación y vigilancia sistemática mediante diversos métodos visuales e instrumentales. Si éstos se aplican en forma anticipada en las fases previas a un proceso eruptivo, es posible en la mayoría de los casos detectar oportunamente un cambio cualitativo y cuantitativo de la actividad que incluso pudiese conducir a una predicción en el corto plazo de un proceso eruptivo inminente. Se desprende de lo anterior que es fundamental establecer sistemas de vigilancia y monitoreo en todos los volcanes potencialmente riesgosos del país a fin de permitir el establecimiento de programas preventivos de acción frente a posibles desastres.

---

<sup>1</sup> Centro Nacional de Prevención de Desastres.

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>3</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ejemplo de un sistema de vigilancia y monitoreo oportunamente establecido es el del volcán Popocatepetl. Desde hace varios años algunos grupos de investigadores de diversos institutos han venido planteando la necesidad de un sistema de monitoreo para este volcán e inclusive comenzaron con su instrumentación (De la Cruz et al., 1993). En un esfuerzo conjunto del Centro Nacional de Prevención de Desastres, los Institutos de Ingeniería y de Geofísica de la UNAM, y con la oportuna colaboración del U.S. Geological Survey a través del Cascades Volcano Observatory, CVO de Vancouver, Wa., se estableció en un plazo de solo varios meses un sofisticado y complejo sistema de observación mediante telemetría con una central de adquisición y procesamiento de datos.

El objetivo principal del presente trabajo es la descripción de la instrumentación del volcán Popocatepetl y la reciente experiencia de observación y registro de su actividad durante la crisis de diciembre de 1994. Después de una breve explicación general de los tipos y métodos de monitoreo usualmente empleados en volcanes, se describen los trabajos de instrumentación y monitoreo realizados por diversas instituciones de investigación antes de la erupción de 1994. Aunque de una manera breve, se presentan los registros sísmicos obtenidos el 21 de diciembre. Como parte central del trabajo, se describe a continuación la actual red de observación formada por 11 estaciones de medición, se dan sus especificaciones y se comentan las técnicas de telemetría y registro remoto utilizadas. Se cubren los distintos tipos de estaciones de campo, desde el punto de vista de sus instalaciones, instrumentación y operación, y también el equipamiento y funcionamiento del centro de recepción y procesamiento de la información. Se presentan asimismo diversos resultados y registros obtenidos con el sistema. Dado que la red de observación actual en gran medida es todavía temporal e instalada en forma provisional durante los meses posteriores a la crisis del volcán, se describe también el sistema de observación definitivo que se irá instrumentando durante 1995. Para finalizar se presenta un registro fotográfico que ilustra algunos aspectos de los trabajos de campo realizados y de las instalaciones e instrumentación de estaciones y el centro de registro.

## 2. TIPOS DE MONITOREO E INSTRUMENTACION DE VOLCANES

La vigilancia de un volcán consiste en la observación continua y permanente por medio de una instrumentación especializada con la finalidad de detectar oportunamente alguna variación importante de su actividad y de ser posible anticipar alguna condición anómala precursora de un proceso eruptivo, para que a su vez con esta información se tomen medidas de seguridad o en su caso se ponga en marcha un plan de emergencia previamente establecido. De acuerdo con la anterior definición la vigilancia de un volcán es un proceso que implica necesariamente las siguientes actividades:

- Diseñar y establecer sistemas instrumentales y métodos de observación de acuerdo con las características y condiciones del volcán.
- Establecer una línea base o niveles de referencia de ser posible cuando el volcán se encuentra en un estado de mínima actividad.
- Monitorear su actividad en forma continua y sistemática; llevar registro de las observaciones.
- Reconocer oportunamente e interpretar cambios observados de su actividad (precursores) respecto a los niveles de referencia establecidos.
- Establecer sistemas de alertamiento.
- Instrumentar e implantar un plan de emergencia enfocado a prevenir algún desastre y mitigar las posibles consecuencias derivadas de una erupción.

Entre los tipos de monitoreo y vigilancia mas importantes comúnmente utilizados en un volcán están la vigilancia visual, el monitoreo sísmico, geodésico y geoquímico.

### **Vigilancia visual.**

Es la apreciación por medios visuales y mediante registro frecuente de las condiciones físicas del volcán, tales como emanación de gases y cenizas, deformaciones, derrumbes o deslaves, flujos de lodo, actividad magmática, ruidos o cualquier otra manifestación

anómala que indica un cambio perceptible de su estado y actividad. Esta se lleva a cabo, entre otras, mediante observaciones a simple vista, con ayuda de binoculares, registros fotográficos o inclusive mediante sistemas de monitoreo con cámaras de video

#### **Monitoreo sísmico.**

Medición local o remota de la actividad microsísmica y que permita localizar la fuente de energía e inferir la estructura interior del volcán así como cambios en la misma. Para ello se instalan usualmente redes de tres o más sismógrafos sobre y alrededor del volcán. Existe una gran variedad de estos instrumentos dependiendo de su tecnología, medios de registro y respuesta de sus sensores. Es común emplear sismógrafos portátiles de papel ahumado o también digitales para medir los niveles de ruido y características de los sitios antes de la instalación permanente de una estación. Para sitios definitivos se utilizan diversas técnicas de telemetría vía radio, tanto analógicas como digitales, para registrar y monitorear la actividad en forma remota y segura desde un centro de observación y procesamiento. Referente a los sensores, se utilizan generalmente sismómetros y geófonos de periodo corto verticales o en arreglos triaxiales, pero también otros con respuesta en frecuencia a señales de periodo largo o recientemente también de banda ancha. Otros instrumentos asociados son acelerógrafos, piezómetros y deformímetros. Por su mayor resolución y facilidad de procesamiento de los datos, se prefieren los equipos digitales, aunque son más costosos y debido a su complejidad son menos confiables que los analógicos

#### **Monitoreo geodésico.**

Básicamente es la medición de las deformaciones que el edificio volcánico sufre a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde el interior del volcán. Consiste en la instalación de redes de estaciones monumentadas, puntos de observación e inclinómetros de diversos tipos. Las medidas pueden hacerse por métodos geodésicos convencionales (nivelación, triangulación, trilateración, inclinometría seca, etc.), por gravimetría y por otros métodos electrónicos como radiotelemetría y mediante sistemas de posicionamiento global, GPS.

#### **Monitoreo geoquímico.**

Se refiere al análisis químico de concentrados y elementos en gases de fumarolas, manantiales, composición de cenizas, lavas y otros productos del volcán que son una manifestación de su actividad. Otras variables asociadas y que también son monitoreadas son vientos, temperatura, precipitación, pH, y emanación de gas radón, entre otras. La utilización de equipos de espectrometría de correlación, COSPEC, es fundamental para medir la concentración de gas SO<sub>2</sub> emitido.

Una extensa información sobre distintos métodos y dispositivos para el monitoreo de volcanes es dada por Ewert y Donald (1992), particularmente empleados en el monitoreo del volcán Santa Helena.

### **3. INSTRUMENTACION SISMICA DEL VOLCAN ANTES DE LA ERUPCION DE DICIEMBRE DE 1994.**

La primer estación de observación sísmica en el volcán fue la de Altzomoni (IIA), instalada en julio de 1987 por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en la estación repetidora de microondas de Televisa ubicada en el Cerro Altzomoni, Edo. de México a 4 Km al Norte de Paso de Cortés. Dicha estación aún sigue en operación y forma parte de la red sísmológica de telemetría SISMEC (Quaas et al., 1973, Torres y Mena, 1988) Esta estación cumple un doble propósito: registrar la sismicidad en la Sierra Nevada y simultáneamente ser repetidora de la señales de estaciones remotas localizadas en Tonantzintla y en Cd. Serdán, Pue., esta última en las faldas del volcán Pico de

Orizaba. La instrumentación de la estación Altzomoni consiste de un sismómetro vertical de periodo corto con enlace de telemetría radiofónica analógica FM-FM en VHF hacia CU. La estación IIA ha venido operando prácticamente en forma ininterrumpida desde 1987 a la fecha.

En septiembre de 1989 el Departamento de Vulcanología del Instituto de Geofísica, también de la UNAM, inicia la operación de una segunda estación (PPM) de monitoreo en el volcán Popocatepetl y que además se incorpora posteriormente como parte de la red sísmica del Servicio Sismológico Nacional. Esta estación, donada por JICA se ubicó precisamente en el Cerro de Tlamacas, Pue. en donde se localiza una estación repetidora de microondas de Imevisión y de Pemex. Su instrumentación consiste de un sismómetro triaxial de periodo corto (tres componentes ortogonales, una para el movimiento vertical y dos para registrar los movimientos horizontales) y equipo de telemetría analógica también tipo FM-FM con transmisión en UHF directo hacia el centro de registro en el Instituto de Geofísica en CU. Con esta nueva estación se inició de hecho el monitoreo sistemático de la sismicidad en la región del volcán. Estudios estadísticos de la sismicidad reciente del volcán basados principalmente en esta estación han sido reportados por el Instituto de Geofísica (Valdés y González, 1994).

Al surgir evidencias ya claras del aumento en la actividad volcánica del Popocatepetl a principio de 1994 y ante la falta de estaciones cercanas de observación que permitieran una mejor localización de los eventos sísmicos y el estudio de su estructura y fuente de energía, la Secretaría de Gobernación; a través de la Dirección General de Protección Civil encomendó al grupo de instrumentación del Centro Nacional de Prevención de Desastres la tarea de diseñar y poner en marcha de inmediato una extensa red sísmica local con el objetivo específico de monitorear y vigilar la actividad del volcán. Para ello se asignaron recursos extraordinarios por cerca de N\$2,000,000. Se iniciaron entonces los trabajos para definir los posibles sitios de las nuevas estaciones y proponer una configuración inicial del sistema. Los lineamientos generales que se establecieron para este nuevo sistema fueron:

- complementar las dos estaciones existentes de la UNAM con otros equipos colocados sobre las otras laderas del volcán para lograr así una cobertura uniforme de registro que facilitara en conjunto la localización de los eventos sísmo-volcánicos.
- ubicar un grupo de estaciones en la parte alta del volcán lo más cercanas al cráter y por tanto a la fuente de energía y colocar otras estaciones en un radio más amplio y en zonas más seguras.
- seleccionar sitios con niveles bajos de ruido, de preferencia sobre material rocoso a fin de minimizar efectos locales y de no afectar el rango dinámico de medición. Además los sitios deberían tener fácil acceso por tierra, pensando en su servicio y también línea de vista para enlazar la estación mediante comunicación por radio
- instrumentar las estaciones con sismómetros, de preferencia triaxiales y acondicionar las señales para su registro centralizado en forma remota mediante telemetría por radio. Considerar la utilización de sismómetros de banda ancha que serían muy valiosos para la investigación y también instalar inclinómetros para medir deformación.
- establecer el centro de recepción y registro de información en el Cenapred con posibilidad de que las señales pudiesen ser recibidas también por los institutos de Ingeniería y Geofísica en la UNAM

Para satisfacer los requerimientos anteriores tuvo que realizarse un enorme esfuerzo, primero para hacer un reconocimiento general de las áreas circundantes al volcán y posteriormente para la selección de sitios. Es importantemencionar que se tuvo que enfrentar con diversos obstáculos que dificultaron enormemente esta labor, entre otros, el acceso y las condiciones climáticas. Los accesos al volcán Popocatepetl, con excepción de la parte Norte, son sumamente difíciles, ya que los caminos y vías de comunicación en general son muy escasos. Hubo por ello que localizar, y en algunos casos, abrir brechas a los sitios específicos de interés para el proyecto. Esto se llevó a cabo en plena temporada de lluvias y solo fue posible con equipo de transporte y de apoyo especial, y con ayuda de autoridades y pobladores locales. En forma sistemática en cada sitio visitado se efectuaron, entre otras, las siguientes actividades:

- localización precisa del sitio y vía de acceso
- obtención de sus coordenadas geográficas y definición del sitio en el mapa
- medición de la altitud media sobre el nivel del mar
- evaluación de la comunicación por voz (radio, localizador y teléfono celular)
- medición y evaluación del nivel de ruido sísmico
- pruebas de líneas de vista y de transmisión para telemetría
- reconocimiento de las características geológicas

Algunas de estas actividades se ilustran en las fotografías de las figuras 28 y 29 del capítulo 11.

Adicionalmente a estas labores de campo se realizaron diversos trabajos de gabinete como registro y evaluación de las pruebas, diseño de la topología de la red, preparación de mapas, selección de equipos e instrumentos, etc.

En julio de 1994 se presentó un primer informe con la configuración y propuesta técnica de la red de observación sísmica del volcán incluyendo una estimación de costos (Quaas et al., 1994).

Durante el segundo semestre de 1994 se continuó trabajando con gran intensidad en este proyecto considerado prioritario en la Coordinación de Investigación del Cenapred, a fin de instrumentar y poner en marcha el sistema de monitoreo. Para tal efecto se llevaron a cabo consultas y reuniones técnicas con investigadores y encargados de la operación de redes sismológicas de los institutos de Geofísica e Ingeniería de la UNAM, con el fin de intercambiar información y buscar una colaboración mas estrecha entre las tres instituciones. Asimismo se visitaron diversos centros del U.S. Geological Survey en donde se tuvieron consultas con personal especializado en el área vulcanológica. Como consecuencia de lo anterior y el interés por ampliar de inmediato el sistema de registro en virtud de la creciente actividad que presentaba el volcán, se estableció un convenio de colaboración entre el Cenapred y el Instituto de Ingeniería (Cenapred, IdeI, 1994) para utilizar temporalmente, y mientras se adquirían los equipos definitivos solicitados por Cenapred, dos estaciones sísmicas portátiles con telemetría que el instituto tenía disponibles para el registro de réplicas de temblores. Además se convino utilizar la infraestructura de su red sismológica, SISMEM, para recibir y procesar la información.

Fue a través de este convenio como pudieron instalarse en un plazo muy corto dos estaciones sísmicas de monitoreo adicionales en el volcán. La primera se instaló conjuntamente en octubre de 1994 en la estación denominada Chipiquixtle, clave PPX, ubicada en la ladera Suroeste en el Estado de México a una altitud de 3980 msnm (ver fotografías figuras 30 y 31). La instrumentación consistió de un sismómetro vertical de 2 Hz y equipo de telemetría analógico tipo FM con un enlace radiofónico de VHF directamente al Instituto de Ingeniería en CU. Dada la ubicación del Cenapred en la misma dirección radial del instituto, se bajó también la señal en este centro. Ya que no se contaba con una caseta de resguardo en el sitio, la instrumentación provisionalmente se colocó dentro de una hielera de plástico y se dejó a la intemperie. La segunda estación con características similares en cuanto a su instrumentación fue la de Colibrí, Pue., clave PPC en la ladera Este (ver fotografías figuras 33 y 34). Por su ubicación en la parte oculta del volcán, visto desde el DF, fue necesario establecer puntos de repetición de las señales de radio en las estaciones de Tonantzintla, IIT y Altzomoni, IIA, ambas pertenecientes a la red SISMEM. La señal de esta segunda estación también se comenzó a registrar en el Cenapred. Cabe mencionar que para el sitio de PPC se construyó una caseta especial de mampostería para resguardar los equipos, la cual fue construida por la Unidad de Protección Civil del Estado de Puebla.

Con respecto al registro de las señales, paralelamente a las actividades de campo se comenzó a instalar en el Cenapred el equipo de recepción, decodificación y de graficación. En virtud de que el centro todavía no contaba con suficiente infraestructura, muchos de estos equipos también fueron prestados por el Instituto de Ingeniería. Se pudieron así registrar las señales telemétricas de las estaciones PPM, PPX y PPC. Por otro lado las señales que se recibían en el puesto central de registro de SISMEM, además de graficarse en registradores de tambor, se digitizaban y procesaban en forma digital

En la tabla 1 se presentan los datos resumidos de la instrumentación instalada en el volcán Popocatepetl hasta la fecha. Se da la localización de las estaciones, tipo de instrumentación, fecha de instalación y la institución responsable de su operación. Para diciembre de 1994, cuatro estaciones estuvieron en operación y fueron las que registraron los eventos del día 21. La ubicación de estas estaciones se presenta en el mapa general del área del volcán mostrado en la figura 1. Una descripción mas detallada sobre de la instrumentación y las técnicas de medición y telemetría utilizadas se hará en una sección posterior.

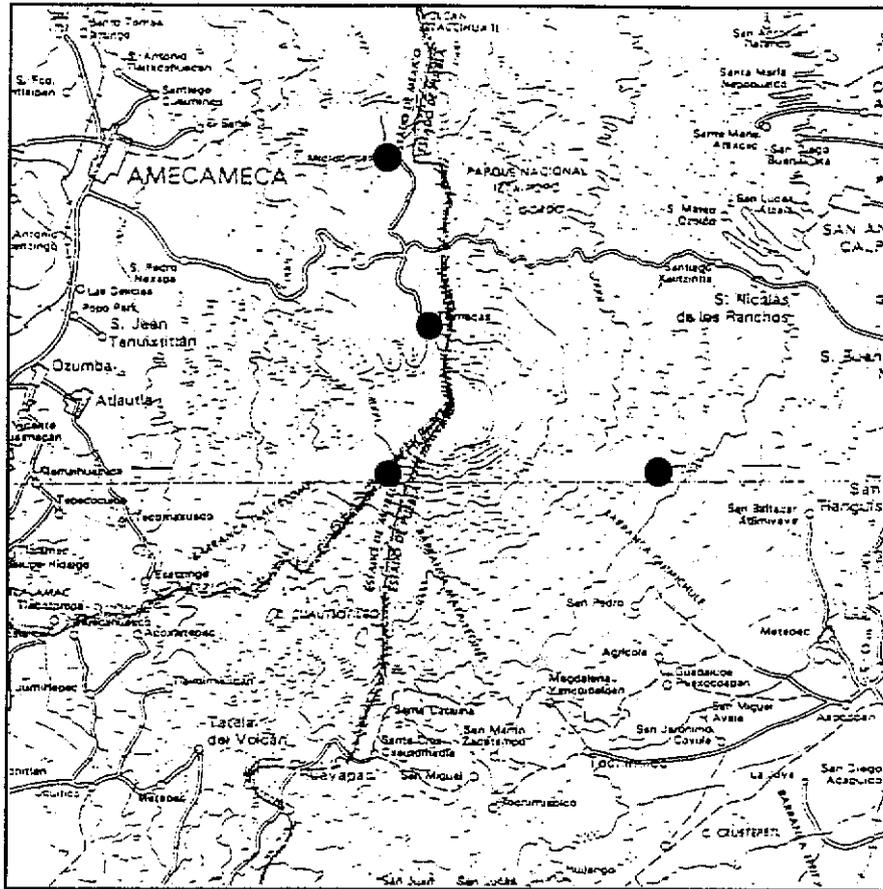


Figura 1. Localización de las estaciones de observación sísmica con que se contaba en el volcán Popocatepetl en diciembre de 1994.

#### 4. REGISTROS SISMICOS DEL 21 DE DICIEMBRE DE 1994

Como ya se ha mencionado, la actividad sísmica del volcán fue incrementándose paulatinamente durante 1994 al igual que la actividad fumarólica asociada. Esta situación culminó en la madrugada del 21 de diciembre cuando a las 01:30 hora local inicia una secuela de eventos sísmicos de mayores proporciones. Afortunadamente se contaba ya con las cuatro estaciones de observación descritas, mediante las cuales se lograron registrar bastante bien estos importantes eventos.

En la figura 2 se reproducen los sismogramas obtenidos en Cenapred y que fueron registrados en la estación PPM de Tlaxmacas. La secuela inicia con una serie de 5 eventos impulsivos (figura 2a) que, de acuerdo con la

interpretación de los especialistas, fueron producto de un fracturamiento de la estructura interna y seguidos posteriormente de un evento mas prolongado e intenso (figura 2b) que indica la apertura de un conducto el cual permitió la salida de abundantes cantidades de gases y cenizas. Al amanecer de ese día, se pudo observar la emanación de una densa columna de humo del volcán, registrándose precipitación de cenizas en la ciudad de Puebla. La descripción y análisis detallado de la sismicidad del volcán es cubierta en otro capítulo dentro de esta memoria (Valdés y Nava, 1995; Lermo, 1995).

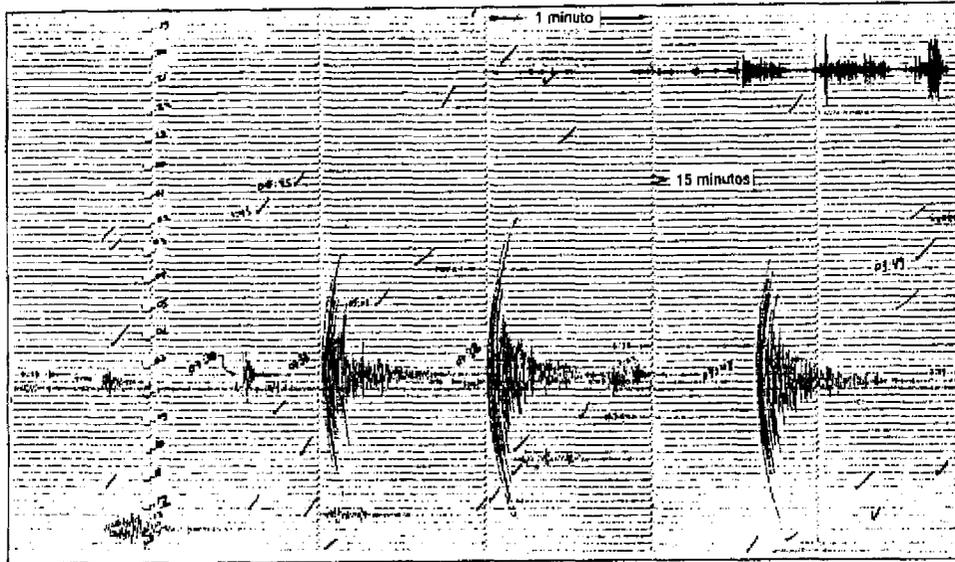


Figura 2a. Sismogramas de los eventos registrados en la estación PPM, Tlmacas, el 21 de diciembre de 1994.

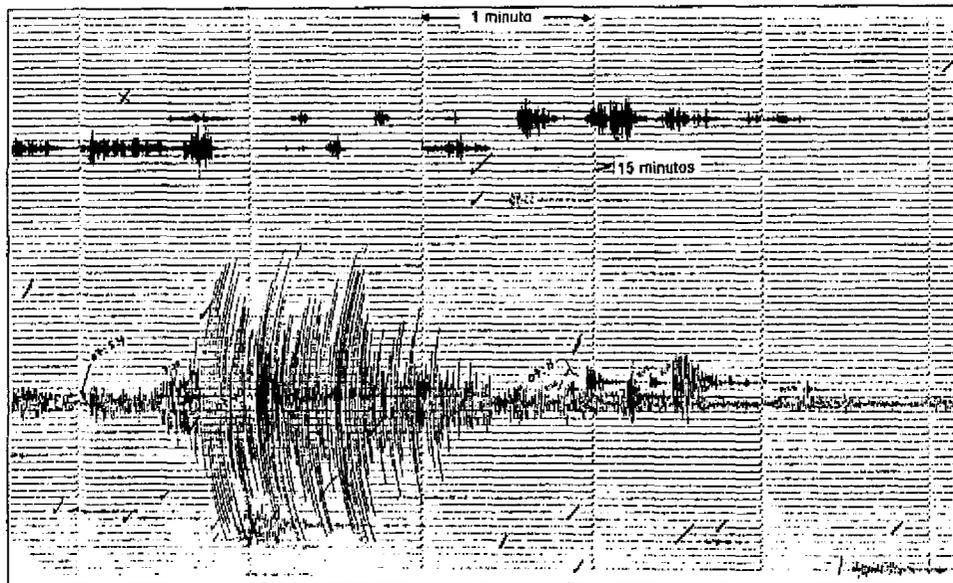


Figura 2b. Sismogramas de los eventos registrados en la estación PPM, Tlmacas, el 21 de diciembre de 1994.