

# Variaciones vulcano-magnéticas en el volcán de Colima, México

Héctor López Loera\*  
Jaime Urrutia Fucugauchi\*\*

*Recibido 20 de marzo, 2002; aceptado 14 de mayo, 2003*

## **Abstract**

Initial results of a volcano-magnetic variation study in the Volcán de Colima are presented. This volcano is considered the most active volcano of Mexico in historic times. This study shows that the volcanic building presents four different magnetic behaviors characterized by magnetic variations in the eastern slope, in the limit of protovolcano caldera, in the floor of the protovolcano (El Playón) and those correlated with areas of weakness like faults and/or fractures. Volcano-magnetic variations are identified as precursors of the 1998-1999 volcanic activity.

## **Resumen**

Se presentan los resultados iniciales de un estudio de variaciones vulcano-magnéticas en el Volcán de Colima. Este volcán está caracterizado como el más activo de México en tiempos históricos. En este estudio se documentan cuatro comportamientos magnéticos en diferentes sectores del complejo volcánico caracterizados por variaciones magnéticas en: la pendiente este, en el límite de la caldera del protovolcán, en el piso del protovolcán (El Playón) y las correlacionadas con zonas de debilidad como fallas y/o fracturas. Se identificaron variaciones vulcano-magnéticas como precursoras a la actividad volcánica de 1998-1999.

\* Depto. de Geología Económica, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. (IPICYT), San Luis Potosí, SLP.

\*\* Laboratorio de Paleomagnetismo y Geofísica Nuclear, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán 04510, México, juf@geofisica.unam.mx

## Introducción

La posibilidad de que variaciones del campo magnético terrestre puedan ser observadas y asociadas a eventos volcánicos ha permitido a diferentes autores reportar estas alteraciones como precursoras de la actividad volcánica (Rikitake, 1951; Johnston and Stacey, 1969a; 1969b; Pozzi *et al.*, 1979; Zlotnicki and Le Moüel, 1988; Zlotnicki *et al.*, 1993; Tanaka, 1993; 1995). Estas variaciones vulcano-magnéticas pueden ser causadas por diferentes tipos de mecanismos, por ejemplo: desmagnetización/remagnetización termal debido a la temperatura (efecto termomagnético), a efectos piezomagnéticos debidos a la tensión (estrés), a movimientos cinéticos de rocas ígneas, a cambios químicos de minerales magnéticos y a efectos electrocinéticos debidos a flujo de agua subterránea.

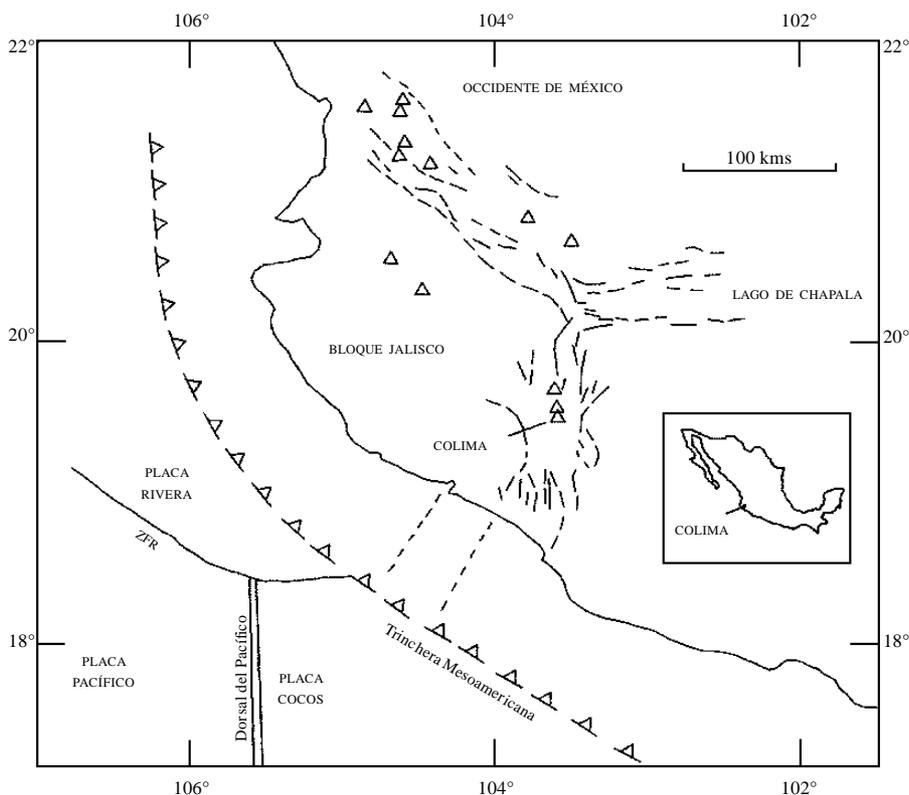
En los volcanes activos monitoreados magnéticamente se ha visto que el efecto termo-magnético es el más importante debido a la gran cantidad de energía termal concentrada y disipada a través del cráter por medio de la actividad fumarólica y expulsión de productos volcánicos como piroclastos y lava. Cualquier efecto termo-magnético está fuertemente asociado al contenido y tipo de minerales ferromagnéticos que conforman las rocas (Tanaka, 1993).

Los volcanes de composición química básica (basálticos) son los volcanes en donde los efectos vulcano-magnéticos han sido más observados debido a su intensa magnetización y aunque en los volcanes de composición química intermedia la mayoría de las variaciones son de poca amplitud, de algunas nanoTelsas (nT), es posible que variaciones vulcano-magnéticas ocurran en los volcanes más peligrosos, como lo son los estratovolcanes explosivos andesíticos (Davis *et al.*, 1984; Zlotnicki *et al.*, 1987; Tanaka, 1995).

La investigación de las variaciones vulcano-magnéticas se ha realizado en diferentes volcanes y de diferente forma, dependiendo del número de magnetómetros disponibles para su estudio. Por ejemplo, el volcán Izu-Oshima en Japón, se estudió con 5 magnetómetros fijos hasta 1986 y actualmente se investiga con una red de 10 magnetómetros fijos y 15 estaciones de medición (Hamano *et al.*, 1990); el volcán La Soufriere (Guadeloupe) en la Isla Reunión, tiene 5 magnetómetros fijos y 10 estaciones de medición (Pozzi *et al.*, 1979); el volcán Aso en Japón con 4 fijos y 13 estaciones de medición (Tanaka, 1993); el volcán Merapi en Indonesia con 6 magnetómetros fijos (Zlotnicki *et al.*, 2000); el volcán Monte Santa Helena en Estados Unidos, se estudiaba con 3 magnetómetros antes de la gran explosión del 18 de mayo de 1980 y actualmente se investiga con 5 fijos (Davis *et al.*, 1984; Dzurisin *et al.*, 1990); el volcán Kilauea en Hawai, con 3 magnetómetros fijos (Davis *et al.*, 1973); el volcán Ruapehu en Nueva Zelanda (Johnston and Stacey, 1969b) y el volcán Vulcan en Italia (Del Negro and Ferrucci, 2000) con 2 magnetómetros y, finalmente, el volcán Popocatepetl en México con 2 magnetómetros (Martin Del Pozzo *et al.*, 2002).

### Monitoreo Magnético

El estudio de las variaciones vulcano-magnéticas se efectuó a través de monitorear el comportamiento del campo magnético terrestre en la sección Atenquique-El Playón. Las mediciones de campo magnético se tomaron con magnetómetros de precesión nuclear Geometrics G-816/826-A y G-856 y están dadas en nanoTelsas (nT). Todas las mediciones se corrigieron por deriva diaria y horaria, y para todos los perfiles, el gradiente magnético horizontal fue calculado por medio de  $(T_{j+1} - T_j) / x$ , con  $x = 500$  m, el cual enfatiza las zonas con contrastes laterales en las anomalías magnéticas.



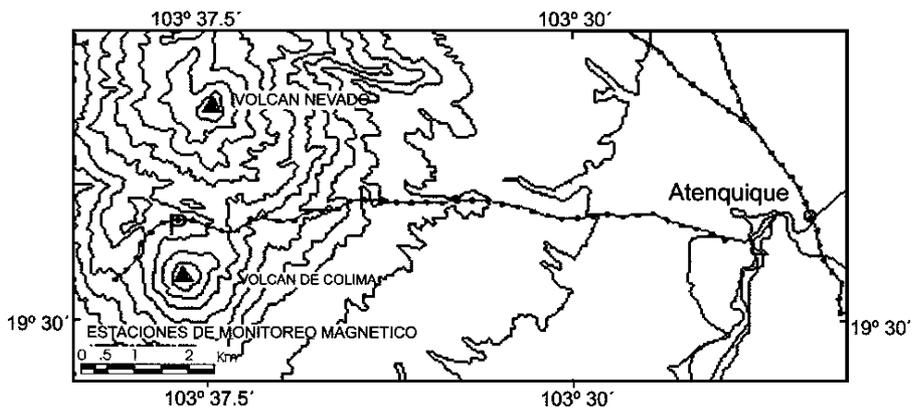
**Figura 1.** Mapa tectónico esquemático del occidente de México donde se observa el rift de Colima y el complejo volcánico de Colima. Los triángulos muestran los centros volcánicos principales en el área. Las curvas discontinuas representan los lineamientos estructurales importantes, mostrando las depresiones tectónicas de los rift de Colima, Tepic-Zacoalco y Chapala. ZFR = Zona de Fracturamiento de Rivera.

### **Sección Atenquique - El Playón**

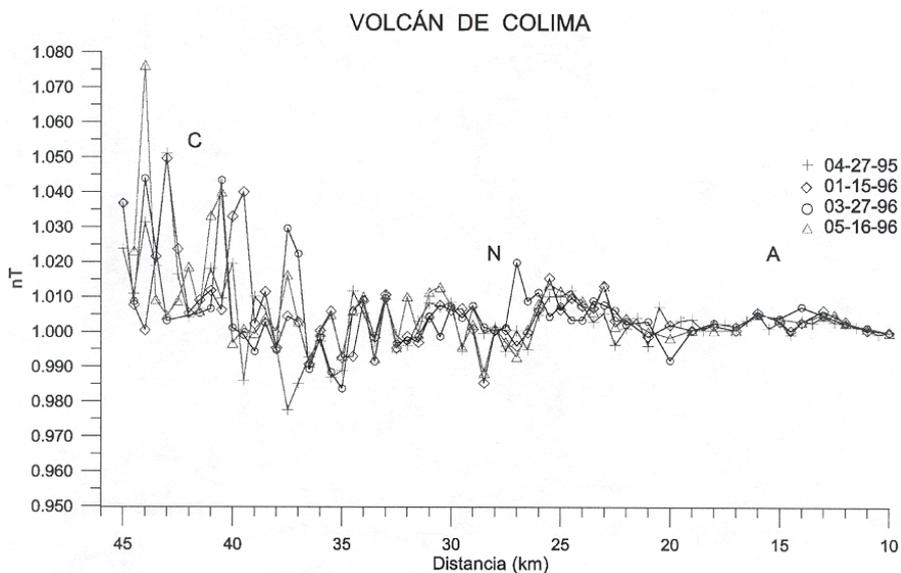
Este estudio se inició realizando primeramente mediciones magnéticas a lo largo de una sección de 35 kilómetros, con estaciones de lectura cada 500 metros, las cuales se indicaron en el terreno con estacas para su reocupación periódica, y marcando cada 3 kilómetros con una mojonera para mejor referencia. Esta sección inicia en Atenquique, en el camino de brecha que parte de la carretera federal Colima-Guadalajara, con dirección al Parque Nacional del Volcán de Colima y termina en El Playón (Figuras 2, 3 y 4). Las mediciones analizadas en esta etapa del estudio cubren un periodo que va del 27 de abril de 1995 al 16 de mayo de 1996. En este tiempo se realizaron cuatro levantamientos, medidos en las mismas estaciones.

Los resultados iniciales reflejan la existencia de tres zonas con comportamientos magnéticos distintos a lo largo de la sección (López-Loera and Urrutia Fucugauchi, 1999; Figura 4). El sector A (Atenquique, Figura 3), entre las estaciones km 10 y km 20.5, está asociado a depósitos de avalanchas de escombros y depósitos vulcanosedimentarios de la formación Atenquique del volcán Nevado (Luhr and Carmichael, 1990) y se caracteriza por amplitudes bajas. El sector N (Nevado, Figura 3), entre las estaciones km 20.5 y km 34.5, está ubicado sobre brechas y lavas andesíticas del volcán Nevado de Colima y se caracteriza por un conjunto de anomalías de alta frecuencia y amplitudes diversas y por cambios magnéticos temporales de baja amplitud. El sector C (Volcán de Colima, Figura 3), ubicado entre las estaciones km 34.5 y km 45, se asocia geológicamente con avalanchas de escombros, lavas y brechas del Volcán de Colima actual (Luhr and Presteggaard, 1988) y está caracterizado por altas frecuencias y amplitudes varias (bajos y altos).

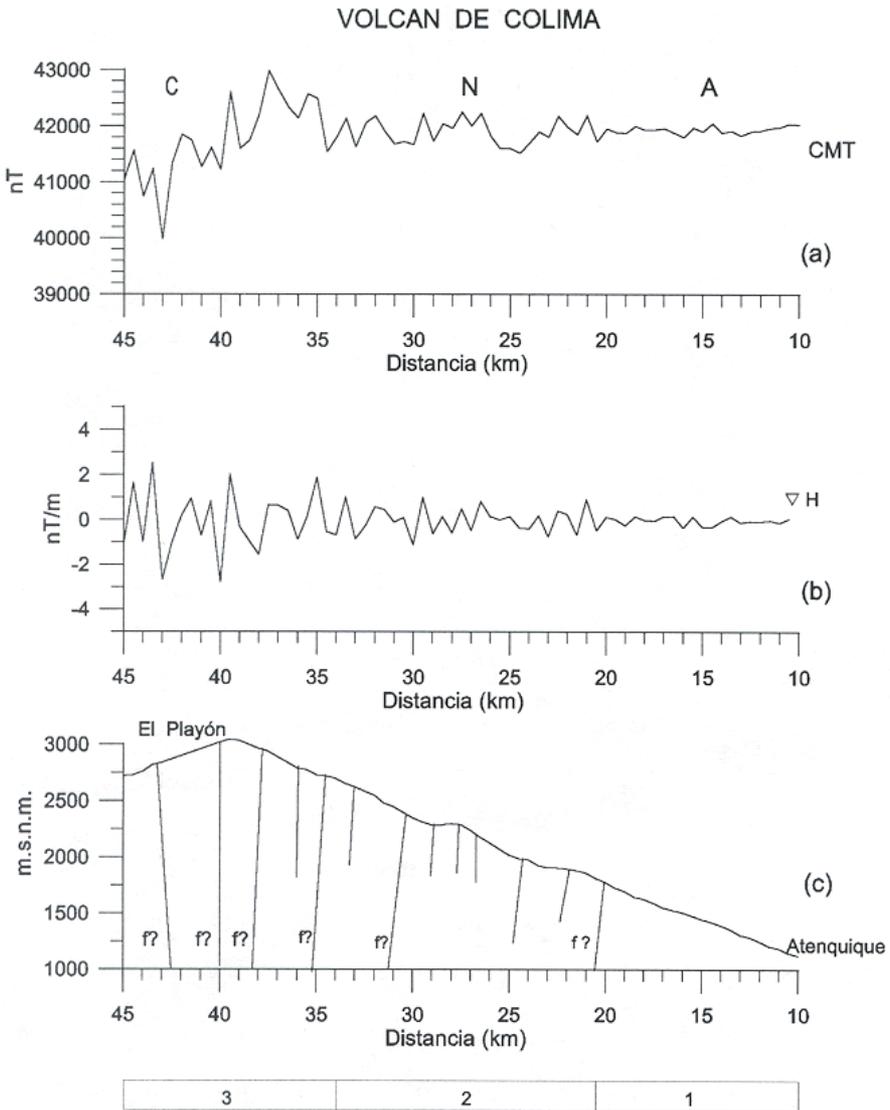
En una tentativa por investigar la geometría y propiedades magnéticas de los cuerpos fuente de las anomalías que se evidencian en la sección, se intentó modelar las anomalías de campo magnético, suavizadas a través de un filtro de promedios pesados (Davis, 1973), usando el algoritmo de Talwani (Talwani *et al.*, 1964) y el programa MacPoly<sup>TM</sup> en su versión para computadora PC. Los modelos de las anomalías de campo magnético indican que los cuerpos fuente pueden extenderse cientos de metros bajo la superficie (Figura 5), lo que geológicamente implica que las gravas y lavas del Colima y del Nevado y la Formación Atenquique tienen un gran espesor, a pesar de que existe una considerable incertidumbre en las variaciones de las propiedades magnéticas a profundidad. Los datos de las anomalías sugieren que las variaciones temporales en la magnetización en la zona del volcán están causadas por cambios en la temperatura. En particular, el proceso de magnetización/desmagnetización bajo el cono y áreas asociadas a la actividad eruptiva pueden contribuir a los cambios. Los mecanismos potenciales para los procesos de calentamiento/enfriamiento pueden incluir movimientos del magma, así como un sistema hidrotermal activo con fuerte actividad fumarólica e interacciones de agua subterránea. Un bajo magnético de 1500-2500 nT está asociado al cono volcánico y a la caldera de avalancha. Los cambios temporales observados se superponen sobre estas altas amplitudes con anomalías magnéticas de baja frecuencia (Figura 5).



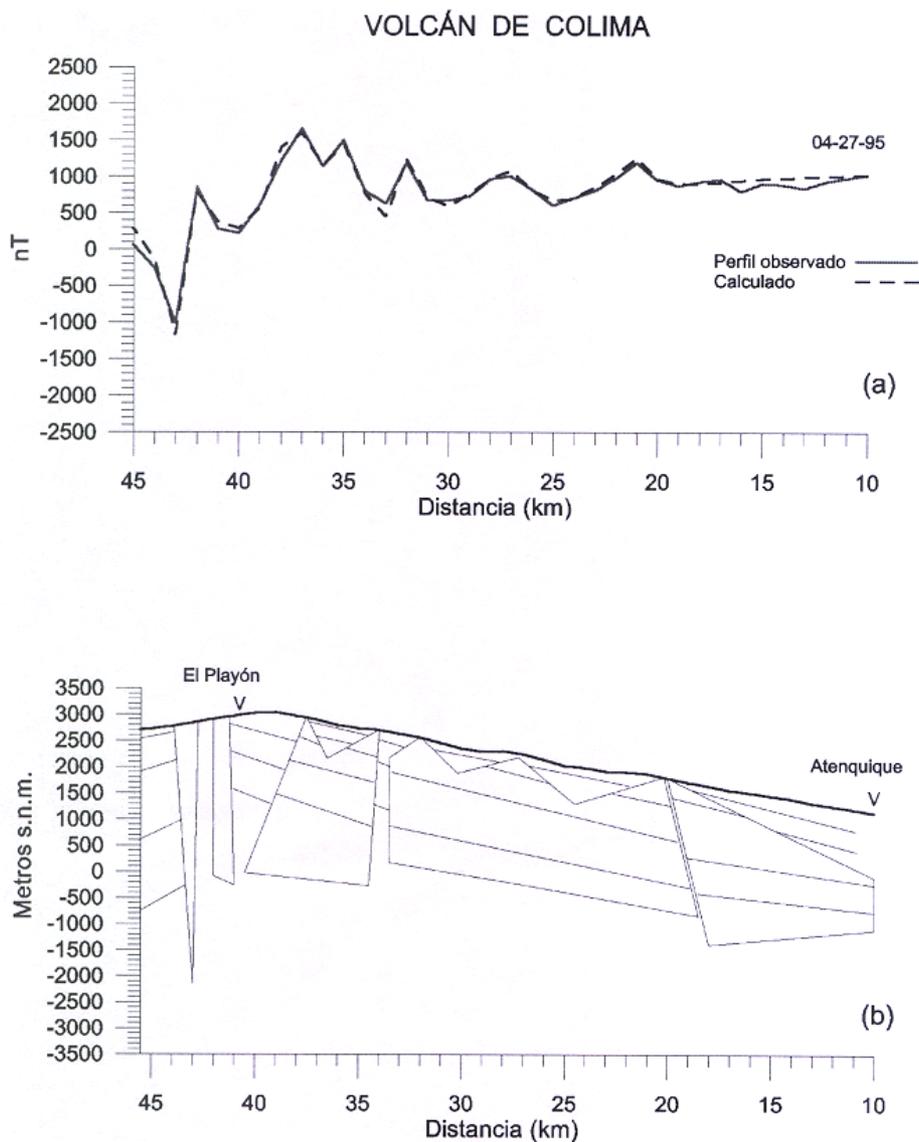
**Figura 2.** Plano topográfico de la parte central del Complejo Volcánico de Colima en donde se muestra la ubicación de la sección El Playón-Atenquique. La letra P señala la ubicación de la zona de El Playón.



**Figura 3.** Perfiles magnéticos normalizados de las mediciones del campo total realizadas en la sección El Playón - Atenquique de abril 27 de 1995 a mayo 16 de 1996. Nótese las claras diferencias entre los tres dominios magnéticos que constituyen la sección: Colima (C), Nevado (N) y Atenquique (A).



**Figura 4.** Sección El Playón - Atenquique, en donde se muestran los perfiles de la intensidad del campo magnético total (a), el gradiente horizontal magnético (b) y topográfico (c). Obsérvense las diferencias magnéticas entre los diferentes sectores o dominios (C, N, A) que conforman el perfil magnético. En la parte inferior se presenta el esquema geológico. 1: Formación Atenquique. 2: Lavas y brechas andesíticas precaldera. 3: Lavas y brechas postcaldera (Luhr y Carmichael, 1990).



**Figura 5.** Modelo magnético de la sección El Playón - Ateniquete. En las gráficas (a) se presenta la intensidad de campo magnético total (CMT) observada y suavizada con un filtro de promedios pesados de tres puntos y el CMT calculada, apreciándose un buen ajuste entre las dos, en (b) se observa el perfil topográfico y los cuerpos fuentes que sirvieron para el modelo magnético. Obsérvese que los cuerpos fuentes se extienden a cientos de metros a profundidad.

### **Sección El Playón**

En la primera etapa de este estudio se observó que de los tres dominios magnéticos interpretados en la sección Atenquique-El Playón de 35 km de largo y ubicada en el flanco este del volcán, el sector C (Volcán de Colima, Figura 6), presentó los cambios magnéticos más notorios en tiempo y espacio, por lo que se procedió a ubicar una serie de estaciones de lectura del campo magnético dentro y fuera del piso del cráter del protovolcán de Colima, la mayoría de ellas ubicadas en la zona denominada El Playón.

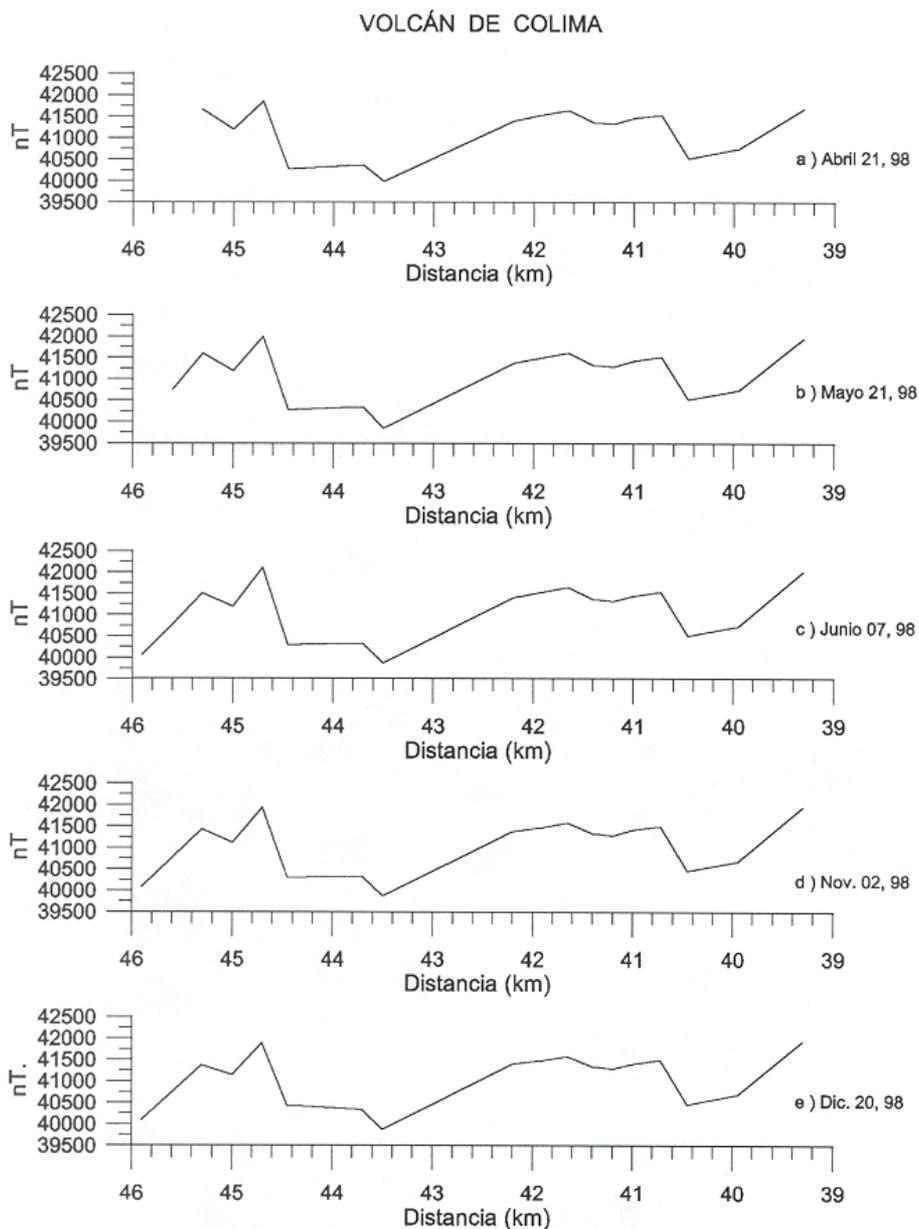
Durante el periodo comprendido entre 1998 y 1999, las estaciones de lectura se localizaron a lo largo de una sección de casi 7 km de longitud (de la estación km 39.3 a la km 46), ubicándose con mojoneras y a una distancia entre 200 y 500 metros entre cada estación.

Las estaciones de lectura del Sector C se reocuparon en cinco ocasiones diferentes en 1998; abril 21, mayo 21, junio 07, noviembre 02 y diciembre 20. En la Figura 6 se muestran los cinco levantamientos magnéticos.

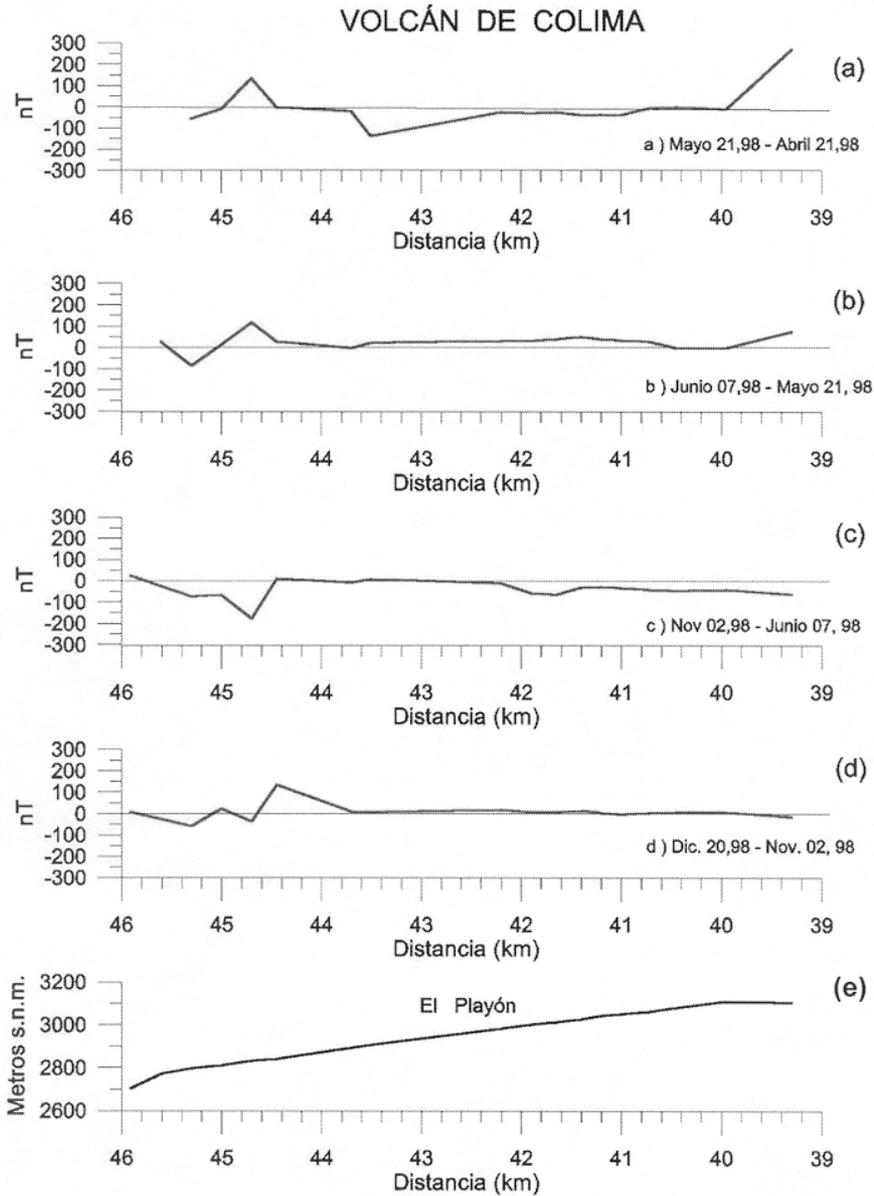
En la Figura 7 se pueden observar las diferencias entre cada dos conjuntos de mediciones subsecuentes realizadas en 1998. Se observa (Figura 7a) que la intensidad de magnetismo en la mayor parte de la sección disminuyó de mayo 21 con respecto a abril 21; por el contrario, las mediciones de junio 07 (Figura 7b) muestran un incremento de la intensidad de magnetismo respecto de las de mayo 21; las mediciones de la intensidad de magnetismo de noviembre 02 (Figura 7c) en relación con junio 07 muestran una clara disminución en la mayor parte de la sección. La intensidad de magnetismo en el volcán tuvo un ligero incremento de la estación 39.3 a 42.3, presentando un fuerte contraste de la estación 43.8 a 45.2, de diciembre 20 con respecto de noviembre 02 de 1998 (Figura 7d). Por su parte, la Figura 7e muestra la morfología en la zona del cráter del protovolcán.

Seis estaciones (Figura 8) se reocuparon con una precisión de un centímetro en nueve ocasiones diferentes de abril 27 de 1995 hasta diciembre 20 de 1998.

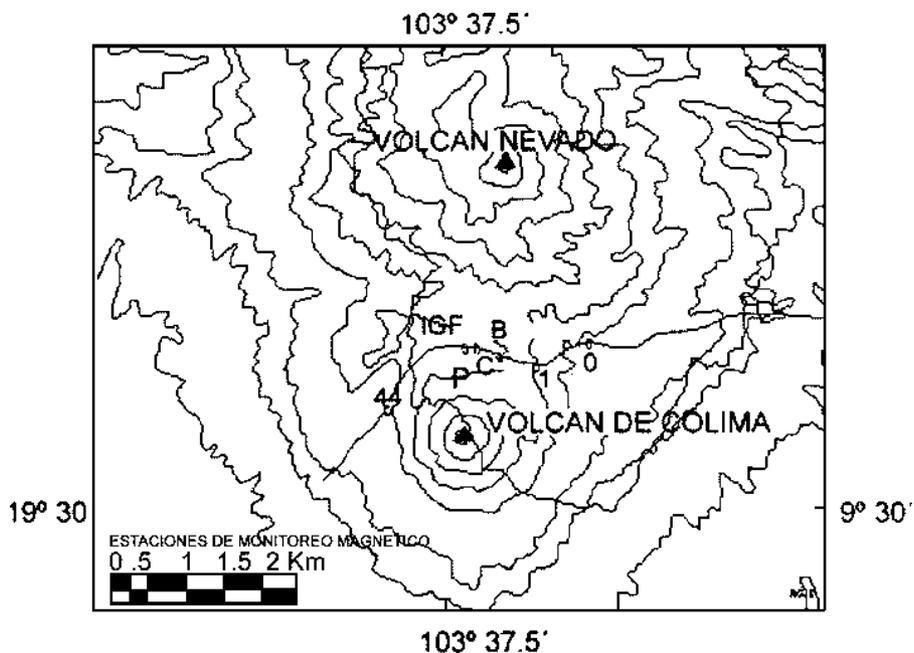
La primera de estas estaciones se ubica al inicio del Parque Nacional Volcán de Colima (2950 msnm), es decir, que se localiza en la estribación este del Volcán de Colima y se identifica como estación 0 (Figuras 8 y 9). La segunda estación se sitúa en el límite exterior del protovolcán (3150 msnm) y se identifica como estación 1 (Figuras 8 y 9). La tercera, estación B, se localiza al iniciar el protovolcán (3080 msnm, Figuras 8 y 9). La cuarta estación se sitúa entre el límite interior del protovolcán y el área conocida como El Playón (3060 msnm) y se identifica como estación C (Figuras 8 y 9). La quinta estación se localiza en la zona de El Playón y tiene el nombre de IGF (Figuras 8 y 9), por ser ésta una mojonera del Instituto de Geofísica (3050 msnm). La sexta estación, denominada km 44, se asocia a un área correlacionada con una zona de debilidad, probablemente una falla (2905 msnm), se sitúa próxima a la estación sismológica Soma del RESCO (Figuras 8 y 9).



**Figura 6.** Perfiles magnéticos de las cinco mediciones de la intensidad del campo magnético total realizados en la zona de El Playón (sector magnético C) entre abril 27 de 1995 y diciembre de 1998.



**Figura 7.** Diferencias entre cada dos conjuntos de mediciones consecutivas de la intensidad del campo magnético total realizadas en la zona de El Playón entre abril 21 y diciembre 20 de 1998.



**Figura 8.** Ubicación de las seis estaciones en las que se monitoreó la intensidad del campo magnético total en el sector Colima de abril 25 de 1995 a diciembre 20 de 1998. La letra P señala la ubicación de El Playón.

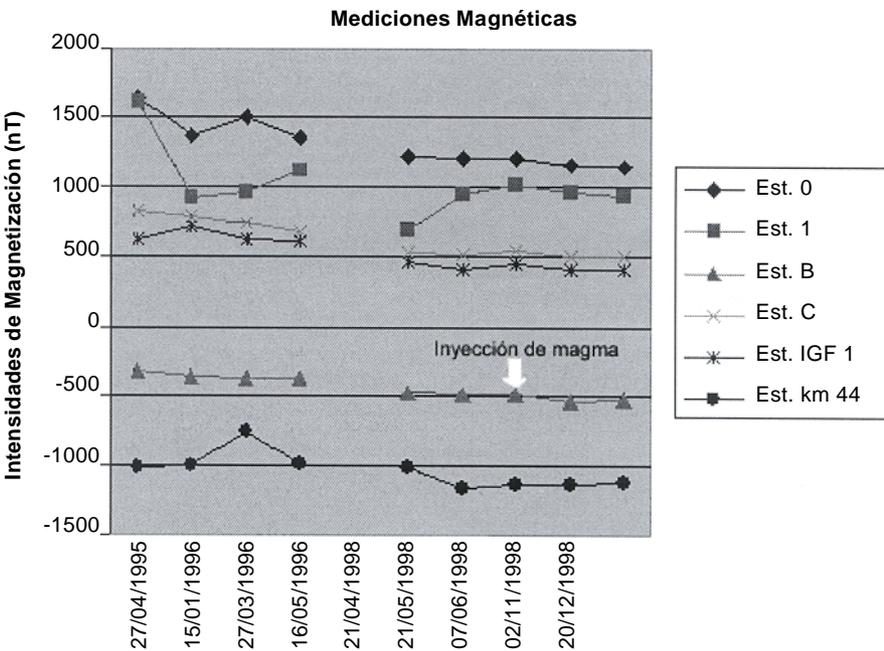
Al analizar en conjunto todas estas estaciones magnéticas (Figura 9), se observa que la mayoría de ellas presentan una disminución entre la primera (abril 27 de 1995) y última lecturas (diciembre 20 de 1998) de la intensidad del Campo Magnético Total (CMT). El comportamiento magnético de cada una de las estaciones está correlacionado con su ubicación respecto al cráter. Las intensidades magnéticas (> 42,000 nT) de las estaciones ubicadas al este del cráter (estaciones 0 y 1) son mayores que las ubicadas en el área del protovolcán (<42,000 nT) y de éstas, las ubicadas en la cercanía con los límites del protovolcán presentan intensidades del campo magnético menores (estación B). La estación magnética ubicada en el Parque Nacional (estación 0) muestra lo que sería el comportamiento normal del campo magnético asociado a un flanco de una estructura volcánica, observándose una disminución constante de la intensidad magnética que probablemente esté asociada a la variación secular en la zona, exhibiendo una clara disminución de la intensidad del magnetismo entre abril 27 de 1995 y enero 15 de 1996 (Figura 9), así como una recuperación de la intensidad del magnetismo en marzo 27 de 1996.

El comportamiento magnético que muestran las estaciones ubicadas en el área de El Playón (estaciones C e IGF) se correlaciona a un cambio moderado y constante de la intensidad del campo magnético (Figura 9).

Se efectuó, además, un estudio del comportamiento magnético de cada estación durante un periodo de 36 meses en los que se realizaron mediciones de la intensidad, espaciadas en tiempo desde 18 días hasta 23 meses. Los resultados se analizan a continuación.

*Estación 0*

Ubicada en el flanco E del Volcán de Colima, en donde inicia el Parque Nacional (Figura 8), presenta una alta intensidad magnética (> 42,000 nT) y su comportamiento en general es "normal", es decir, presenta una clara variación secular. Sólo en el mes de enero de 1996 presenta una "anomalía" asociada con un decremento anormal de la intensidad del campo magnético (Figura 9).

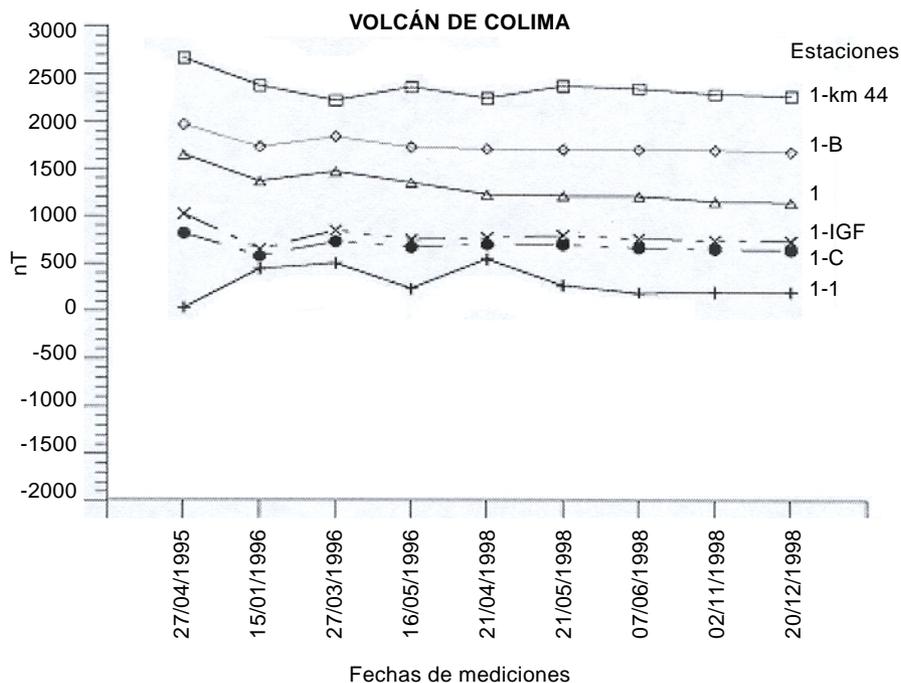


**Figura 9.** Gráfica que muestra los valores del campo geomagnético observado en las nueve mediciones realizadas entre abril 27 de 1995 y diciembre 20 de 1998, en las seis estaciones del monitoreo magnético del Volcán de Colima. A los valores magnéticos se les sustrajo el valor del Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF) de 1995. En 1997 no hubo mediciones. Nótese que a partir del 7 de junio de 1998, la mayoría de las estaciones sufren una disminución en la intensidad de magnetismo, debido probablemente a la inyección de magma en el conducto volcánico.

Las variaciones magnéticas que presenta esta estación respecto a las ubicadas en el cráter del protovolcán, se pueden asociar en tres grupos, uno conformado por las estaciones que tienen un paralelismo como el que constituyen las estaciones 0, B, C e IGF y que no generan ninguna anomalía magnética evidente (Figura 10). El segundo está asociado a la diferencia magnética entre la Estación 0 y Km 44, de marzo 27 y mayo 16 de 1996, en donde existe una anomalía de la intensidad de campo. Mientras que, la estación 1 conforma el tercer grupo, presentando las variaciones más fuertes con respecto a la estación 0. La diferencia en la intensidad magnética entre estas dos estaciones genera anomalías en las mediciones de enero 15, marzo 27 de 1996 y abril 21 de 1998.

*Estación 1*

Esta estación se ubica entre el límite interno y externo de la caldera del protovolcán (Figura 8) y presenta fuertes contrastes en la intensidad del campo magnético (Figura 9). La estación registró una variación en su comportamiento magnético de abril

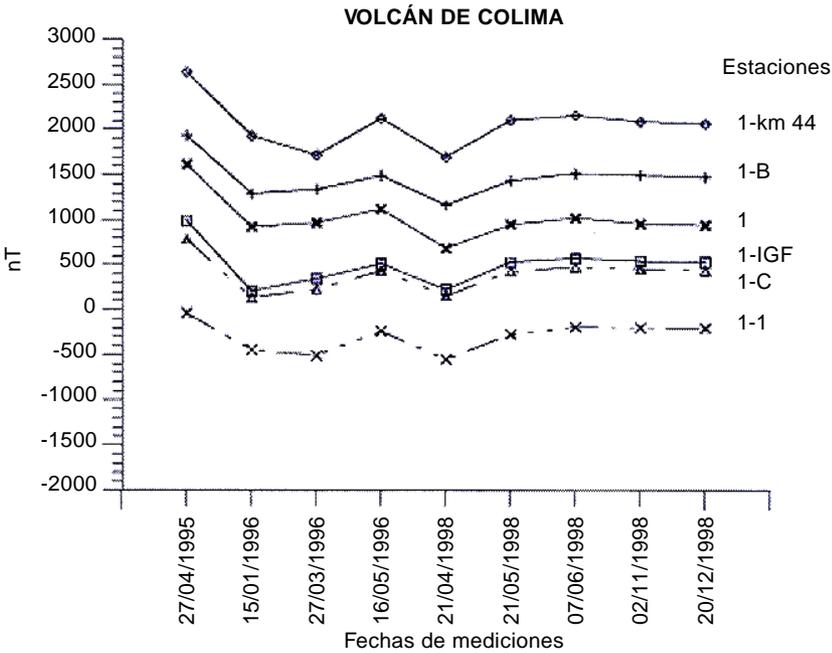


**Figura 10.** Gráfica que muestra las diferencias en el valor de la intensidad del campo geomagnético entre la estación 0 y las otras estaciones del monitoreo magnético, para cada una de las fechas de medición realizadas en el periodo de abril 27 de 1995 y diciembre 20 de 1998. La estación 0 se ubica en el flanco E del Volcán de Colima.

27 de 1995 a enero 15 de 1996. Inicialmente, el valor es casi el doble del valor registrado cerca de 7 meses después, manteniéndose un ligero incremento en los siguientes 4 meses. La siguiente lectura en abril 21 de 1998, muestra de nuevo un fuerte decremento respecto de la lectura anterior. En mayo 21 de 1998, presenta un fuerte incremento respecto de la medición anterior, continuando en junio 07 de 1998 con un ligero aumento en la intensidad, y de ahí, a diciembre 20 de 1998 muestra otro periodo discreto de disminución de la intensidad del campo geomagnético (Figuras 9).

Las diferencias con las otras estaciones (Figura 11) no indican cambios importantes con respecto al comportamiento magnético en la estación 1, con excepción de la variación obtenida con las intensidades de campo de marzo 27 de 1996 en las estaciones km 44 y 0. En la comparación de las estaciones, la intensidad magnética de la estación 1 es predominante y por eso conserva su comportamiento.

La estación 1 presentó valores superiores a 42,000 nT, así como los mayores contrastes de susceptibilidad magnética, probablemente por su ubicación que se asocia al límite exterior de la caldera del protovolcán. Esta zona está sometida por un lado, a variaciones termomagnéticas, y por otro, a efectos piezomagnéticos.



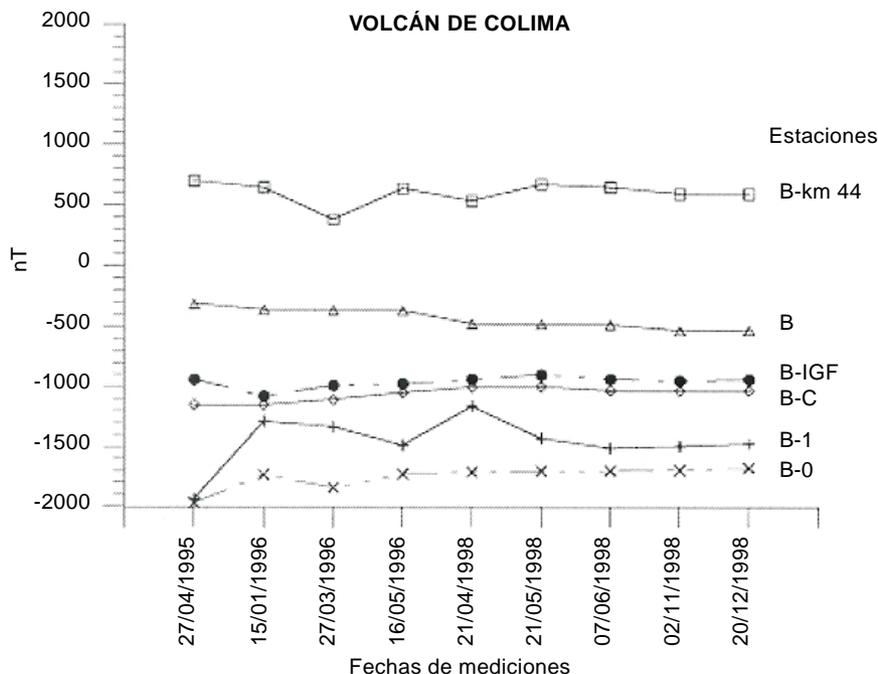
**Figura 11.** Gráfica que muestra las diferencias en el valor de la intensidad del campo geomagnético entre la estación 1 y las demás estaciones del monitoreo magnético, para cada una de las fechas de medición realizadas en el periodo de abril 27 de 1995 a diciembre 20 de 1998. La estación 1 se localiza en el límite interno y externo de la caldera del protovolcán de Colima.

*Estación B*

La estación B se localiza en la parte interior (piso) del protovolcán de Colima y cercana al límite de la caldera (Figura 8). Esta estación presenta en general una disminución de la intensidad del campo magnético mostrando un ligero incremento de noviembre 02 a diciembre 20 de 1998 (Figura 9).

Dentro de las disminuciones de la intensidad de magnetismo que presenta esta estación, exhibe decrementos anormales en la intensidad del campo entre abril 27 de 1995 y enero 15 de 1996, así como, en las mediciones del campo de mayo 16 de 1996 y abril 21 de 1998. En las intensidades magnéticas de junio 27 a noviembre 02 de 1998 existe una mayor disminución que la que venía presentando desde abril de 1998 (Figura 9).

La comparación de la estación B con el resto de las estaciones genera resultados muy diversos: referente a la estación 0 presenta una discreta anomalía magnética entre las lecturas de abril 27 de 1995 y enero 15 de 1996. La variación de la estación 1 con respecto a esta estación, presenta fuertes contrastes de magnetismo entre las



**Figura 12.** Gráfica que muestra las diferencias en el valor de la intensidad del campo geomagnético entre la estación B y las otras estaciones del monitoreo magnético, para cada una de las fechas de medición realizadas en el periodo de abril 27 de 1995 y diciembre 20 de 1998. La estación B se ubica en la parte interior del protovolcán de Colima y cercana al límite de la caldera.

mediciones de abril 27 de 1995 y enero 15 de 1996, así como, entre mayo 16 de 1996 y abril 21 de 1998. El comportamiento magnético de las estaciones C e IGF en conexión con la estación B, es muy similar, observándose una discreta anomalía en las estaciones entre enero 15 y mayo 16 de 1996 (Figura 12). La comparación y diferencia entre las intensidades del campo magnético medidas entre las estaciones B y km 44 genera una anomalía entre las mediciones de marzo 27 y mayo 16 de 1996, así como, entre abril 21 y mayo 21 de 1998 (Figura 12).

La estación B presentó valores de campo magnético menores a 42,000 nT, con excepción de la estación Km 44, mostró las menores intensidades de todo el estudio, probablemente por su ubicación cercana al límite interior de la caldera del protovolcán.

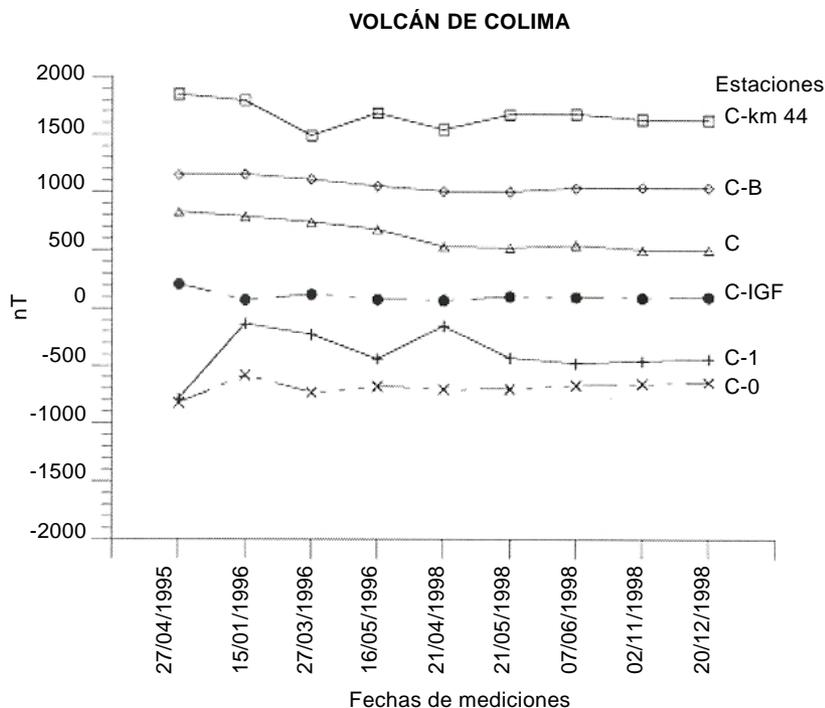
### *Estación C*

La estación C está situada en la zona de El Playón (piso del protovolcán, Figura 8) y presenta una disminución aproximadamente constante 11.6 nT/mes de abril 27 de 1995 a mayo 16 de 1996 en los valores de la intensidad de campo magnético (Figura 9). De esta última fecha a abril 21 de 1998, sufre una fuerte disminución en la intensidad del magnetismo, continuando entonces con un discreto decremento de intensidad del campo hasta mayo 21. En junio 07 de 1998 los valores de la intensidad parecen reponerse con un ligero incremento de la intensidad de magnetismo, mientras que, en noviembre 02 de 1998 vuelve a disminuir con respecto a la fecha anterior. Finalmente, en diciembre 20 de 1998 la intensidad del campo magnético permanece prácticamente igual que en noviembre (diferencia de 2 nT).

Al comparar la estación con las otras estaciones se observa que, con relación a la estación 0 hay una disminución en las mediciones de enero 15 de 1996, mientras que, con respecto a la estación 1, en enero 15 de 1996 y abril 21 de 1998, presenta claras variaciones en la intensidad del campo magnético. La diferencia entre las estaciones C y B no presenta ninguna distorsión del campo magnético (Figura 13). Por su parte, con respecto a la estación IGF, sólo en las mediciones de la intensidad del campo de enero 15 de 1996 se puede observar una discreta variación anormal. Finalmente, con respecto a las estaciones C y km 44, se observa claramente la existencia de una diferencia anormal en las mediciones de marzo 27 de 1996 y una más discreta en abril 21 de 1998.

### *Estación IGF*

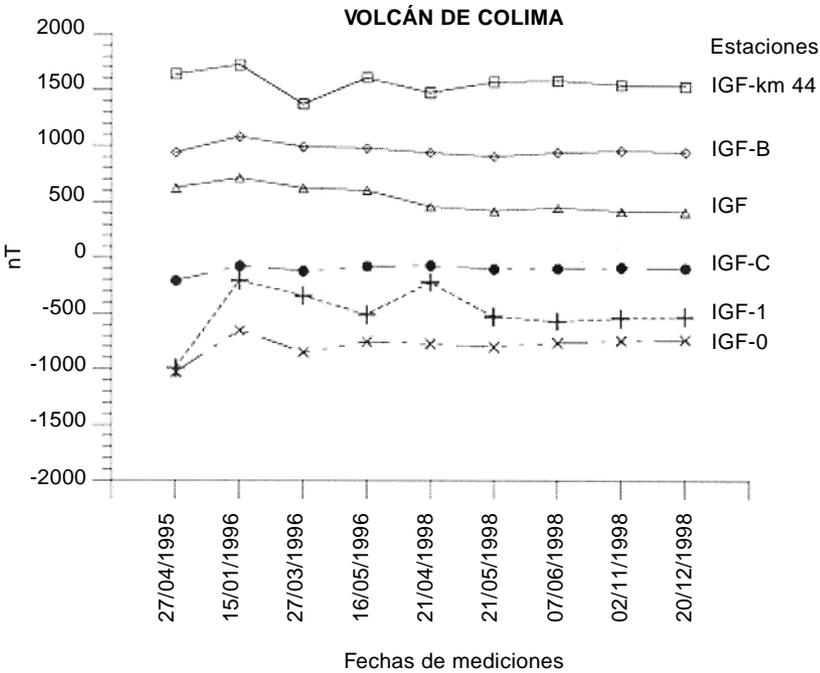
La estación IGF se localiza en la zona de El Playón (Figura 8) y su comportamiento magnético muestra, en general, una disminución de la intensidad del campo. Presenta dos periodos magnéticamente anómalos: enero 15 de 1996 y junio 07 de 1998. En estas fechas el campo geomagnético, presenta un incremento en su intensidad, mien-



**Figura 13.** Gráfica que muestra las diferencias en valor de la intensidad del campo geomagnético entre la estación C y las demás estaciones del monitoreo magnético, para cada una de las fechas de medición realizadas en el periodo de abril 27 de 1995 y diciembre 20 de 1998. Esta estación se sitúa en el piso del protovolcán de Colima, en la zona conocida como El Playón.

tras que, entre mayo 16 de 1996 y abril 21 de 1998 se presentó una disminución anormal de la intensidad del campo magnético (Figura 9).

La diferenciación entre la estación IGF y las demás estaciones, muestra con respecto a la estación 0 una clara anomalía en las intensidades del campo de entre abril 27 de 1995 y enero 15 de 1996 y entre la primer fecha y mayo 16 de 1996 (Figura 14). Con relación a la estación 1 presenta dos periodos claramente anómalos, el primero entre abril 27 de 1995 y enero 15 de 1996 y el segundo en abril 21 de 1998 (Figura 14). Por otra parte, la variación magnética entre las estaciones IGF y C es muy discreta y se presenta desde abril 27 de 1995 hasta mayo 16 de 1996 (Figura 14), mientras que, entre las estaciones magnéticas IGF y B no muestran ninguna anomalía (Figura 14). En la comparación de las estaciones IGF y km 44, se observan dos tiempos magnéticamente anómalos, el primero y muy claro en marzo 27 de 1996 y el segundo más discreto en abril 21 de 1998 (Figura 14).

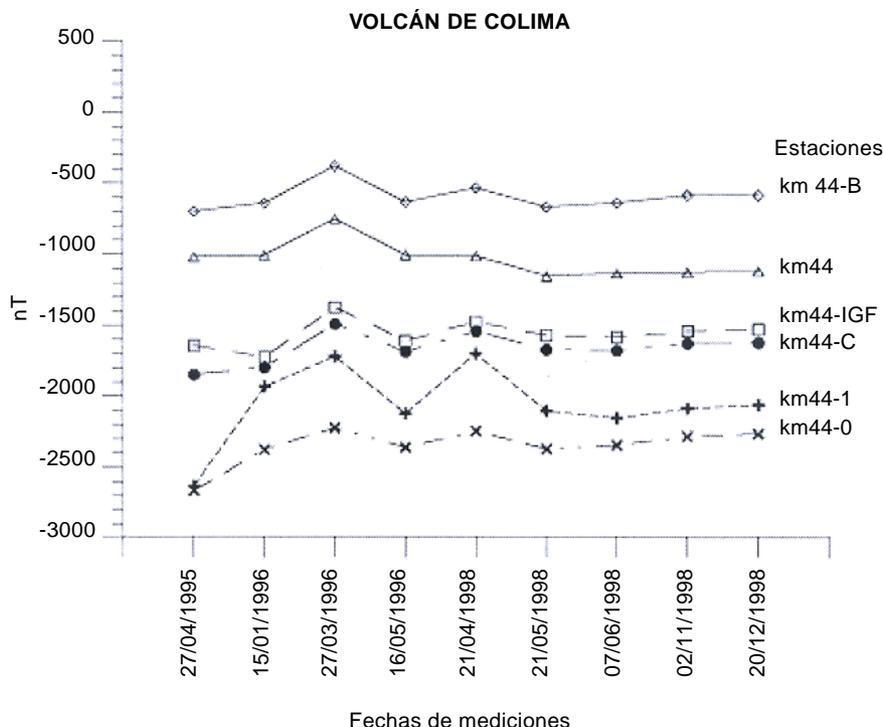


**Figura 14.** Gráfica que muestra las diferencias en el valor de la intensidad del campo geomagnético entre la estación IGF y las otras estaciones del monitoreo magnético, para cada una de las fechas de medición realizadas en el periodo de abril 27 de 1995 y diciembre 20 de 1998. La estación IGF se localiza en la parte central de El Playón.

*Estación Km 44*

La estación Km 44 se localiza dentro de la caldera del protovolcán de Colima, aunque fuera de la zona conocida como El Playón, y muy cercana a la estación sísmica del RESCO (Red Sísmica de Colima) denominada Soma (Figura 8). Esta estación está asociada a una zona de debilidad (fractura y/o falla), lo cual contribuye a que los valores de la intensidad del campo magnético sean bajos (López-Loera, 2002). La estación km 44 presenta un comportamiento magnético cuyas características principales están asociadas con cambios claros en la susceptibilidad magnética en marzo 27 de 1996 y mayo 21 de 1998. A partir de esta última fecha y hasta diciembre 20 de 1998 el campo presentó un comportamiento con cambios discretos y frecuentes en la intensidad del campo magnético (Figura 9).

Las variaciones vulcanomagnéticas entre la estación km 44 y las estaciones B, C e IGF no generan una discordancia magnética fuerte (Figura 15). Sin embargo, con respecto a la estación 1 muestra diferencias anómalas en la intensidad del campo en mayo 16 de 1996. Asimismo, con respecto a la estación 0 también presenta diferen-



**Figura 15.** Gráfica que muestra las diferencias en el valor de la intensidad del campo geomagnético para cada una de las fechas de medición realizadas entre el periodo de abril 27 de 1995 y diciembre 20 de 1998, entre la estación km 44 y las demás estaciones del monitoreo magnético. Esta estación se localiza dentro de la caldera del protovolcán, al W de El Playón y su ubicación se relaciona con una zona de debilidad asociada a una falla.

cias anómalas de las intensidades en abril 27 de 1995 y en mayo 16 de 1996, esta última muy discreta.

**Discusión y conclusiones**

La intensidad del campo magnético asociada a la estructura volcánica del Volcán de Colima presenta cuatro comportamientos: la intensidad del magnetismo del área fuera del volcán (estación 0, Figuras 8 y 9), la intensidad del magnetismo en el límite de la caldera del protovolcán (estación 1, Figuras 8 y 9), la intensidad del magnetismo correlacionado con el piso del protovolcán (El Playón, estaciones C e IGF, Figuras 8 y 9) y el cuarto es el que se asocia a zonas de debilidad como fracturas y/o fallas (López-Loera, 2002; estación km 44; Figuras 8 y 9).

Para la interpretación de las variaciones vulcano-magnéticas, algunos estudios han intentado separar las componentes que constituyen el campo magnético principal (Pozzi *et al.*, 1979; Del Negro and Ferrucci, 2000). Entre ellas, el campo interno (originado en el núcleo terrestre), el campo producido por fuentes magnéticas estáticas (debido a las rocas de la corteza terrestre), el campo asociado a la estructura volcánica e inducido por el fenómeno eruptivo y por el campo formado por todos los transientes cuya fuente principal es externa.

Los estudios de las variaciones espacio/temporales del campo geomagnético están principalmente basados en los registros continuos y discretos de las redes de observatorios geomagnéticos. Los datos se usan para establecer los modelos globales de referencia, como el Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF). Los modelos de IGRF constituyen el campo de referencia para estudios de anomalías magnéticas en investigaciones en tierra y en mar y para la comparación/calibración de datos de observatorios y redes de variación secular (Urrutia and Campos, 1993; Dawson and Newitt, 1982).

La metodología que hasta el momento ha presentado los mejores resultados como precursora de actividad volcánica es aquella que compara los resultados de las mediciones de la intensidad de campo magnético terrestre dentro y fuera de la estructura geológica volcánica. En este estudio en el volcán de Colima se empleó un magnetómetro para la medición de la intensidad del campo magnético terrestre, por lo cual no fue posible aplicar completamente la metodología para la investigación de las variaciones vulcano-magnéticas. Sin embargo, se desarrolla una metodología alternativa de medición de actividad magnética como precursora de actividad magnética para aquellos volcanes que por limitaciones instrumentales cuenten con un sólo magnetómetro.

Para la observación de los efectos vulcano-magnéticos en los volcanes se comparan las mediciones del campo magnético entre los diferentes magnetómetros de los cuales al menos uno de los instrumentos debe de ubicarse fuera del ámbito volcánico y tomando las mediciones de éste como referencia para las mediciones de los otros magnetómetros. El campo magnético total en la estación de referencia se mide cada determinado tiempo y se compara con las mediciones de los otros magnetómetros que a su vez miden al mismo tiempo la intensidad del campo magnético. Las diferencias en la intensidad del campo magnético entre la estación base y cada uno de los magnetómetros se analiza y se interpreta el tipo de efecto vulcano-magnético causante de dichas variaciones.

La intensidad del magnetismo fuera del volcán se considera como un comportamiento "normal" y sirve de nivel base en el análisis del magnetismo en el área. La instalación y operación de una estación geomagnética en el Observatorio Volcanológico de Colima (Hernández *et al.*, 2000) ofrece la oportunidad de establecer una red de monitoreo en el volcán e investigar las variaciones geomagnéticas de

periodos cortos e intermedios. Las mediciones del campo geomagnético en Colima han sido comparadas con los datos del Observatorio Magnético de Teoloyucán, ubicado al norte de la ciudad de México, obteniéndose una alta correlación (coeficientes del orden de 0.99) para el periodo investigado. Las estaciones ubicadas en el piso de la caldera del protovolcán de Colima presentan un magnetismo que sugiere la hipótesis de estar asociado directamente con los procesos en los conductos y en la cámara magmática y que las variaciones magnéticas observadas o medidas están correlacionadas con efectos termales principalmente generados por la reactivación de la cámara.

El magnetismo en la zona límite de la caldera presenta los mayores contrastes, probablemente porque los límites de la caldera magmática se asocian a fallas y esto implica que, además de la contribución que tiene de la cámara (efectos termomagnéticos), tiene el asociado a la tensión (efectos piezomagnéticos) que se ejerce en las zonas de debilidad de la caldera al entrar una cámara magmática en reactivación (estación 1).

El magnetismo asociado a zonas de debilidad en la caldera, presenta la mayoría de las veces variaciones discretas, probablemente porque los valores de intensidad de campo son muy bajos con relación a su medio, esto debido probablemente a que dichas zonas están alteradas y los minerales ferromagnéticos se oxidan cambiando la magnetita a hematita (estaciones B y km 44).

En este estudio se identificaron variaciones vulcano-magnéticas como precursoras a la actividad volcánica, reflejadas a partir de las mediciones del 7 de junio de 1998, en donde la mayoría de las estaciones empezaron a sufrir una disminución en la intensidad de campo magnético (Figura 9); la estación 0 del 7 de junio al 20 de diciembre disminuyó en 66 nT en 6.46 meses (10.2 nT/mes); la estación 1 en este mismo periodo de tiempo disminuyó 80 nT (12.3 nT/mes); la estación B 42 nT (6.5 nT/mes); la estación C 41 nT (6.3 nT/mes); estación IGF 40 nT (6.19 nT) y la estación km 44 13 nT (2 nT/mes).

El 20 de noviembre de 1998 el volcán presentó una actividad visible al fluir lava del cráter hacia el flanco S y SW y continuó con actividad hasta mediados de 1999. Probablemente la disminución de intensidad magnética asociada con las mediciones a partir del 7 de junio de 1998, nos esté indicando una correlación con la intrusión de magma a los conductos del volcán.

## **Agradecimientos**

Se agradece al CONACYT el soporte económico otorgado durante los estudios de doctorado al primer autor. Asimismo se agradece al Cmte. Melchor Ursua, Jefe de Protección Civil del estado de Colima por su apoyo a este estudio. Se agradecen los comentarios de los árbitros de la revista y la asistencia de L. Huerta en la preparación del manuscrito. Apoyo parcial para el estudio ha sido provisto de los proyec-

tos IGF B-106 y DGAPA IN-102897. Los estudios forman parte del “International Cooperation Program on Active Volcanoes”.

## Referencias

- Davis J.C., 1973. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, Inc., 550 pp.
- Davis P.M., Jackson D.B., Field J. and Stacey F.D., 1973. Kilauea volcano, Hawaii: A search for the volcanomagnetic effect. *Science*, 180, 73-74.
- Davis P.M., Pierce D.R., McPherron R.L., Dzurisin D., Murray T., Johnston M.J.S. and Muller R., 1984. A volcanomagnetic observation on Mt. St. Helens, Washington. *Geophys. Res. Lett.* 11, 233-236.
- Dawson E. and Newitt R., 1982. Comparison of IGRF models with North American magnetic data. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 34, 393-400.
- Del Negro C. and Ferrucci F., 2000. Volcanomagnetic effects at Vulcano Island (Aeolian archipelago, Italy). *Geophys J. Int.*, 140, 83-94.
- Dzurisin D., Delinger R.P. and Rosenbaum J.G., 1990. Cooling rate and thermal structure determined from progressive magnetization of the dacite dome at Mount St. Helens, Washington. *J. Geophys. Res.*, 95, 2763-2780.
- Hamano Y., Utada H., Shimomura T., Tanaka Y., Sasai Y., Nakagawa I., Yokoyama Y., Ohno M., Yoshino T., Yukutake S. and Watanabe H., 1990. Geomagnetic variations observed after the 1986 eruption of Izu-Oshima Volcano. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 42, 319-335.
- Hernández E., Cifuentes G., Cabral E., Urrutia J., Chávez R., Correa F., Becerril R. and Ramírez J., 2000. A new permanent geomagnetic station at Colima volcano observatory, Mexico. *Geofis. Int.*, 39, 267-275.
- Johnston M.J.S. and Stacey F.D., 1969. Transient magnetic anomalies accompanying volcanic eruptions in New Zealand. *Nature*, 224, 1289-1291.
- López-Loera H. and Urrutia-Fucugauchi J., 1999. Spatial and temporal magnetic anomalies of Colima volcano, western Mexico. *Geofis. Int.* 39, 3-16.
- López-Loera H., 2002. Estudio de las anomalías magnéticas y su relación con las estructuras geológicas y actividad eruptiva de los complejos volcánicos de Colima e Izta-Popo. Tesis Doctoral. Progr. Posgrado en Ciencias de la Tierra, U.N.A.M. 232 pp.
- Luhr J.F. and Prestegard K.L., 1988. Caldera formation at Volcán Colima, Mexico, by a large Holocene volcanic debris avalanche. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 35, 335-348.
- Luhr J. F. and Carmichael I.S.E., 1990. Geology of Volcan de Colima. *Bol. Inst. Geol. UNAM*, 107, 101 pp.
- Martin Del Pozzo, A.L., Cifuentes-Nava G., Cabral-Cano E., Sánchez-Rubio G., Reyes M., Martínez-Bringas A., García E. and Arango-Galván C., 2002. Volcano-

- magnetic signals during the recent Popocatepetl (Mexico) eruptions and their relation to eruptive activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 113, 415-428.
- Pozzi J.P., Le Möuel J.L., Rossignol J.C. and Zlotnicki J., 1979. Magnetic observations made on La Soufriere volcano (Guadeloupe) during the 1976-1977 crisis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 5, 217-237.
- Rikitake T., 1951. The distribution of magnetic dip in Ooshima (Oo-sima) Island and its change that accompanied the eruption of Volcano Mihara. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 29, 161-181.
- Tanaka Y., 1993. Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 56, 319-338.
- Talwani M. and Heirtzler J.R., 1964. Computation of the magnetic anomalies caused by two dimensional structures of arbitrary shape. In: Computers in Mineral Industries, part I. Stanford University. *Geological Sciences*, 9, 464-480.
- Tanaka Y., 1995. Volcanomagnetic effects on the Unzen volcano (1990-1992). *J. Geomag. Geoelectr.*, 47, 325-336.
- Urrutia J. and Campos J.O., 1993. Geomagnetic secular variation in central México since 1923 A.D. and comparison with 1945-1990 IGRF models. *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, 243-249.
- Zlotnicki J., Moreau M.G. and Viode J.P., 1987. Volcanomagnetic variations related to the seismic crisis that occurred from December through May 1986 on the Montagne Pelée. Martinique (Lesser Antilles). *J. Geomag. Geoelectr.*, 39, 487-500.
- Zlotnicki J. and Le Möuel J.L., 1988. Volcanomagnetic effects observed on Piton de la Fournoise volcano (Reunion Island): 1985-1987. *J. Geophys. Res.*, 93 (B8), 9157-9171.
- Zlotnicki J., Le Möuel J.L., Delmond J.C., Pambrun C. and Delorme H., 1993. Magnetic variations on Piton de la Fournoise volcano. Volcanomagnetic signals associated with the November 6 and 30, 1987, eruptions. *J. Volc. Geotherm. Res.* 56, 281-296.
- Zlotnicki J., Bof M., Perdereau L., Yvetot P., Tjetjep W., Sukhyar R., Purbawinata M.A., and Suharno., 2000. Magnetic monitoring at Merapi volcano, Indonesia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 100, 321-326.