



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS**

**TESIS DE LICENCIATURA
PARA OBTENER EL GRADO DE FÍSICO**

**SEÑALES VULCANOMAGNETICAS ASOCIADAS A LA
ALIMENTACIÓN MAGMÁTICA EN EL POPOCATÉPETL**

**PRESENTA
EDUARDO GONZÁLEZ LÓPEZ**

**DIRECTOR DE TESIS
DRA. ANA LILLIAN MARTIN DEL POZZO**

NOVIEMBRE DE 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno
González
López
Eduardo
56 52 23 18
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
090218415
2. Datos del Tutor
Dra
Ana Lillian
Martin
Del Pozzo
3. Datos del sinodal 1
Dr
Tomás
González
Morán
4. Datos del sinodal 2
Dr
Jaime
Urrutia
Fucugauchi
5. Datos del sinodal 3
Ing.
Gerardo
Cifuentes
Nava
6. Datos del sinodal 4
M en C
Rita
Fonseca
Álvarez
7. Datos del trabajo escrito
Señales vulcanomagnéticas asociadas a la alimentación magmática en el
Popocatépetl
33 p
2006

A mis Padres Ignacia y Julio, por su apoyo, muchas gracias.
A mis hermanos, Gustavo, Patricia y Mercedes por su comprensión y apoyo.
A mis buenos y apreciados amigos, Genecos (Alfonso Flores, Macbeth Rangel, Edgar Vázquez) y Conacultianos (Manlio Tapia, Denisse Morales y Gabriela Carrillo) por sus consejos y ayuda.

In Memorial

Guadalupe Bárcenas, Fís. Ma. de los Ángeles Moguel y
Andrés Rojas.

Agradecimientos

A DGAPA-PAPIIT y al Instituto de Geofísica, UNAM, por su apoyo en la realización de esta tesis.

A CENAPRED, en especial al Ing. Lucio Cárdenas por aportar a la correlación con las mediciones de SO₂.

A Rosalinda Radillo por compartir sus datos de manantiales.

A Fabiola Mendiola por su apoyo en la realización de las tablas de actividad.

Muy sinceramente a la Dra. Ana Lillian Martin Del Pozzo, por la dirección y su apoyo para realizar esta tesis.

A mis sinodales por su valiosa revisión y sugerencias:

Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi.

Dr. Tomas González Morán.

Ing. Gerardo Cifuentes Nava.

M. en C. Rita Fonseca Álvarez.

A GENECSA de C.V. por las facilidades prestadas para el procesamiento de los datos.

Índice

Resumen

Introducción

Objetivo

Justificación

Hipótesis

Antecedentes

Magnetismo

Señales Vulcanomagnéticas

Metodología

Actividad del Popocatepetl

Actividad volcánica de 2006

Registro magnético

Conclusiones

Referencias

Resumen

El análisis de las señales magnéticas, permite estudiar los procesos magmáticos. Esto es de especial importancia en los volcanes activos como el Popocatépetl. Se realizó un análisis durante nueve meses (4 de diciembre de 2005 al 3 de agosto de 2006) de las señales vulcanomagnéticas, registradas en la estación magnética de Chipiquixtle (CHX), ubicada a 3 Km del cráter del Popocatépetl a una altitud de 3900 m.s.n.m. La estación cuenta con un magnetómetro de presesión protónica Geometrics 856, con resolución de 0.1 nT, que registra el campo magnético total cada minuto. Los datos se transmiten por radiomodem al IGF-UNAM, donde se filtraron los caracteres no numéricos, para dejarlos en formato raw o texto plano y posteriormente se procesaron, con el método de diferencias pesadas para obtener un valor medio diario. Los datos magnéticos se correlacionaron con datos de sismicidad y geoquímica. Se identificaron cuatro periodos de anomalías magnéticas negativas en febrero (del 9-13 y 19-21), 15 de abril al 1 mayo y 24-27 de junio de 2006, relacionadas posiblemente a ascenso de magma (alimentación magmática). Las anomalías magnéticas alcanzaron valores de -1.0 a -5.1 nT en este periodo.

Introducción.

El volcán Popocatépetl, es un volcán activo que el 21 de diciembre de 1994 entró en un nuevo ciclo eruptivo. Este volcán se encuentra en el centro del país, en una zona densamente poblada lo que hace necesario monitorear su actividad (Figura 1). El Popocatépetl tiene una historia eruptiva, que incluye grandes erupciones Plinianas con emplazamientos de flujos piroclásticos, lahares e inclusive se ha colapsado en dos ocasiones (Robin y Boudal, 1987). También ha presentado erupciones menores, en las cuales produce caída de ceniza y balísticos como en las erupciones actuales.

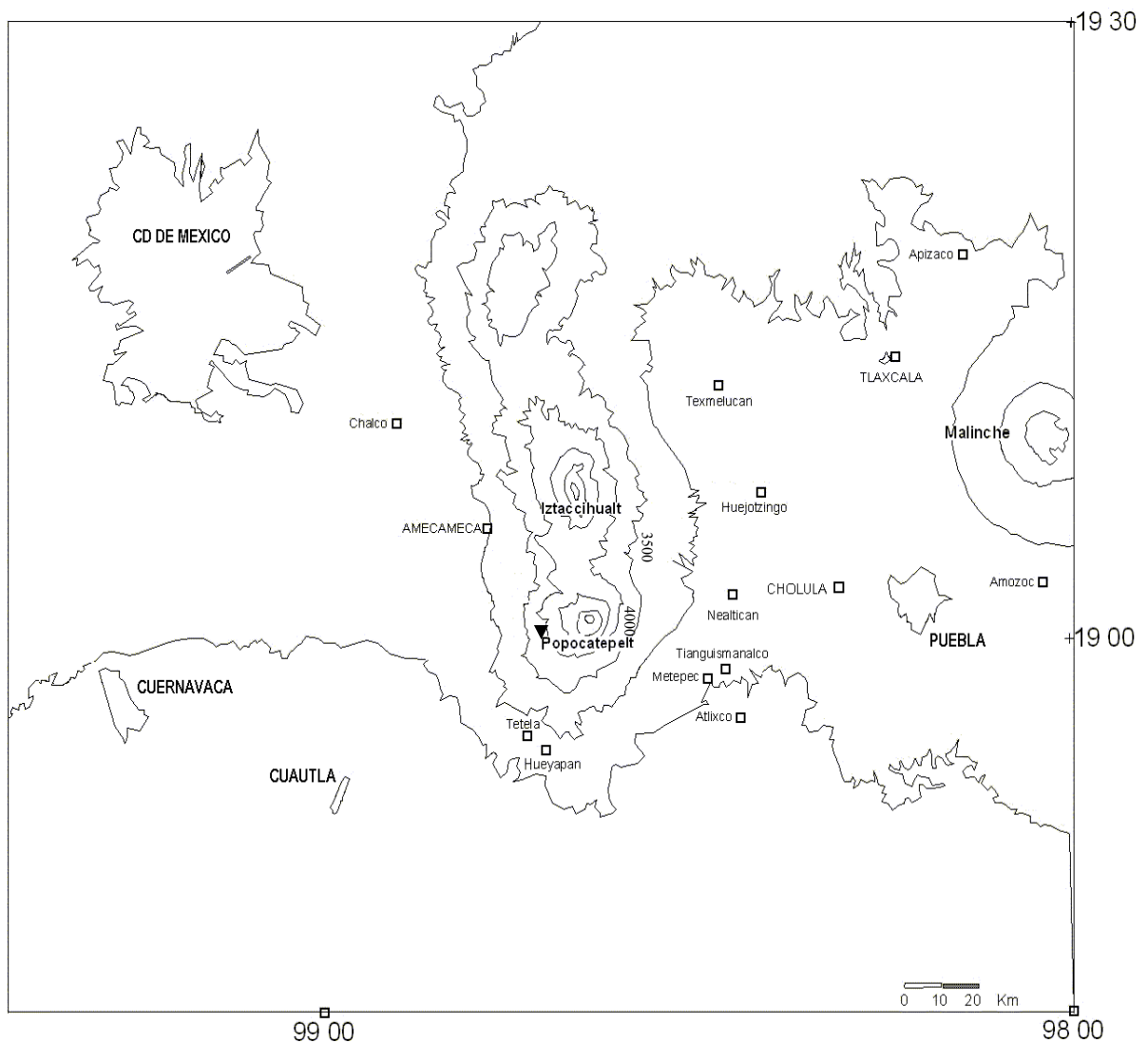


Figura 1. Localización del Popocatépetl y la estación Chipiquixtle (CHX)▼

El comportamiento volcánico puede evaluarse, por medio de estudios geofísicos y geoquímicos. Uno de estos estudios consiste en monitorear la variación en las señales magnéticas y asociarlos a diferentes procesos magmáticos, enfriamiento, deformación y movimiento de fluidos en el volcán.

Se han monitoreado las señales magnéticas del Popocatepetl, desde Diciembre de 1997, cuando se estableció la estación magnética de Tlamacas (TLA), a 5 Km de cráter. Los registros magnéticos, se correlacionan con la actividad volcánica. El 18 de Julio de 2005, se estableció la estación magnética de Chipiquixtle (CHX), a 3 Km del cráter y al SW de la estación TLA. El presente trabajo comprende el periodo del 4 de diciembre de 2005 al 3 de agosto de 2006.

Objetivo

Estudiar el efecto que tiene la actividad magmática sobre el registro magnético del Popocatepetl, para definir periodos de ascenso y enfriamiento de magma, así como procesos relacionados.

Justificación

En las cercanías del Volcán Popocatepetl, existe una alta concentración de población que se encuentra en peligro por estar cerca de un volcán activo. El estudio de la variación de las señales magnéticas, permite evaluar los procesos que ocurren en el volcán. El monitoreo magnético forma parte de la red de monitoreo volcánico y es una manera de obtener datos precisos en tiempo real de la actividad del Popocatepetl.

Hipótesis

La variación en la señal magnética en un volcán, puede estar asociada a fenómenos magmáticos y ser un precursor eruptivo.

Antecedentes

El Popocatépetl (montaña que humea) es un gran estrato volcán activo, de composición andesítica a dacítica (calco – alcalino). Es la segunda elevación de México (5450 m.s.n.m), con un cráter de 900 m en su parte más ancha. Se encuentra localizado aproximadamente a 65 Km al Este de la Cd. de México y a 45 Km al Oeste de la Cd. de Puebla (Martin-Del Pozzo et al, 2002). Dado la actividad que presenta, y la cercanía a dos ciudades altamente pobladas, y alta concentración de población en sus inmediaciones. Las erupciones del Popocatépetl representan un riesgo, y por lo tanto, es necesario monitorear al volcán y entender su comportamiento.

El cono actual, se encuentra sobre los restos de un paleovolcán, Nexpayantla, que se colapsó hace 23,000 años, en un evento tipo Mt. St. Helens. El actual cono fue construido a través erupciones efusivas y explosivas. La última erupción Pliniana del Popocatépetl, ocurrió hace aproximadamente 1200 años (Plunkett y Uruñuela, 1998). Sin embargo, desde antes de la llegada de los españoles, ha tenido pequeñas erupciones cada siglo, como las que se presentan actualmente (Martin-Del Pozzo et al, 2002, 2003).

El 21 de Diciembre de 1994, el volcán Popocatépetl entró en actividad nuevamente con emisiones de ceniza y balísticos. Su actividad se ha caracterizado por el crecimiento, contracción y destrucción de domos, que se forman en el interior del cráter, desde marzo de 1996 a la fecha.

Magnetismo.

El estudio del magnetismo tuvo su origen en la antigüedad, con la observación de ciertos minerales que atraían a pequeños trozos de hierro y también se atraía entre ellos, sin embargo no atraían a metales como el oro o la plata. La palabra “magnetismo” proviene del nombre de la región de Magnesia, Asia Menor (Resnick y Halliday, 1982). Los efectos que se observaron en estos minerales, permitieron que fueran utilizados como brújula, que ayudó al desarrollo de la navegación y la exploración. Salvo esta utilidad, el magnetismo no se comprendía (Reitz y Milford, 1981).

A principios del siglo XIX, Oesterd descubrió que una corriente eléctrica producía un campo magnético. Después, con los trabajos experimentales de Ampere, Faraday, Gauss, Henry y otros, se confirmaron y explicaron las observaciones de Oesterd. El trabajo teórico de Maxwell sintetizó el trabajo de sus antecesores, produciendo las leyes del electromagnetismo, en las cuales se refleja la interrelación entre cargas eléctricas con campos magnéticos y viceversa. (Reitz y Milford, 1981).

En la naturaleza existen tres tipos de minerales magnéticos (diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos), que responden de manera distinta en presencia de un campo magnético. Los minerales diamagnéticos se comportan como “aislantes” magnéticos, es decir, en presencia de un campo magnético adquieren una magnetización, contraria en dirección. En cambio, los paramagnéticos adquieren o aumentan su intensidad magnética, en presencia de un campo magnético. Los materiales ferromagnéticos, son muy susceptibles en presencia de un campo magnético, pero a diferencia de los paramagnéticos, tienen un valor de 10^8 veces mayor, es decir, cuentan con regiones o dominios grandes y adquieren mayor magnetización que los otros tipos

de materiales, pues tienden a orientarse con un campo externo (Tarling, 1983). También existen dos tipos de minerales férricos que se comportan como diamagnetos o paramagnetos (antiferromagnéticos y ferrimagnéticos). Los minerales antiferromagnéticos, tienen un acoplamiento entre los dominios magnéticos y en presencia de un campo magnético, no aumenta ni disminuye su magnetización. Los ferrimagnéticos, tienen dominios magnéticos desacoplados y en presencia de un campo magnético externo, se orientan solo aquellos dominios que se puedan acoplar. Todos estos minerales, sus características disminuyen o se pierden si son calentados (Tarling, 1983).

En 1895, Pierre Curie (1859-1906) descubrió que la magnetización M de un material paramagnético, es directamente proporcional al campo magnético efectivo B aplicado en este material e inversamente proporcional a la temperatura T (Resnick et al, 1982).

$$M = c \frac{B}{T} \quad \dots(1)$$

c es una constante denominada constante de Curie que depende del mineral y tamaño de grano (dominio magnético). Esta relación indica que un mineral ferromagnético, puede disminuir o perder su magnetismo si se aumenta la temperatura, y esta es la llamada temperatura de Curie (Tarling, 1983). La temperatura de Curie de la magnetita (Fe_3O_4), por ejemplo, es 580°C (Tabla 1).

En sustancias antiferromagnéticas, la temperatura en la cual se rompen los acoplamientos de sus dominios magnéticos, se denomina temperatura de Neel (Cox et al, 1986). Cuando un mineral se comienza a enfriar, se forman los granos o dominios

magnéticos y va adquiriendo su magnetización residual. Este momento es llamado temperatura de bloqueo.

La magnetización de las rocas tienen componentes remanente e inducida. La magnetización inducida, afecta un lugar por la alta concentración de minerales ferromagnéticos, distorsionando localmente el campo magnético terrestre.

Tabla 1. Minerales magnéticos ígneos y sus temperaturas de Curie y de Neel

Mineral	T. Curie (°C)	T. Neel (°C)
Magnetita (Fe_3O_4)	580	
Maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)	590-675	
Titanomagnetita ($\text{Fe}_{2.4}\text{Ti}_{0.6}\text{O}_4$)	150	
Hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)		675

La magnetización de las rocas depende principalmente de la intensidad del campo geomagnético actual y de los minerales magnéticos que contiene. El magnetismo residual contribuye a la magnetización total en las rocas y depende de la historia magnética de la roca. Este magnetismo residual, se denomina magnetización natural remanente (NRM), y puede ocurrir por alguno de los siguientes procesos (Telford et al, 1978; Tarling, 1983):

Magnetización termoremanente (TRM). Es el resultado de un proceso de enfriamiento desde el punto de Curie en presencia de un campo magnético externo. La remanencia que es adquirida de esta manera es particularmente estable. En algunos casos esta puede

ser opuesta en dirección al campo que la magnetizó. Este es el principal mecanismo en la magnetización de las rocas ígneas.

Magnetización remanente química (CRM). Esta se adquiere cuando granos magnéticos, aumentan o disminuyen de tamaño como resultado de una acción química, a temperaturas muy por debajo del punto de Curie. Este proceso es particularmente significativo en rocas sedimentarias y metamórficas.

Magnetización detrital (DRM). Ocurre durante el lento acumulamiento de finas partículas de grano, en presencia de un campo magnético externo. Algunas arcillas presentan este tipo de remanencia.

Magnetización remanente isotermal (IRM). Esta remanencia se produce al remover un campo externo, como el producido por el efecto de un rayo en la tierra, dejando una magnetización en pequeñas áreas del suelo.

Magnetización remanente viscosa (VRM). Es producida por la larga exposición a un campo magnético externo, el acumulamiento de esta remanencia comienza como una función logarítmica en el tiempo; la VRM es probablemente la mayor característica de las rocas de fino grano de la corteza. Esta remanencia es bastante estable.

El alto contenido de minerales ferromagnéticos que caracterizan a los basaltos y andesitas, produce una contribución magnética local. Estas anomalías pueden ser atribuidas a un fenómeno de inducción magnética.

El magnetismo inducido, es el resultado de la susceptibilidad natural de las rocas ígneas que distorsionan la tendencia local del campo magnético terrestre. Así mismo, las rocas presentan un magnetismo termoremanente inherente, producido por una orientación preferencial de los minerales magnéticos al momento de enfriarse. Existen efectos piezomagnéticos como resultado de un diferencial de esfuerzos en los componentes ferromagnéticos al deformarse las rocas, produciendo un campo magnético debido a estos esfuerzos (Williams y McBeirney, 1979).

Señales Vulcanomagnéticas

Se han observado variaciones en el campo magnético, asociados a la actividad volcánica y eventos sísmicos. Pueden presentarse en días o incluso semanas antes de un evento eruptivo. La amplitud de esta señal es de algunos nano-Teslas [nT] (Zlotnicki et al, 1993). Las características de la señal vulcanomagnética, dependen del tipo de volcán, de su estructura, su interacción con el campo de esfuerzos inducido por un complejo magmático y de la circulación de agua subterránea.

La señal vulcanomagnética puede ser mayor a +10 nT en el volcán basáltico de Piton de La Fournaise en la isla Reunión (océano Índico). Se presentó una anomalía de +12 nT, 15 días antes de la erupción del 06 de noviembre de 1987. El origen de esta anomalía fue principalmente, electrocinético, por la interacción entre el agua subterránea con un dique debajo del volcán, (Zlotnicki et al, 1993).

La señal vulcanomagnética en la erupción del 27 de Junio de 2000 del volcán Miyakejima en Japón, alcanzó +200 nT .La anomalía se presento 5 horas antes de la erupción. Se relacionó con la intrusión de un dique, conclusión que se apoyó en el monitoreo de la deformación. El cambio en la señal magnética fue principalmente por efectos piezomagnéticos (Ueda, et al, 2006).

En el volcán Unzen, en Japón, la señal cambió alrededor de +20 nT, en cuatro años, antes de la erupción del 12 de febrero de 1991, debidos a la deformación por estrés en el edificio. Después de esta erupción, ocurrieron cambios en la señal magnética hasta por 160 nT, relacionándolos con la formación de domos dacíticos. La tasa de cambio fue de 5 nT por día a mediados de mayo de 1991, y decreció exponencialmente a 0.1

nT, a fin de 1991. Estos cambios fueron por efectos de termomagnetización, electrocinéticos y piezomagnéticos (Tanaka, 1995).

El volcán Merapi, en Indonesia, tiene un ciclo eruptivo con duración de aproximadamente dos años. Los cambios observados en las señales magnéticas, se pueden dividir en tres periodos de tiempo. El periodo largo, es de aproximadamente 6 años que alcanza -15 nT y es debido al proceso termomagnético. La señal se corta, en intervalos bien definidos en el valor anual de la señal, antes del comienzo de un nuevo ciclo eruptivo, como fue el caso de la erupción del 20 de Enero de 1992. El periodo medio (1 a 2 años) que alcanzan 3 nT, está asociado a un proceso piezomagnético. Esta variación se presenta de 3 a 4 meses antes de un evento eruptivo, como ocurrió en Septiembre de 1991 a Enero de 1992, previo a la erupción del día 20 de Enero de 1992. El periodo corto, con una variación menor a 1.5 nT de meses a semanas, y está relacionado con la actividad sísmica, principalmente (Zlotnicki et al, 1998, 2000).

En el volcán Mt. St. Helens, EUA, los cambios en la señal magnética alcanzaron valores mayores a +10 nT, durante las erupciones de Mayo y Junio de 1980 (Johnston et al, 1981). Estuvieron relacionados con el enfriamiento del domo dacítico, aunque se sugiere que el domo estuvo formado por una corteza fría que está magnetizada y un interior caliente desmagnetizado (Dzurisin, 1990).

En el caso del volcán Popocatépetl, las anomalías magnéticas están asociadas principalmente al ascenso en pulsos de magma, aumento en la presión del gas, al crecimiento, enfriamiento y destrucción de domos, actividad sísmica y esfuerzos en el edificio volcánico (Martin-Del Pozzo et al, 2002, 2003). Las señales magnéticas

mayores a 5 nT, pueden ser divididas en cuatro tipos (Martin-Del Pozzo et al, 2002) (figura 2):

1. El primer tipo presenta un de pico muy pronunciado y definido, negativo ó positivo a partir del nivel base, y alcanza valores entre +0.7 a +32.9 nT y de -0.3 a -27 nT. Se sugiere que se trata de una respuesta de origen piezomagnético por el estrés de la corteza terrestre. Esta señal retorna al nivel base.
2. El segundo tipo de anomalía, forma grupos de pequeños cambios crecientes y decrecientes entre +0.5 y +2.5 nT y -0.5 y -6.8 nT, los cuales son de corto tiempo y también regresan al nivel base. Se correlaciona con la actividad sísmica volcánica principalmente.
3. El tercer tipo, forma una pendiente suave y continua, de pequeña amplitud positiva, que se presenta por un periodo de algunas semanas. Esta asociada al enfriamiento de magma recién ascendido. Después regresa al nivel base.
4. El cuarto tipo, forma un escalón a partir del nivel base. Esta relacionada con la cristalización (oxidación) del magma ascendido. Esta forma, define un nuevo nivel base, pues no regresa al nivel anterior.

Los cuatro tipos de anomalías, pueden presentar un complejo patrón de superposición de diferentes procesos en al dinámica del volcán. Para poder distinguirlas, se pueden correlacionar, con observaciones visuales, la geoquímica y actividad sísmica.

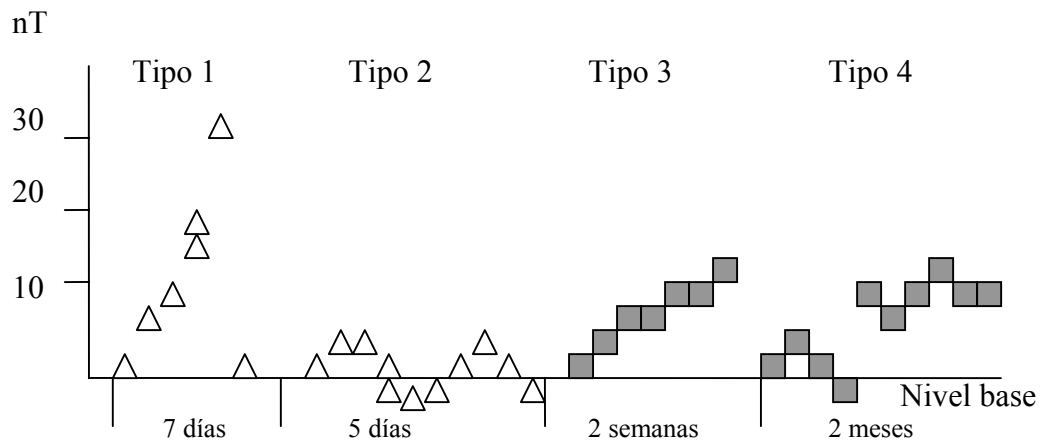


Figura 2. Tipo de anomalías (modificado de Martin Del Pozzo et. al. 2002).

Metodología

La estación magnética Chipiquixtle ($19^{\circ}00'31''.68N$, $98^{\circ}39'23''.76W$), se estableció el 18 de junio de 2005, a 3900 m.s.n.m., y una distancia de 3 Km del cráter. Consiste de un magnetómetro Geometrics G856 de presesión protónica con una resolución de 0.1 nT. Se encuentra en una construcción de 3x2x2 m y cuenta con una fuente de 12 VDC, que es recargada por paneles solares. Se mide el campo magnético total en el volcán en intervalos de un minuto. Los datos son transmitidos vía radiomodem a una computadora del IGF-UNAM, que los recibe en formato de texto plano o raw para su posterior procesamiento. El periodo de análisis y procesamiento de datos, para esta tesis, abarcó del 4 de diciembre de 2005 al día 3 de agosto de 2006.

El procesamiento consistió en depurar los datos no numéricos del registro en CHX, mediante un programa en lenguaje C. Se utilizaron los datos del Observatorio Magnético de Teoloyucan, que están registrados a intervalos de 30 seg y también son archivos de texto plano, por lo que se filtraron y dejaron solo los intervalos de 1 min. Usando el registro magnético de la estación Chipiquixtle (CHX) y la del Observatorio Magnético de Teoloyucan (TEO), como estación de referencia, se paso otro filtro que comparo lecturas en los mismos minutos y quito las que no se encuentran en el rango de 41100.0 nT a 41300.0 nT que es el rango principal de la estación CHX. Con esto, se obtuvo un valor de la media diaria de registro en cada una de las dos estaciones. Posteriormente se calcularon las diferencias pesadas, para eliminar efectos externos (Cifuentes et al, 1998; Martin-Del Pozzo et al, 2002).

El método de las diferencias pesadas consiste en lo siguiente (Rikitake, 1968):

1. El campo magnético en cualquiera de las estaciones está constituido por las siguientes partes: $F = F^C + F^E + F^N \dots(2)$

2. Donde C es el campo magnético terrestre, E es el campo producido por la magnetosfera y la ionosfera y N es la producida por la anomalía local subterránea.

3. Suponiendo que A y B son dos sitios de observación relativamente cercanos entre si, el campo magnético terrestre, en un corto tiempo es el mismo, se puede restar F^C de (2) y además si no existe ninguna anomalía subterránea producida por actividad magmática entre ambos sitios, nos queda que:

$$F_A - F_B = F_A^E - F_B^E \dots(3)$$

4. Si $F_A \neq F_B$, y si A es la estación CHX, entonces la influencia de una fuente externa en los dos sitios de observación satisface la siguiente relación (Rikitake, 1968):

$$\frac{F_A^E}{F_B^E} = \alpha \dots(4)$$

Que es llamado el factor de peso.

5. Por lo que la diferencia pesada del campo magnético en CHX queda como:

$$\Delta F_A = F_A - \alpha F_B \dots(5)$$

Resumiendo, con este método se cancelan los efectos de fuentes magnéticas externas no volcánicas como tormentas magnéticas, tormentas eléctricas y el campo magnético ionosférico. Además del registro magnético, se reviso la actividad del Popocatepetl y se correlaciono con la sismicidad, concentraciones de SO₂ y análisis químico de

manantiales (sobre todo los cambios en pH), con el fin de tener un mejor panorama de los procesos que ocurren en el volcán.

Actividad del Popocatepetl

El 21 diciembre de 1994, previo incremento en la actividad fumarólica y sísmica, el Popocatepetl comenzó a hacer erupción. Su actividad fluctuó hasta mediados de 1995 con pequeñas erupciones, pero descendió hasta el 5 de marzo de 1996, cuando se presentaron nuevas erupciones. En marzo 1996 se formó un domo que se confirmó de manera visual el 27. El 30 abril se registró una explosión y otras el 28 de octubre, 30 de noviembre y 30 de diciembre de 1996 (Martin-Del Pozzo et al, 2002). Desde entonces, se ha detectado el crecimiento de domos y su posterior destrucción por eventos explosivos de pequeña a mediana intensidad.

Un domo se formó en enero de 1997, el cual fue destruido en marzo y otro domo comenzó a formarse en abril que se destruyó en mayo cuando comenzó a crecer de otro, seguido de una fuerte erupción el 30 de junio de 1997 (VEI 2-3) que produjo caída de ceniza en la Ciudad de México. Otros domos se formaron en julio y agosto. Este año se caracterizó por la alta explosividad del volcán. Del 30 noviembre al 11 de diciembre creció otro domo, que se contrajo produciendo una erupción de cenizas el 24 de ese mes. Anomalías magnéticas del tipo 1, ocurrieron del 11-12 (+0.7 nT) y del 12-14 de diciembre (-5.9 nT) que fueron relacionadas con un pico en la sismicidad volcánica total y el crecimiento del domo.

En 1998, continuaron los eventos eruptivos. Con el reconocimiento visual, muestreo de ceniza y gas, se pudieron detectar pulsos de ascenso de magma, crecimiento, enfriamiento de domos y aumento de gas (Martin-Del Pozzo, et al 2002). Algunas anomalías magnéticas se presentaron previas a eventos eruptivos. La erupción del 11 de febrero, fue precedida por una anomalía negativa de -0.5 nT, tres días antes. Los eventos

de marzo (21, 23, 28), abril (21, 27), mayo (5, 10, 12), agosto (14, 16, 24), septiembre (22, 23) y noviembre 19 a diciembre 22, fueron erupciones con presencia de bloques balísticos incandescentes y emisiones de ceniza. Las erupciones con balísticos, continuaron en 1999 (marzo y abril), pero en general la actividad comenzó a disminuir a mediados de este año.

En el año 2000, la actividad de enero a agosto fue baja. En este periodo solo se presentaron algunas erupciones pequeñas de ceniza en enero (12, 22), abril (17), junio (6), julio (2, 6, 7, 18) y agosto (10). Septiembre se caracterizó por pequeñas erupciones de ceniza (1, 4, 11, 23 y 24) y el crecimiento de un domo, que se confirmó el 15 de septiembre. Una anomalía de -0.5 nT precedió al crecimiento de este domo. La actividad fue alta durante octubre, hubo tremores de alta y baja frecuencia, el 16, 28 y 29 de octubre y erupciones de ceniza con bloques incandescentes, y columnas de 2-3 Km de altura sobre el cráter (Martin-Del Pozzo et al 2003).

Anomalías negativas de -1 y -3.3 nT, precedieron al crecimiento de un domo a principios de octubre seguidos por una anomalía de $+2.9$ nT, del tipo 1. Hubo otra anomalía negativa (-2.2 nT) a mediados de octubre causado por el ascenso de un pulso de magma. Una anomalía de -5 nT se presentó en la semana final de octubre, antes del crecimiento de un domo a principios de noviembre. En noviembre continuó el ascenso de la actividad, por lo que el día 3, el comité científico recomendó elevar la alerta en el volcán. Hubo erupciones de cenizas que alcanzaron alturas de 1.5 a 5 Km sobre el cráter (1, 6, 7, 20, 22, 27, 29, 30 de noviembre). Anomalías de $+2.5$ nT fueron producidas posiblemente, por el enfriamiento del magma, que subió en octubre, y por los VT a principios de este mes. Los días 2 y 5 de noviembre, se presentaron anomalías de -0.9

nT, asociados a una nueva inyección de magma. A mediados de noviembre se presentó una anomalía de -2.9 nT, así como el día 29 de noviembre de -1.6 nT. Estas anomalías fueron relacionadas dos pulsos de magma (Martin-Del Pozzo et al 2003).

En diciembre (12-16 de diciembre) el aumento en la actividad sísmica, el crecimiento de un domo (12-19 de diciembre) y el aumento en niveles de SO₂ (50 Kt/d), dispararon la alerta de evacuación ante un posible evento mayor, por lo que se dio la orden de evacuar a los poblados cercanos al volcán. Los días 24 y 30 de diciembre ocurrieron erupciones de ceniza que alcanzaron alturas de 5 Km por arriba del cráter produciendo caída de ceniza en la ciudad de Puebla. Los días 16 y 22 de diciembre se presentaron anomalías -0.5 y -0.6 nT, debidas posiblemente a pequeños pulsos de magma. Una anomalía positiva de 1.8 nT ocurrió a final de diciembre, posiblemente al enfriamiento de los pulsos de magma (Martin-Del Pozzo et al 2003).

El 22 de enero de 2001 se registró una erupción sub-Pliniana cuya columna de alcanzó una altura de 18 Km (VEI 3-4) (Martin-Del Pozzo et al, 2003). Al comienzo y mediados de enero se presentaron anomalías negativas de -0.7 nT y -0.8 nT antes de la erupción del día 22 de enero. Después de estos eventos la actividad disminuyó y se pudieron observar crecimientos de domos en marzo y agosto. El 16 de febrero, se presentó una anomalía de -3.7 nT, relacionado con el ascenso de magma y el crecimiento de un domo en marzo.

El año 2002, en general, fue de actividad baja, pero continuó el crecimiento de domos de febrero a mayo y de septiembre a diciembre, registrándose su posterior destrucción hasta final del año.

El 2003 se caracterizó por tener un aumento en la actividad de enero hasta mediados del año. El 9 de enero terminó de destruirse el domo del 18 de diciembre de 2002, mientras que otro domo comenzó a formarse el día 16 de enero y fue destruido el 14 de febrero. Varias erupciones ocurrieron el 9 enero, 20, 21, 22 y 23 de febrero, 20 y 27 de junio, 1, 2, 15 y 19 de julio, 13 y 28 de agosto. El resto del año la actividad fue menor.

El 2004 en general fue de baja actividad. En 2005, la actividad comienza a aumentar. Episodios de tremor armónico se presentaron de enero a mayo y de agosto a septiembre, relacionadas con las erupciones del 9 y 22 de enero, 13, 14, 21, 29, 30 de julio, 1 de agosto y 21 de septiembre, 1, 4 y 25 de diciembre con alturas entre 2 y 5 Km, ligadas a la destrucción del domo del 11 de noviembre de 2005.

Actividad volcánica de 2006

La actividad del volcán Popocatépetl durante el periodo de 4 del diciembre de 2005 al 3 de agosto de 2006 se resume a continuación (Tabla 2):

Diciembre 2005. La actividad en este mes fue alta, se presentaron episodios de tremor de alta frecuencia (TAF) y erupciones los días 4, 13 y 18 y 25. La altura de las columnas varió entre 2.5 y 3.0 Km, sin embargo, las concentraciones de SO₂ fueron bajas para el Popocatépetl (1600 T/d y 2100 T/d). Se presentaron sismos vulcanotectónicos (VT) con magnitudes de 1.9 a 2.4, los días 6, 7 y 8. El número de emisiones alcanzó 87 el día 12.

Enero 2006. La actividad en este mes continuó alta. Se registraron episodios de tremor armónico (TA) (2, 6 y 15 de enero) y tremor de baja amplitud (15, 25, 26, 31 de enero), asociados a erupciones el 19 y 25; esta última alcanzó una altura de 3 Km sobre el cráter. La concentración de SO₂ subió el 6 de enero (3700 T/d) y después bajo el 24 de enero (2400 T/d). El 4, 17 y 23 de enero, ocurrieron VT de magnitudes entre 1.9 y 2.4. Las emisiones fueron en general menores a 30, sin embargo, llegaron a 48.

Febrero 2006. Se registraron episodios de tremor de alta frecuencia (TAF) el 3, 7 de febrero. Una erupción de 1 Km de altura se registró el día 3 de febrero. Se presentaron VTs con magnitudes entre 2.2 y 2.5, los días 7, 8 y 24 de febrero y las concentraciones de SO₂ fueron medias (3500 T/d y 3000 T/d). El día 10 de febrero se confirmó visualmente el crecimiento de un domo que posiblemente comenzó a formarse a principios de este mes. Los días 2, 5 y 23 hubo 30, 29 y 32 emisiones respectivamente. En general, la actividad continuó alta como en los meses anteriores.

Marzo 2006. Se presentaron episodios de TA el 22 de marzo, y de TAF los días 6, 23, 24 y 26 de marzo así como una erupción de 1 Km de altura el día 22. Hubo VTs con magnitudes entre 1.8 y 2.2, los días 3, 20, 21 y 22. La concentración de SO₂ subió (2500 T/d y 5000 T/d) y el pH del manantial bajo (6.29).

Abril 2006. Hubo episodios de TA y TAF el 3 y 21 de abril. No se presentaron erupciones pero hubo VTs los días 3, 5, 6, 7, 12, 18 y 27 con magnitudes entre 1.9 y 2.8. Aunque la concentración de SO₂ fue de 5100 T/d bajo a 2400 T/d y el pH continuó bajando (6.17).

Mayo 2006. La actividad en este mes aumento. Se presentaron episodios de TA y TAF los días 2, 5, 6, 8, 23 y 29 de mayo. El 23 mayo ocurrió una erupción con una columna de 2 Km de altura sobre el cráter y se registraron VTs con magnitudes entre 2.0 y 2.4 los días 25, 29, 30 y 31 de mayo. Las concentraciones de SO₂ (5400 T/d y 6200 T/d) y el número de emisiones (61) aumento.

Junio 2006. La actividad en junio disminuyo respecto a mayo. Se presentaron episodios de TAF el días 12, 14 y 16 de junio y no hubo erupciones. Se registraron VTs con magnitudes de 2.2 y 3.0 los días 2 y 8, la concentración de SO₂ bajo (3400 T/d) y el pH bajo a 5.97 y subió a 6.21. Al parecer las concentraciones de SO₂, los episodios de tremor armónico al final de mayo y el descenso del pH a principios de junio, pueden estar asociados al ascenso de magma y la posible formación de un domo.

Julio 2006. Se presentaron episodios de TA y TAF el 16, 22, 23 y 25 el de julio. Se registró una erupción de 5.0 Km por encima del cráter, el día 25 de julio, que destruyó

parcialmente el domo de junio. Se presentaron VTs de magnitudes entre 2.2 a 2.7 los días 1, 4, 6, 17, 18, 24, 25, y 31 de julio. La concentración de SO₂ el día 3 julio fue de 2200 T/d. El número de emisiones aumentó a 44 en julio.

Registro magnético

Los resultados del procesamiento de los datos magnéticos de la estación CHX se correlacionaron con la actividad volcánica y con los parámetros sísmicos, número de emisiones y químicos (niveles de SO₂ y pH) para evaluar el comportamiento del volcán. (Figura 3 y Tabla 3).

Diciembre 2005. En diciembre de 2005, ocurrieron tres anomalías negativas. La primera el día 4 de diciembre (anomalía 1, fig. 3) con una amplitud de -1 nT duro 5 días, posiblemente su origen sea termomagnético. La segunda anomalía comenzó el día 10 de diciembre (anomalía 2, fig. 3) y descendió -0.8 nT en cinco días, precursor (3 días) a la erupción del día 13. Hay un pico en el número de emisiones en esta misma fecha. Esto podrá asociarse a un pequeño pulso de magma, produciendo movimiento de material. La tercera anomalía ocurrió el día 21 de diciembre (anomalía 4, fig. 3), con una amplitud de -1.4 nT. La anomalía se presento al mismo tiempo que un elevado número de emisiones y cuatro días antes de la erupción del día 25. Además, el aumento en la concentración de SO₂ (de 1600 T/d a 2100 T/d) podría indicar un aumento en la presión por gas. Se presento también una anomalía positiva el 14 de diciembre (anomalía 3, fig.3) de 3.4 nT que duro 8 días. Puede asociarse esta anomalía a efectos piezomagnéticos, posiblemente al alto número de emisiones.

Enero 2006. Dos anomalías negativas se presentaron en enero de 2006. La primera de -1.6 nT ocurrió el 6 de enero (anomalía 5, fig. 3) y duró tres días. El aumento de los niveles del SO₂ (de 2100 T/d a 3700 T/d) y el registro de TA, se puede asociar ala alimentación de un pulso de magma. La segunda anomalía negativa comenzó el 13 de enero de -3.6 nT y duró 5 días (anomalía 6, fig. 3). La anomalía coincidió con un TA y

precursora, por 6 días, a la erupción el día 19 de enero. Esta anomalía posiblemente puede asociarse a un pulso de magma, por la cantidad de TA que se presentaron en este mes.

Febrero 2006. En el mes de febrero hubo anomalías positivas y negativas, de formas muy pronunciadas. La primera se registro a partir del 1 de febrero (anomalía 7, fig. 3) y duró nueve días, de +3.7 nT. La presencia de VT, indica que la anomalía puede ser origen piezomagnético. El día 10 se confirmo visualmente la presencia de un domo en el cráter. A partir del día 09 (anomalía 8, fig. 3) hubo una anomalía negativa de -5.1 nT. El aumento en los niveles de SO₂ (de 2100 T/d a 3500 T/d) y la disminución de pH (de 6.34 a 6.33) indican que podrían asociarse que hubo un pulso ascendente de magma. Esta anomalía es del tipo 1 y posiblemente de origen termomagnético. El día 13 de febrero (anomalía 9, fig. 3) hubo nuevamente una anomalía positiva de 4.8 nT. Esta anomalía posiblemente sea por efecto piezomagnético. El día 18 de febrero (anomalía 10, fig. 3) se presenta nuevamente una anomalía magnética negativa de -4.1 nT. Esta anomalía fue asociada a la inyección de magma. Es probable que el domo estuviera creciendo. Hubo pocas emisiones hasta el día 23 que aumentaron. El día 23 se presentó una anomalía del tipo 2 (anomalía 11, fig. 3) de 2.2 nT que duró tres días, posiblemente de origen piezomagnético.

Marzo 2006. El 1 de marzo, se presentó una anomalía negativa con una amplitud de -2.2 nT (anomalía 12, fig. 3) que duró 9 días. Sin embargo, el 17 de marzo (anomalía 13, fig. 3) comenzó una anomalía positiva de 4.7 nT posiblemente de origen termomagnético. Del 23 a final de mes se observo una tendencia en la señal a crecer con una pendiente suave (anomalía 14, fig. 3). Por la baja cantidad de emisiones, pocos TAF

y la disminución del SO₂, esta anomalía puede asociarse al enfriamiento en el material ascendido en febrero. Los picos positivos en la señal podrían estar relacionados a efectos piezomagnéticos.

Abril 2006. En abril, continuó la tendencia de la señal a crecer con la misma pendiente suave hasta el 15 de abril (anomalía 14, fig. 3). El valor total de estas anomalías fue de 1.5 nT por 25 días. Esta es la característica de una anomalía del tipo 3. Además el descenso del pH de 6.29 a 6.17 y el aumento en los niveles de SO₂ de 2500 T/d a 5000 T/d, se pueden correlacionar con el ascenso de magma. Un TA es posible que explique los picos negativos de la señal y posiblemente un pequeño ascenso de magma. El 15 de abril hubo un descenso abrupto (anomalía 15, fig. 3) de -5.9 nT en la señal que duro 12 días, posiblemente asociado a un ascenso de nuevo material y previo a episodios de TA en mayo.

Mayo 2006. El 8 de mayo hubo un descenso -3 nT (anomalía 16, fig. 3) en la señal magnética por 7 días. La ocurrencia de episodios TA, el aumento de los niveles de SO₂ de 2400 T/d a 5400 T/d, puede estar relacionados a un ascenso de magma. El 20 de mayo se presentó otra anomalía negativa (anomalía 18, fig. 3) de -3.6 nT por 5 días. Es precursora por 3 días a la erupción del día 23 de mayo, que probablemente destruyó parte del domo de febrero-marzo. Los eventos de TA, se asocian a la construcción de un nuevo domo después del 23 de mayo. Se observa el mismo comportamiento que al inicio del mes de febrero, pues se presenta una anomalía positiva +3.6 nT (anomalía 17, fig. 3) del día 16 por 4 días, posiblemente por efectos piezomagnéticos. El 26 se presentó una anomalía positiva (anomalía 19, fig. 3) de +2 nT por 4 días. Se puede relacionar con la presencia de VTs, por lo que se considera de origen piezomagnético.

Hay una anomalía negativa (anomalía 20, fig. 3) de -1.6 nT que precede por 1 día de un TA. Hay una cierta tendencia a aumentar en forma creciente como en marzo-abril. La presencia de VTs, la disminución en el número de emisiones y la disminución de 6200 T/d a 3400 T/d en los niveles de SO₂, el aumento en el pH de 6.17 a 6.4 pueden indicar la obstrucción parcial del conducto por un domo.

Junio 2006. En junio se presentó una tendencia creciente en la señal a partir del 2 de junio (anomalía 21, fig. 3) con un valor de 2.7 nT, posiblemente relacionado al enfriamiento del material ascendido.

Julio 2006. El 11 de julio se presentó una anomalía negativa (anomalía 22, fig. 3) de -0.2 nT, 5 días antes a un evento de TA del día 16. Hubo nuevamente un descenso el 24 (anomalía 23, fig. 3) de -2.4 nT, este último coincidiendo un día antes de la erupción del día 25. A partir del 28 al 29 hay un aumento en la señal magnética de 2 nT y nuevamente decae del 29 julio al 3 de agosto cuatro días antes del TA del 3 de agosto, que pueden indicar el crecimiento de un nuevo domo.

El 3 de agosto de 2006 se registraron episodios de TA, con una duración total 12 horas. Por esta razón se elevó, el estado del semáforo volcánico de fase 1 a fase 2 y se relacionó al crecimiento de un nuevo domo.

En resumen, de acuerdo a la figura 3, un aumento del SO₂, episodios de TA, descenso en el pH, como ocurrió en los meses de enero, marzo, fin de mayo, junio y fin de julio inicio de agosto, puede estar relacionado al ascenso de pulsos de magma.

Conclusiones

El análisis de eventos en este periodo (4 de diciembre de 2005 a 3 de agosto de 2006), indica que se presentaron anomalías el tipo 1 y 2, principalmente, relacionadas con efectos termomagnéticos y piezomagnéticos. Se observa una correlación entre la actividad volcánica, el registro manético y la geoquímica. Un descenso pronunciado en la señal magnética, presencia de TA, con aumento en los niveles de SO₂ y disminución del pH, se interpreta como un ascenso de magma.

Los patrones en la actividad volcánica, química y señal magnética, parecen indicar la formación por lo menos de 3 domos, en febrero-marzo, otro probablemente en mayo-junio y otro en julio-agosto. Estos últimos no se pudieron confirmar por carecer de observaciones visuales en ese momento. Sin embargo, se tomó una foto que confirmó el domo el 16 de agosto de 2006.

La disminución en la señal magnética, se relacionó con pulsos ascendentes (alimentación) de magma en el volcán, en enero, marzo, finales de mayo y finales de julio, que se relacionaron en la formación de tres domos en el cráter. Las anomalías más grandes ocurrieron en febrero (-5.1 nT). Esta disminución se presentó, hasta por cinco días, antes del tremor armónico. Cuatro periodos de alimentación se observaron en enero, finales de marzo, finales de mayo y finales de julio.

También, se observaron dos periodos en los cuales se incrementó la señal magnética de manera continua y constante por 25 días, con pendiente más suave. Este comportamiento podría indicar el enfriamiento del material ascendido. El material comienza a adquirir su propio magnetismo, incrementando lentamente la forma de la señal magnética. Este proceso se observó a finales de marzo a principio de abril, y a comienzos de junio.

Los huecos en los datos fueron debidos a problemas con la fuente de poder en la estación CHX y por el mantenimiento de los equipos en la estación TEO. El establecimiento de una red de magnetómetros, en un futuro próximo, podría ser de gran utilidad en el monitoreo de la actividad volcánica y precisar el registro de la señal vulcanomagnética.

Referencias

Cifuentes Nava, G., Hernández Quintero, E., Cabral Quintero, E., Correo Mora, F., Chávez Segura, R.E., Urrutia Fucugauchi, J., Martin-Del Pozzo A. L., 1998. Arango Galván, C. Simultaneous Magnetic Observations al Teoloyucan Magnetic Observatory and Popocatépetl Volcano, Mexico. *Rev. Geofís.* 48, 149-159.

Cox, Allan, Hart, Robert B. 1986. Plate tectonics. How it works. Blackwell Scientific Publications, MA, USA. 268-271 p.p.

Dzurisin, D. 1990. Cooling rate and termal structure determined from progressive magnetization of the dacite dome at Mount St. Helens, Washington. *J. Geophys. R.* 95, 2763-2780.

Johnston, M. J. S, Muller, R. J. and Dvorak J. 1981. Volcanomagnetic observations during eruptions, May-August 1980. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper. 1250, 1289-1290.

Martin-Del Pozzo, A.L., Cifuentes Nava, G., Cabral Cano, E., Sánchez Rubio, G., Reyes, M., Martínez Gringas, A., García, E., Arango Galvan, C., 2002. Vulcanomagnetic signals during the recent Popocatépetl (México) eruptions and their relation to eruptive activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 113, 415-428.

Martin-Del Pozzo, A.L., Cifuentes, G., Cabral Cano, E., Bonifaz, R., Correa, F., Mendiola, I. F., 2003. Timing magma ascent al Popocatépetl Volcano, México, 2000-2001. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 125, 107-120.

Plunkett, P., Uruñuela, G., 1998. Preclassic household patterns preserved under volcanic ash at Tetimpa, Puebla, México. *Lat. Am. Antiq.* 94, 287-390.

Reitz, John R., Milford, Frederick J. 1981. Fundamentos de la teoría electromagnética. UTHEA, México. 159 p.p.

Resnick, R., Halliday, D. 1982. Física, Vol. 2. CECOSA, México. 274-286 p.p.

- Rikitake, T., 1968. Geomagnetism and earthquake prediction. *Tectonophysics* 6, 59-68.
- Robin, C., Boudal, C., 1987. A gigantic Bezymainny-type event at the beginning of the modern volcano Popocatepetl. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 31, 115-130.
- Tanaka, Y. 1995. Vulcanomagnetics effects on the Unzen Volcano (1990-1992). *J. Geomag, Geoelectr.*, 47, 325-336.
- Tarling, D. H. 1983. *Paleomagnetism. Principles and applications in geology, geophysics and archaeology.* Chapman and Hall. New York, USA. 15-49 p.p.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A., 1978. *Applied Geophysics.* Cambridge University Press. New York, USA. 105-136 p.p.
- Ueda, H, Matsumoto, T. Fujita, E. Ukawua, M. Yamamoto, E. Sacia, Y, Irwan M., Kimata, F., 2006. Geomagnetism changes associated with the dike intrusion during the 2000 Miyakejima eruptive activity, Japan. *Earth Planet. Scie. L.* 245, 416-426.
- Williams, H., McBirney, A. R., 1979. *Vulcanology.* Freeman Cooper & Co., San Francisco, Ca, USA. 1, 65-66 p.p..
- Zlotnicki, J., Le Mouél, J. L., Delmond, J. C., Pambrun, C., Delorme, H., 1993. Magnetic variations on Piton de la Fournaise volcano. Vulcanomagnetic signals associated with the November 6 and 30, 1987, eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 56, 281-296.
- Zlotnicki, J., Bof, M., 1998. Vulcanomagnetic signal associated with the quasi-continuous activity of the andesitic Merapi volcano, Indonesia: 1990-1995. *Phys. Earth Planet. Inter.* 105, 119-130.
- Zlotnicki, J., Bof, M., Perdereau, P., Yvetot, P., Tjetjep, W., Sukhyar, R., Purbawinata, M. A., Suharno., 2000. Magnetic monitoring at Merapi volcano, Indonesia. *J. Volcanol. Geotherm. R.* 100, 321-336.