

# Estudio de la sismicidad y deformación del Volcán de Colima durante la crisis de abril de 1991

G. J. González Pomposo<sup>1</sup>, A. L. Martín del Pozzo<sup>2</sup>, J. Panohaya Analco<sup>1</sup> y J. A. de Gante González<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> *Escuela de Ingeniería Civil de la UAP, Puebla México.*

<sup>2</sup> *Instituto de Geofísica, UNAM, México.*

Recibido: 5 de noviembre, 1991; aceptado: 11 de agosto, 1992.

## RESUMEN

El aumento notable en las emisiones fumarólicas y derrumbes en el Volcán de Colima, desde febrero de 1991, fue provocado por el ascenso de un nuevo magma que perforó la superficie el primero de marzo y continuó creciendo como un nuevo domo. Al alcanzar el borde del domo antiguo el 15 de abril, su empuje provocó un pequeño colapso parcial el día 16 de abril acompañado de avalanchas y nubes de ceniza. Posteriormente continuó fluyendo como un derrame de lava.

Se llevó a cabo el monitoreo de la sismicidad y deformación de este volcán por un período de 12 días, esto es del 12 al 24 de abril de 1991. Con este propósito se instaló una red sismológica en las inmediaciones del volcán compuesta por cuatro estaciones analógicas, así como tres inclinómetros secos y tres estaciones de nivelación trigonométrica. Cada inclinómetro fue medido en tres ocasiones y se obtuvieron seis medidas de nivelación trigonométrica del domo nuevo a partir de tres diferentes puntos.

Se registraron cuatro diferentes tipos de sismos: A, B, (D) derrumbes y (G) gas. Los dos primeros se clasificaron de acuerdo con Shimozuru (1971) y Minakami (1974), y los últimos según observaciones directas realizadas en el campo. Los eventos tipo A sólo aparecieron en los días del 13 al 15 de abril. En cambio, los eventos tipo B se registraron en todo el período de monitoreo, así como los tipos D (derrumbes) y los tipo G (fumarolas), incrementándose fuertemente los derrumbes en los días 19 y 20 de abril. Por otro lado, se determinó la frecuencia predominante del tremor durante este proceso volcánico, encontrándose un incremento de ésta en los días previos al 16 de abril, aumentando de 3.0 a 9.0 Hz, y un cambio brusco después del colapso parcial del domo nuevo el 16 de abril de 9.0 a 3.0 Hz.

Los vectores resultantes de las tres estaciones de inclinometría ( $\leq 10 \mu\text{-rad}$ ), muestran una pequeña deformación principalmente de deflación ligada a la extrusión de lava, aunque los datos están en los límites de detección del método. Se monitoreó el crecimiento del domo nuevo que varió de 36 m de altura por 109 m de largo el día 14 de abril, hasta 13 por 66 m respectivamente el día 24, después de alcanzar la orilla el día 16 cuando se transformó en derrame de lava por el flanco SW. El cambio en la topografía del domo el día 15 de abril indicó el esfuerzo al que estaba sujeto y fue premonitor del colapso parcial del día siguiente.

**PALABRAS CLAVE:** Domo nuevo, monitoreo sísmico, inclinometría seca y monitoreo topográfico.

## ABSTRACT

Increased fumarolic emissions as well as rock sliding at Colima volcano during February 1991 was caused by ascending new magma which cut through an older summit dome on March 1<sup>st</sup> and continued growing as a new lava lobe. The new lava lobe reached the summit edge on April 15<sup>th</sup> and on the 16<sup>th</sup> its advance caused a small partial collapse accompanied by avalanching and ash clouds. Afterwards, lava continued as a lava flow down the SW flank of the volcano.

From April 12<sup>th</sup> to 24<sup>th</sup> 1991 seismicity and deformation were monitored at Colima volcano. A seismic network with 4 analogical stations as well as 3 dry tilt and 3 trigonometric levelling stations were established. Dry tilt stations were reoccupied on 3 occasions. Six trigonometric levelling measurements of the new lobe were made from 3 different stations.

Four types of seismic events were found: A, B, C, D (rock slides) and G (gas emission). The first 2 types (A and B) were classified according to Shimozuru (1971) and Minakami (1974) while D and G events were identified in the field. A-type events appeared only between April 13<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> while B, D and G events occurred during the whole period. Rock sliding events (D) increased on April 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup>. The frequency on the volcanic tremor increased from 3.0 to 9.0 Hz before April 16<sup>th</sup> and then decreased again to 3.0 Hz on that date after the small partial dome collapse.

The resultant vectors of the 3 dry tilt stations ( $\leq 10 \mu\text{-rad}$ ) show small tilts mainly associated to deflation during lava extrusion, although data is within the detection limits. Monitoring of the lobe growth showed a height of 36 m and width of 109 m on April 14<sup>th</sup> with a reduction on April 24<sup>th</sup> to 13 m height and 66 m width, this was after the lobe had reached the edge and changed into a lava flow down the SW flank (April 16<sup>th</sup>). The change in the lobe topography on April 15<sup>th</sup> indicates the stress it was under which was premonitory to the partial collapse on the next day.

**KEY WORDS:** New lava lobe, seismic monitoring, dry-tiltmeter and topographical monitoring.

## INTRODUCCION

El Volcán de Colima ( $19^{\circ} 30' 44''$  N. y  $103^{\circ} 37' 02''$  W.) localizado en los límites de los Estados mexicanos de Jalisco y Colima, (Figura 1), es considerado el volcán más activo de la Faja Volcánica Mexicana, (Martin del Pozzo y Romero, 1989). En tiempos históricos han ocurrido numerosas erupciones siendo las de 1616, 1818 y 1913 las más explosivas (Luhr y Carmichael, 1980; Martin del Pozzo y Romero, 1989). Entre 1961 y 1962 se produjo un pequeño flujo de lava andesítica. Subsecuentes erupciones ocurrieron en 1975, 1976 y 1982. Desde finales de los cincuenta el cráter del volcán ha estado tapado por un domo

que se elevó paulatinamente. Posteriormente, a partir del año de 1988 se observaron pequeños derrumbes que parecían rayones blancos sobre la parte superior del cono (Martin del Pozzo y Romero, 1989).

A finales de enero de 1991 aumentó la actividad fumarólica y se detectó un aumento en el número de eventos sísmicos asociados al ascenso de magma en el conducto volcánico. En los primeros días de marzo apareció un nuevo domo en la parte superior (SW) del antiguo domo. El domo nuevo fue creciendo vertical y horizontalmente hasta alcanzar el borde del domo antiguo el 15 de abril. Su empuje provocó un pequeño colapso parcial del domo antiguo el día 16 de abril. Entre marzo y a principios de

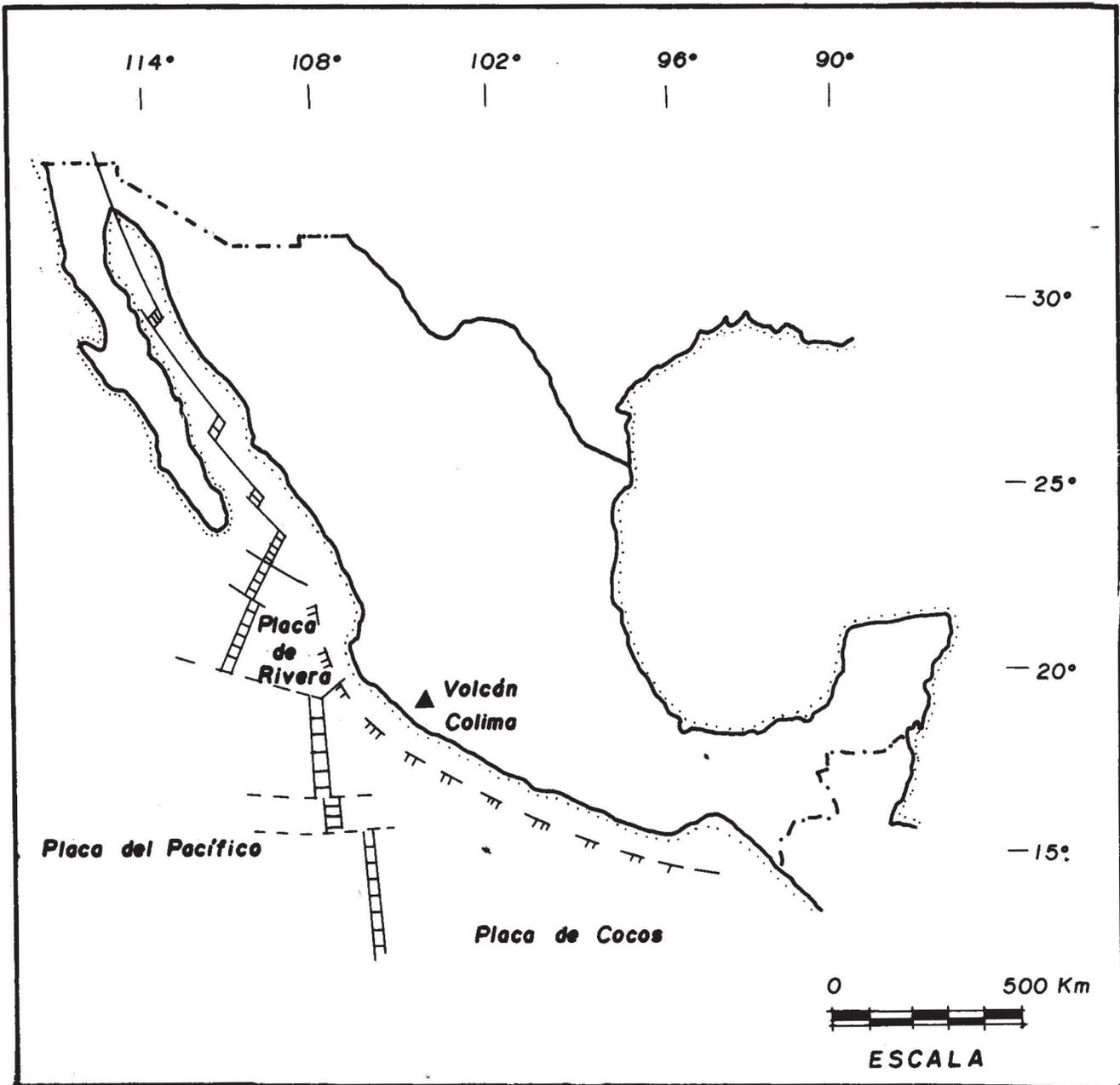


Fig. 1. Mapa de localización del Volcán de Colima, dentro de la República Mexicana.

abril, se observó un aumento tanto en número como en tamaño de los derrumbes provocados por el crecimiento del domo. Además, se incrementó el número de fumarolas. En el mes de febrero de 1991 se realizó un monitoreo sísmico en la localidad de San Marcos, a 13.5 kilómetros del cono volcánico, por un período de cuatro días. Durante este tiempo se registró baja sismicidad y tremor. El tremor mostró dos frecuencias predominantes, 2.0 Hz en baja frecuencia y 3.0 Hz en la alta, las dos con duración de 40 segundos.

La mayoría de las erupciones volcánicas son precedidas o acompañadas por cambios geofísicos y queoquímicos en el estado del volcán (Banks *et al.*, 1989). Dos de los aspectos que pueden variar son: el patrón de sismicidad del volcán, el cual puede manifestar los movimientos del magma en el curso de la erupción y la deformación de la superficie del volcán, que puede mostrar la respuesta de la superficie a la presión actuante en el sistema volcánico.

En este trabajo se analizó la actividad sísmica registrada en el Volcán de Colima, asociada al crecimiento del domo nuevo, el colapso parcial del domo antiguo el 16 de abril y el avance de la lava de los días posteriores. Los registros se obtuvieron mediante una red portátil de 4 estaciones, que operó del 12 al 24 de abril de 1991. Asimismo, se estudiaron los cambios en la inclinación mostrada por la superficie del volcán durante el período citado, la cual fue medida por una red de estaciones de inclinometría seca. Se correlacionó el proceso de deformación con el nuevo domo, así como en la estructura del volcán y con el proceso volcánico en general registrado durante este período.

### MONITOREO SISMICO

La red sísmica se integró por cuatro estaciones sismológicas del tipo portátil compuestas por un sismómetro Ranger SS-1 con período natural de un segundo de componente vertical y un sismógrafo MEQ-800-B de registro analógico en papel ahumado, con un radio receptor para correlacionar el tiempo universal (GTM). El inicio del monitoreo sísmico fue el 12 de abril, instalándose dos estaciones en la localidad del Fresnal (FRC) y la Yerbabuena (YBC) respectivamente situadas en la parte sur del volcán, posteriormente el día 13 se instalaron las estaciones del Albergue (ABC) y el Playón (PYC) (Figura 2), en la zona norte del volcán. Debido al riesgo que presentaba la cercanía de los derrumbes a la estación del Playón, esta fue trasladada en día 15 de abril al sitio denominado Montitlán (MTC), situado sobre el flanco sur del volcán.

La configuración de la Red Sísmica se muestra en la Figura 2. Las coordenadas geográficas así como las distancias de cada una de las estaciones al domo se encuentran en la Tabla 1. El área cubierta por esta red fue de 66.7 km<sup>2</sup>, aproximadamente.

En los seis días previos al evento del 16 de abril, las estaciones funcionaron con una ganancia de 78 DB y un ancho de banda de 0.3 a 30 Hz con el objetivo de observar

Tabla 1

Catálogo de estaciones sísmicas

NOMBRE	NOMECLATURA	LAT. (N) (Grad.)	LON. (W) (Grad.)	ALT. (m.)	DISTANCIA (Km.)
FRESNAL	FRC	19.444	103.571	1520	9.30
YERBABUENA	YBC	19.481	103.670	1730	6.25
EL ALBERGUE	ABC	19.525	103.608	3240	1.95
EL PLAYON	PYC	19.516	103.640	2850	2.26
MONTITLAN	MTC	19.419	103.583	1550	10.70

los detalles de los eventos volcánicos registrados, sobre todo las frecuencias y la traza del tremor. Los sismogramas de los días 16 y 17 de abril se saturaron debido a la alta sensibilidad del equipo y su cercanía al volcán. Por esta razón se cambiaron las ganancias de las estaciones para que operaran de 78 DB a 66 DB, esto originó que los detalles registrados, como el tremor, se perdieran, pero se ganó mayor resolución en el registro de eventos tipo B, D y G.

### MONITOREO DE DEFORMACION

El monitoreo de deformaciones se realizó empleando dos métodos: inclinometría seca y nivelación trigonométrica.

El método de inclinometría seca fue empleado para obtener la inclinación del terreno alrededor del cráter a partir de una nivelación diferencial. Para tal efecto, se instaló un arreglo de tres estaciones de inclinometría (Figura 2), consistentes en un arreglo triangular de bancos de nivel. Cada banco constó de una placa de bronce empotrada en roca. El equipo topográfico empleado fue un nivel Wild N3 con un micrómetro integrado de cinco milímetros y un estadal Invar con graduación de cinco milímetros. Los datos obtenidos fueron vectores de inclinación, provenientes de la medición de lados, ángulos, orientación y cambio de nivel relativo a los bancos en cada una de las estaciones. El cálculo de la magnitud y dirección de los vectores se realizó con las fórmulas modificadas de Eaton (Eaton, 1959).

Las secciones transversales con orientación norte-sur de la Figura 3, obtenidas por medio de nivelación trigonométrica, se utilizaron para determinar la longitud y la altura del domo volcánico formado por el material nuevo que emergió desde los primeros días de abril. Para realizar el monitoreo se instaló una estación en el poblado la Yerbabuena (YBC), una estación en el Playón (PYC) y otra en el sitio de Montitlán (MTC) (Figura 2). El método consistió en medir ángulos horizontales y con la distancia obtenida en el mapa topográfico del lugar, se obtuvo la longitud en el sentido norte-sur del domo nuevo. Análogamente se midieron diferencias en las alturas, empleando en este caso ángulos zenitales. El perfil del domo se obtuvo tomando el mayor número posible de medidas angulares sobre los puntos donde éste cambia de pendiente. El equipo topográfico empleado fue un teodolito WILD T-2 con aproximación de un segundo.

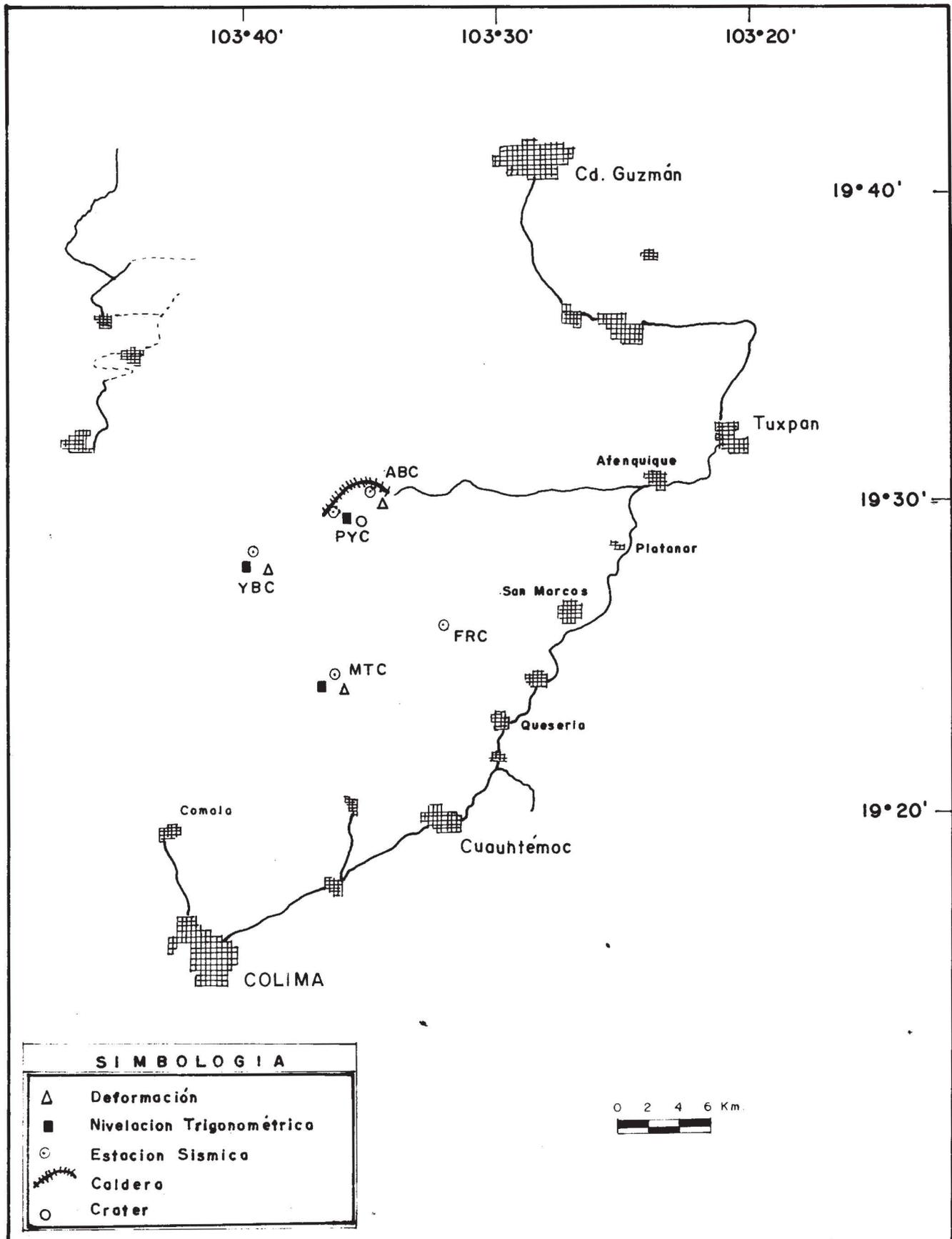


Fig. 2. Mapa de localización de las estaciones sismológicas y de deformación en las inmediaciones del Volcán de Colima.

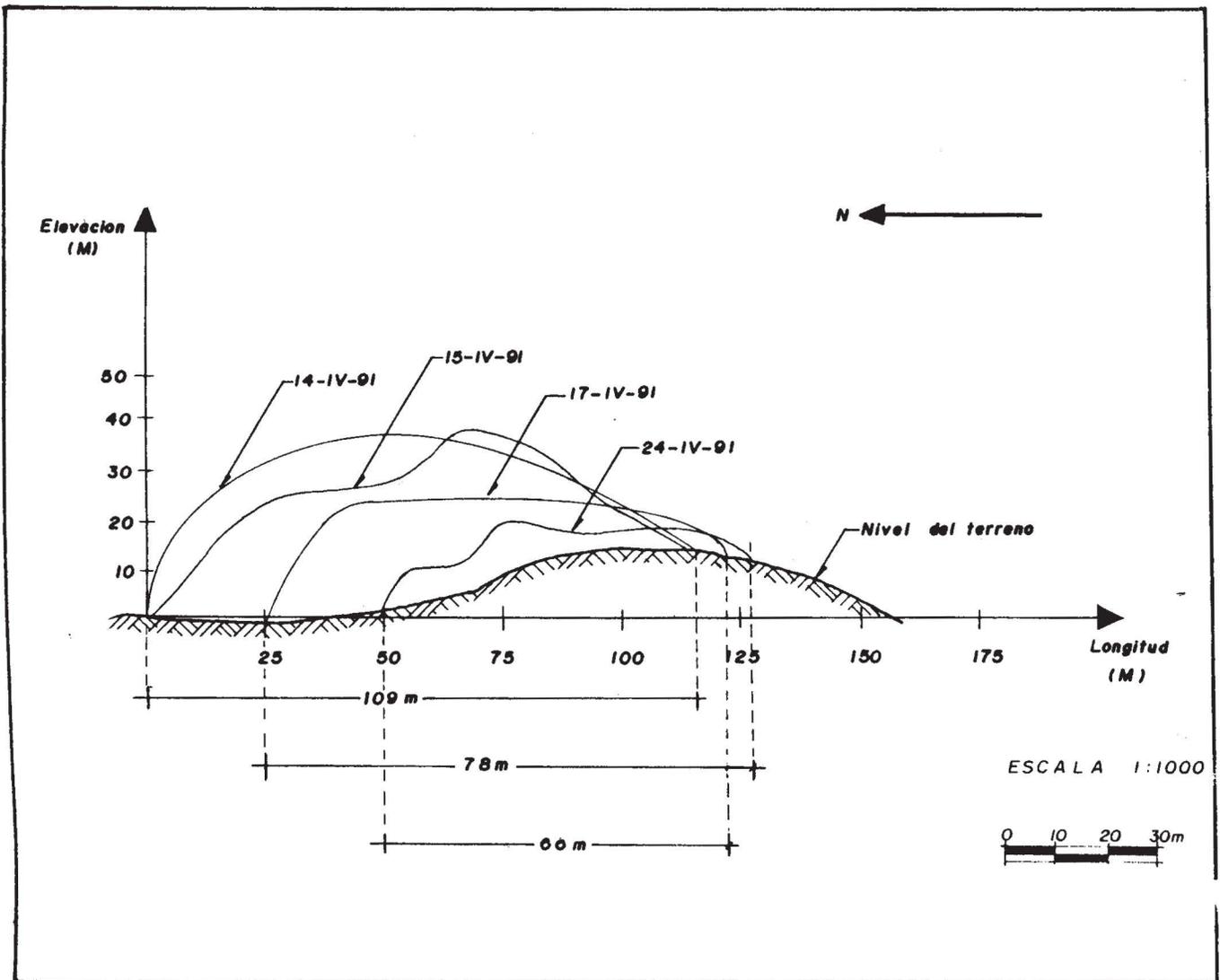


Fig. 3. Esquema que muestra los cambios del perfil topográfico del nuevo domo.

## DISCUSION DE RESULTADOS

### Observaciones sísmicas

Los eventos sísmicos registrados por la red instalada alrededor del Volcán de Colima, se clasificaron de la siguiente manera:

**Tipo A:** Sísmos con profundidad de 1 a 10 kms con fases impulsivas de las ondas P y S, claramente identificables y con contenidos de alta frecuencia, provocados posiblemente por reacomodo del magma o por la expansión de fluidos geotérmicos sujetos a alta presión. El análisis de los registros mostró amplitudes en las ondas de cuerpo menores a 20 mm pico a pico (Figura 4).

**Tipo B:** Sísmos originados por el movimiento, agrietamiento o deslizamiento del material situado en la parte superior del domo, con una profundidad característica entre cero y un kilómetro. La fase de la onda P es de tipo emer-

gente y con contenidos de baja frecuencia, no distinguiéndose la fase de la onda S (Figura 4).

**Tipo D:** Sísmos provocados por el derrumbe de material situado en la parte superior del domo, con frecuencia característica de 4Hz, y duración aproximada de 55 segundos (Figura 4).

**Tipo G:** Sísmos asociados a la emisión de gases del volcán, caracterizados por tener frecuencia aproximada de 3 Hz con duración promedio de 100 segundos (Figura 4).

**Tremor:** Se define como vibraciones continuas del terreno generadas por procesos magmáticos y debe distinguirse del ruido del terreno. En este trabajo se logró identificar la frecuencia del tremor, la cual se incrementó de 4.0 a 9.0 Hz en los días del 12 al 16 de abril y tuvo un súbito decremento a 3.0 Hz el día 16, normalizando su valor en 4.0 Hz el día 17 (Figura 5).

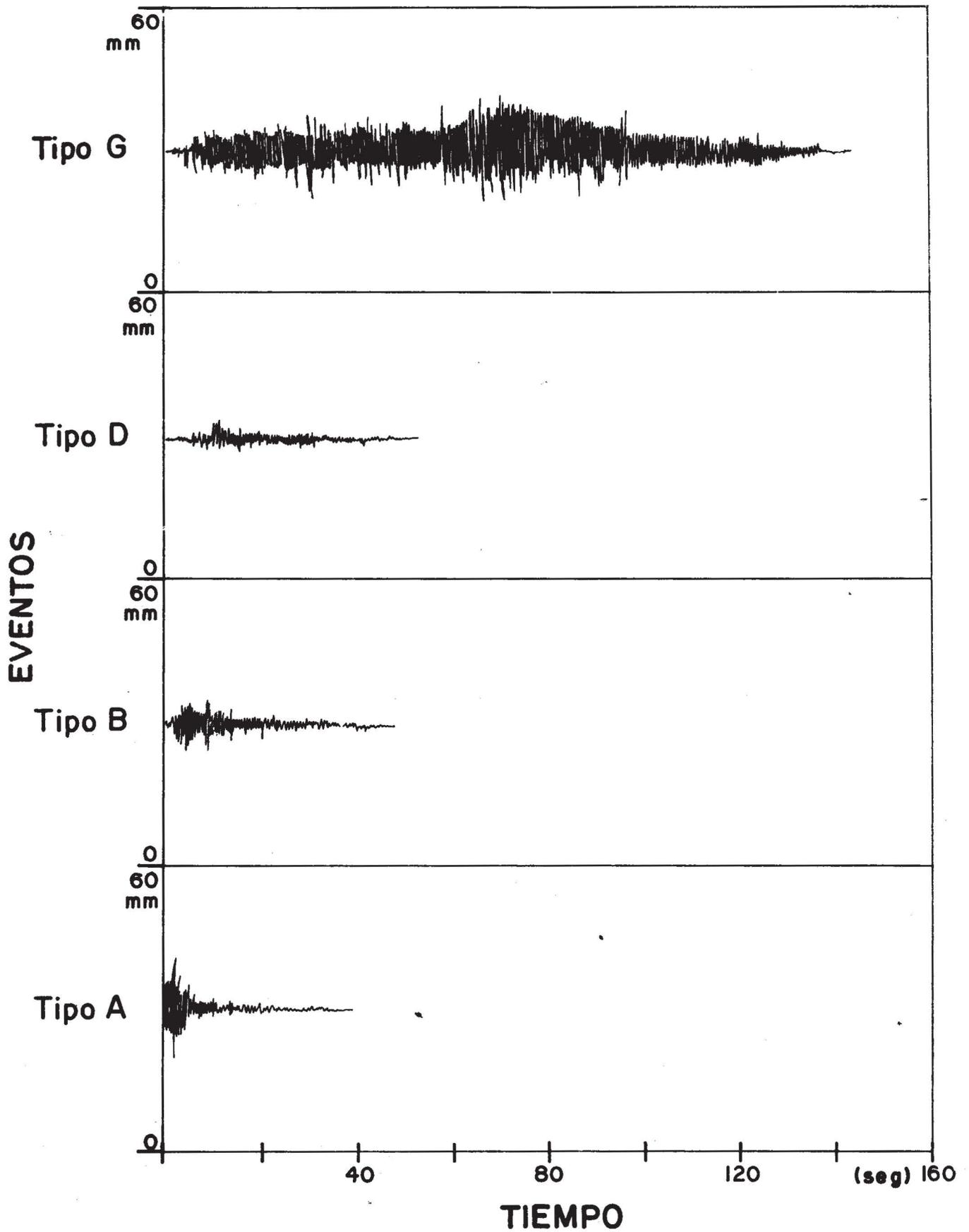


Fig. 4. Ejemplos de los 4 diferentes tipos de eventos sísmicos registrados en el Volcán de Colima.

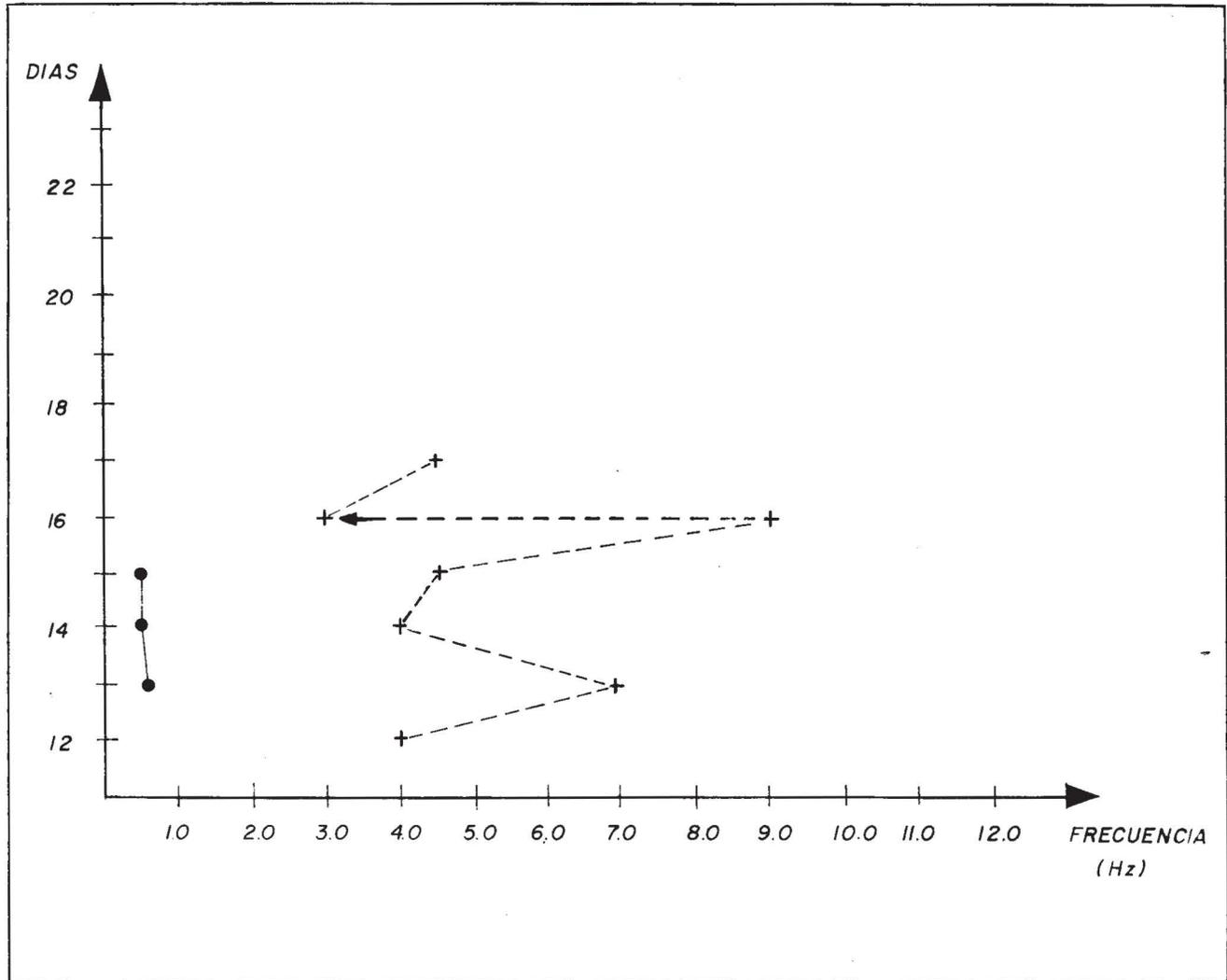


Fig. 5. Gráfica de los cambios de la frecuencia del tremor del 12 al 17 de abril: + - - - + - - +, alta frecuencia, ● - - - ●, baja frecuencia.

Los eventos del tipo A, B y tremor se identificaron de acuerdo con la clasificación establecida por Shimozuru (1971) y Minakami (1974). Las características de estos eventos son: para los eventos tipo A las fases de las ondas P y S son claramente definidas y su profundidad se encuentra entre 1 y 20 km, estos eventos son similares a los eventos tectónicos someros. Los eventos tipo B se identifican por estar adyacentes al cráter activo, las fases de las ondas P y S no son definidas y su profundidad es menor a 1 km. Otra razón por la cual se eligió esta clasificación se debe a la similitud existente en la distribución de las estaciones que configuraron la red empleada en este trabajo y la que estos autores han utilizado en el análisis de la sismicidad asociada a los volcanes japoneses.

Las características de los eventos tipo A de este trabajo son semejantes a los eventos tipo 4 de la clasificación realizada por Haskov (1983), para la sismicidad asociada a las erupciones del volcán El Chichón en 1982. Asimismo, las características de los eventos tipo B y tipo D tienen semejanza con los tipo 1 y 2, respectivamente, de la clasificación de Haskov. Los rasgos característicos de los even-

tos tipo 4 corresponden a los del tipo A de Minakami y los del tipo 1 y 2 a los tipo B. La diferencia hecha por Haskov para los tipo 1 y 2, son las altas frecuencias de las ondas P de los tipo 2 y el tamaño de la coda es mayor que el de la amplitud máxima en estos eventos.

Los eventos tipo D (derrumbes) y tipo G (emisión de gas), se correlacionaron con observaciones directas en campo, esto es, en el momento de su registro en el sismograma. Estas observaciones fueron realizadas por los operadores de las estaciones pudiendo identificar la forma y duración de los sismos asociados a los diferentes fenómenos.

Los sismos tipo A se registraron únicamente durante los dos primeros días de monitoreo (Figura 6) y según las prefases de las ondas P y S, se originaron a profundidades menores de 5 km., evidenciando el empuje de la lava en ascenso. La profundidad de estos eventos se pudo inferir por la cercanía de las estaciones (El Playón y El Albergue) al cono volcánico, como se muestra en la Figura 2.

Los sismos tipo B se registraron a partir del 13 de abril (inicio de operación de las estaciones Albergue y el Pla-

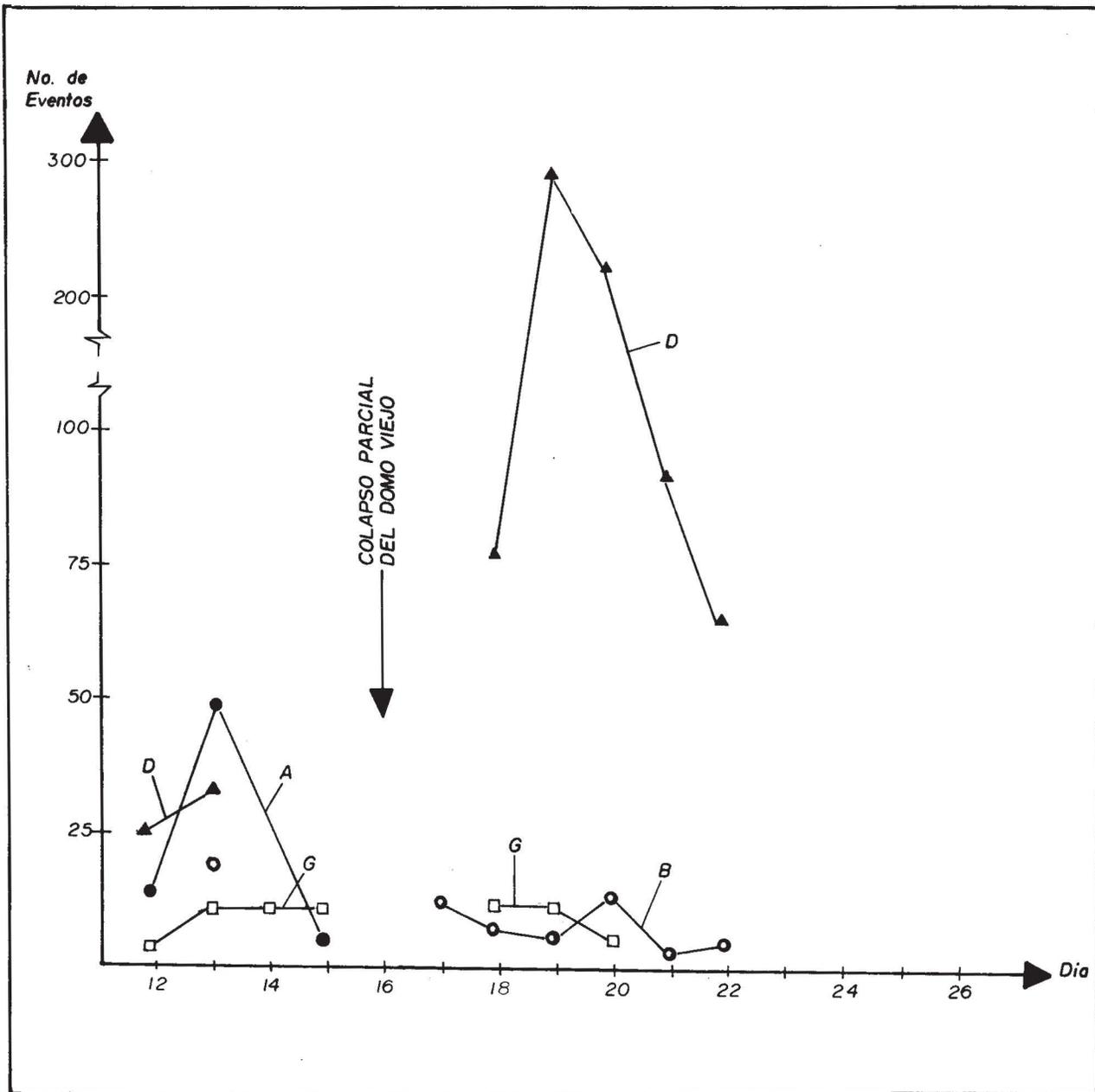


Fig. 6. Sismicidad registrada de cada uno de los eventos identificados en el colapso parcial del 16 de abril de 1991. (A): sismos tipo A, (B): sismos tipo B, (D): derrumbes y (G): gas.

yón) y continuaron durante todo el período de registro. Sin embargo, se observó un mayor número de estos eventos entre el 13 y el 15 de abril, coincidiendo con el período previo al evento volcánico del día 16. El material nuevo ascendió empujando al domo viejo para emerger como un nuevo domo el primero de marzo. El domo creció hasta alcanzar la orilla el día 15 (Figura 3). Al continuar el avance de la lava, provocó un pequeño colapso del domo antiguo el día 16 y avanzó como derrame en los días posteriores. Esto originó una gran cantidad de sismos del tipo D (derrumbes) que estuvieron presentes durante todo el período de monitoreo, pero que se registraron en mayor número los días 19 y 20, encontrándose 290 y 240 respectivamente (Figura 6).

Los sismos tipo G (gas) se registraron durante todo el período de monitoreo, observándose un mayor número entre el 13 y el 19 de abril. El promedio de sismos tipo G antes y después del 16 fue de 8. En los sismogramas de los días 16 y 17 no se pudo contar el número de este tipo de eventos debido a que se encontraron saturados los sismogramas (Figura 6).

Finalmente, el tremor armónico fue identificado del 12 al 17 de abril. Previo al colapso parcial del domo antiguo, las frecuencias presentaron un rango entre 3.0 y 9.0 Hz. Fue notable que horas antes del colapso parcial, la frecuencia medida del tremor fue de 9.0 Hz y horas después sufrió un cambio a 3.0 Hz (Figura 5). La baja frecuencia se

registró entre los 0.5 y 0.6 Hz, en el período previo al día 16; sin embargo, el registro del tremor se perdió al cambiar la ganancia en la amplificación de las estaciones. Dado que la forma y la frecuencia que presentó el tremor es semejante al tipo 4 clasificado por Kubotera (1974) en el Aso, se considera que el tremor registrado en Colima también se asocia a la actividad eruptiva superficial del volcán.

La actividad sísmica registrada de acuerdo con los diferentes tipos de sismos aquí especificados se muestran en la Tabla 2, así como la frecuencia del tremor en cada uno de los días de monitoreo. Debe hacerse notar que del 15 al 17 de abril los sismogramas quedaron saturados debido a la alta ganancia de los equipos (78 DB) y la cercanía de éstos al cono volcánico.

Tabla 2

Temblores volcánicos asociados al Volcán de Colima

ESTACION	FECHA	NUMERO DE EVENTOS					TREMOR Frec Hz
		TIPO A	TIPO B	AVALANCHA (D)	GAS (G)		
YBC	12-04-91	1	0	24	3	3	
FRC	12-04-91	13	0	10	5	4	
ABC	13-04-91	46	4	19	8	0.6-5.5	
PYC	13-04-91	20	15	32	8	0.6-7.0	
FRC	14-04-91	0	0	0	8	0.5-4.0	
ABC	15-04-91	1	ST	ST	8	0.5-4.5	
PYC	15-04-91	0	ST	ST	ST	ST	
YBC	16-04-91	ST	ST	ST	ST	3=>9	
ABC	17-04-91	0	8	ST	ST	4.5	
FRC	18-04-91	0	4	68	3	--	
MTC	18-04-91	0	3	74	8	--	
YBC	18-04-91	0	0	40	9	--	
ABC	19-04-91	0	3	290	8	--	
YBC	20-04-91	0	2	240	4	--	
FRC	20-04-91	0	8	30	0	--	
MTC	20-04-91	0	1	49	0	--	
ABC	21-04-91	0	1	85	3	--	
FRC	22-04-91	0	3	44	3	--	
MTC	22-04-91	0	3	45	3	--	
YBC	22-04-91	0	3	30	4	--	

ST= Sismograma saturado.

Los eventos fueron tabulados de acuerdo a lo analizado en los sismogramas de las cuatro estaciones.

OBSERVACIONES DE DEFORMACION

Inclinometría seca

La mayor inclinación medida se obtuvo en la estación Yerbabuena (YBC), entre los días 16 y 18 de abril, en dirección suroeste coincidiendo con el período de mayor actividad volcánica. Dicha inclinación fue de 8.4  $\mu$ -radianes,

manifestando la despresurización provocada por el movimiento magmático, así como por el peso de la lava que fue arrojada hacia el flanco sur. En la misma estación se realizaron posteriormente otras tres medidas las cuales fueron disminuyendo sucesivamente, siendo el último valor de 1.6  $\mu$ -radianes en el período del 22 al 24 de abril. Esto último se interpreta como una disminución en el avance del derrame de lava, así como una estabilización en la despresurización en el conducto volcánico, después del colapso del día 16.

En la estación Montitlán (MTC) se realizaron dos medidas, la primera entre el 18 y el 22 de abril con valor de 7.0  $\mu$ -radianes NE y la segunda del 18 al 24 que fue de 10.0  $\mu$ -radianes NW. Esto se interpreta como el combamiento del terreno debido al peso de la lava cuando una parte del derrame avanzó hacia el sur del domo. Finalmente, en la estación el Playón (PYC), la más cercana al domo, se realizaron tres medidas, obteniendo un valor total (suma vectorial) de 9.5  $\mu$ -radianes NW. La dirección de este vector evidencia un levantamiento a partir del lugar donde se encuentra la estación, como una reacción al hundimiento (deflación) que sufrió el volcán hacia el sur. Las medidas de cada una de las estaciones de inclinometría seca se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Medidas de inclinometría seca

ESTACION	PERIODO (IV-91)	MAGNITUD ( $\mu$ rad)	DIRECCION
YBC	16-18	8.4	NE 27 30'
YBC	18-20	3.0	NW 36 52'
YBC	20-22	2.4	NE 73 24'
YBC	22-24	1.6	NW 21 11'
YBC	16-24	13.2	NE 17 00'
PYC	17-19	6.0	NW 64 41'
PYC	19-23	5.9	NE 11 40'
PYC	17-23	9.1	NW 28 30'
MTC	18-22	7.0	NE 10 40'
MTC	18-24	10.0	NW 43 00'

Monitoreo topográfico

La configuración del domo varió rápidamente entre el 14 y el 24 de abril. El día 14 el domo presentó una configuración redondeada con una altura máxima de 36 metros y una longitud de 109 metros. El día 15 el domo sufrió un hundimiento en la parte norte y una elevación en la parte sur, evidenciando que el avance del domo había encontrado un obstáculo en el domo antiguo (Figura 3). Al día siguiente se presentó el colapso parcial del domo a las 15:15 hrs. Entre las 8:00 y las 12:00 hrs, del día 16 de abril ocurrieron 16 derrumbes. Entre las 12:00 hrs y las 15:15 aumentaron a más de 10 derrumbes por hora, siendo a las 15:15 cuando se observó la formación de 2 nubes cargadas de ceniza y los flujos tipo Merapi. Esta actividad continuó

hasta las 18:00 hrs. Las columnas de gas y ceniza alcanzaron una altura aproximada de 1500 metros sobre la estructura del volcán.

El día 17 se observó que el nuevo domo se había derrumbado sobre el flanco sur del volcán, disminuyendo sus dimensiones notablemente. Para el día 24 de abril, las dimensiones del domo fueron de 13 metros de altura y 66 metros de longitud (Figura 3). Asimismo, la actividad volcánica había disminuído notablemente.

## CONCLUSIONES

Se clasificaron 4 diferentes tipos de eventos asociados a la actividad del Volcán de Colima en el mes de abril de 1991, los tipo A, tipo B, Derrumbes (D) y Gas (G). Los dos primeros se clasificaron de acuerdo con Shimozuru (1971), Minakami (1974), y Havskov (1983), y los últimos con observaciones directas en el campo.

Los eventos tipo A desaparecieron después del día 15, tercer día del monitoreo y los tipo B, que se registraron desde el 13 de abril aumentaron en número llegando a su máximo el día 15, previo al colapso parcial del domo el día 16. Los sismos tipo B disminuyeron notablemente a partir del día 17 sin desaparecer en el período de monitoreo. De acuerdo con los registros, se determinó que la mayor actividad sísmica fue ocasionada principalmente por avalanchas (D) y fumarolas (G) durante los días 16 y 17 en que se saturaron los sismogramas por la alta cantidad de energía emitida.

El aumento de la emisión de gases provocó una gran cantidad de sismos (tipo G), principalmente entre el 12 y el 19 de abril. A partir del 19 la emisión de gases disminuyó y también el número de sismos registrados. Se lograron identificar frecuencias representativas para los eventos tipo G (3.0 Hz) y para los eventos tipo D (4.0 Hz), con una duración en promedio de 55 segundos para los primeros y 100 segundos para los últimos.

El cambio en frecuencia del Tremor Armónico, durante el día del colapso parcial del domo, fue de 9.0 Hz por la mañana a 3.0 Hz por la tarde. Este tipo de tremor es semejante en frecuencia y forma al Tremor tipo 4 de la clasificación hecha por Kubotera (1974) para el volcán de Aso en Japón, el cual se cree que está ligado a la actividad eruptiva superficial.

En cuanto al perfil topográfico, éste se deformó el día 15 precediendo al colapso. El día 16 el domo se derrumbó hacia el flanco sur del volcán. Las dimensiones del domo nuevo disminuyeron, hasta el día 24, en un 60 %, aproximadamente, con respecto a las tomadas en los primeros días, ya que la lava continuó avanzando como un derrame. Los cambios en las medidas de inclinometría seca muestran inclinaciones pequeñas ( $\leq 10 \mu\text{-rad}$ ) (Figura 7) que

están en los límites de detección de este método. Sin embargo, las resultantes indican una deflación, ocasionada posiblemente por la desgasificación, la salida de la lava y el colapso parcial del domo antiguo.

Finalmente, se observó que la atenuación de la inclinación después del día 16, es independiente de la distancia a la que se encontraban las estaciones del cráter, ya que en la estación de Montitlán (MTC) se obtuvo una magnitud de  $10 \mu\text{-rad}$ . Debe hacerse notar que estas medidas se realizaron en un período de crisis volcánica que tienen como finalidad establecer un patrón de deformación del terreno para el Volcán de Colima por lo cual es necesario el monitoreo en períodos posteriores para lograr este fin.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó a cabo con la ayuda de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, especialmente de los ingenieros Rivera Palomino y González G. así como del Gabinete de Topografía, que amablemente nos proporcionaron el equipo topográfico. Por otro lado, queremos agradecer a la Secretaría de la Defensa Nacional, especialmente a los Generales Martínez y Sánchez, el apoyo que nos brindaron durante este trabajo. También queremos agradecer al Est. Franco Martínez S., por su ayuda en el trabajo de campo. Esta investigación se desarrolló dentro del proyecto de estudios de peligros volcánicos del Instituto de Geofísica de la UNAM.

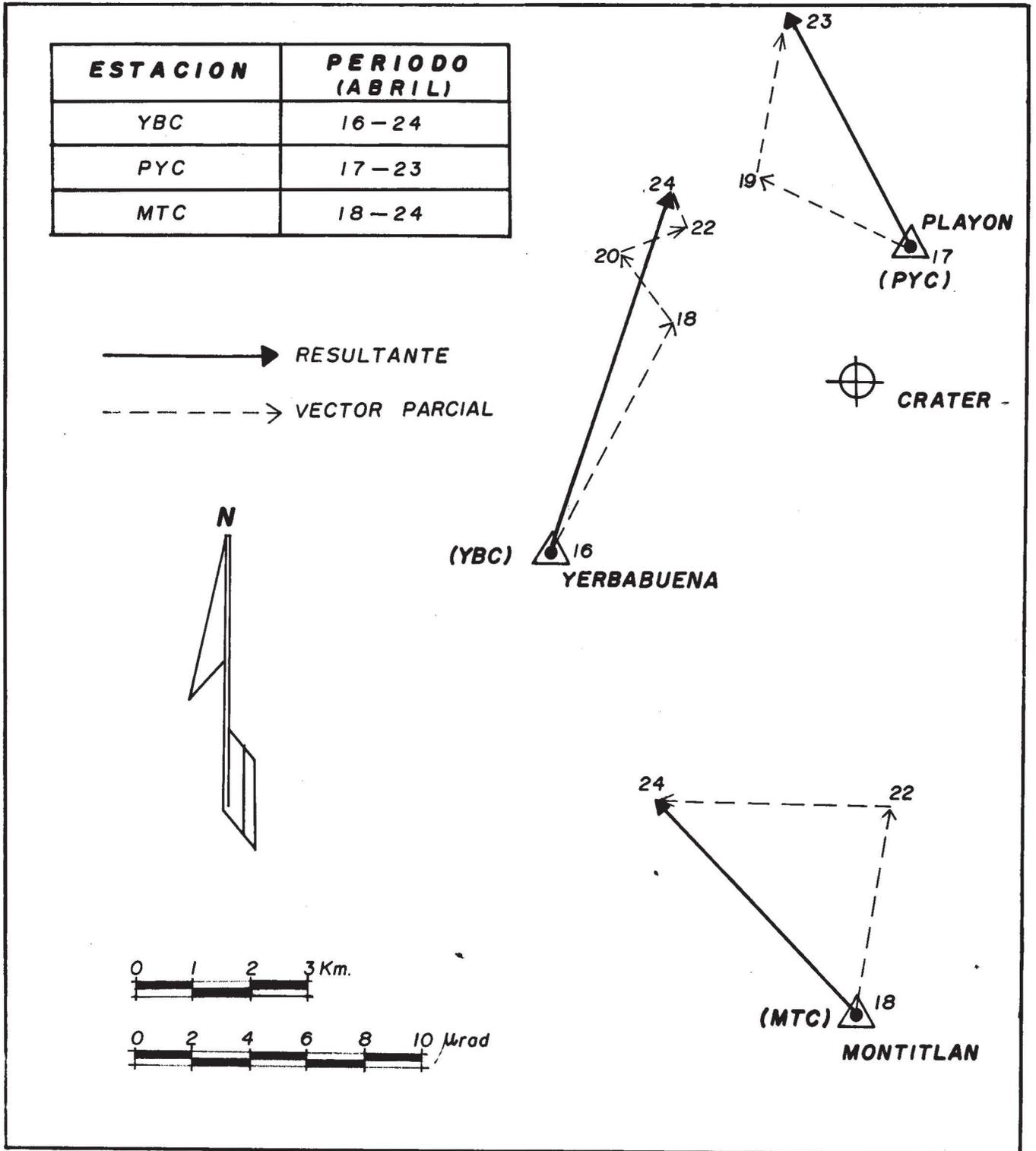


Fig. 7. Gráficas de las resultantes de la suma vectorial de las inclinaciones del terreno en cada una de las estaciones.

BIBLIOGRAFIA

- BANKS, N., R. TILLING, D. HARLOW y J. EWERT, 1989. Volcano Monitoring and Short-Term Forecasts. Volcanic Hazards. American Geophysical Unión, 51-80.
- EATON, J. P., 1959. A Portable Water-Tube Tilmeter, *Bull. Seism. Soc. Am.* 49, 4, 301-316.
- HAVSKOV, J., S. DE LA CRUZ-REYNA, S. K. SINGH, F. MEDINA y C. GUTIERREZ, 1983. Seismic activity related to the March-April, 1982 eruptions of El Chichon volcano, Chiapas, Mexico, *Geophys. Res. Lett.* 10, 4, 293-296.
- KUBOTERA A., 1974. Volcanic tremors at Aso volcano in Civetta L., Gasparini P., Luongo G. y Rapolla A., Eds., Phys. Volcanol. Amsterdam, Elsevier, 29-47.
- LUHR, J. F. y I. S. E. CARMICHAEL, 1980. The Colima Volcanic Complex Mexico. Postcaldera Andesites from Volcan Colima. *Contrib. Mineral. Petrol.* 71, 343-372.
- MARTIN DEL POZZO A. L. y V. H. ROMERO MERCADO., 1989. El Volcán de Colima: Un Estudio Sobre Riesgo, *Litosfera.*, 2, 1, 43-55.
- MINAKAMI T., 1974. Seismology of volcanoes in Japan in Civetta L., Gasparini P., Luongo G. y Rapolla A., Eds., Phys. Volcanol. Amsterdam, Elsevier, 1-27.
- SHIMOZURU, D., 1971. A seismological approach to the prediction of the volcanic eruption *In: The Surveillance and Prediction of Volcanic Activity.* UNESCO Earth. Sci. Monograph, 8, París, 19-45.

---

G. J. González Pomposo<sup>1</sup>, A. L. Martín del Pozzo<sup>2</sup>, J. Panohaya Analco<sup>1</sup> y J. A. de Gante González<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Puebla, 18 Oriente No. 3815, 72330 Puebla, Pue., México.

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, UNAM. Cd. Universitaria. Del. Coyoacán 04510, México D.F., México.