

# APARENTE INFLUENCIA DE LA MAREA TERRESTRE EN LA ACTIVIDAD HIDROTHERMAL DEL VOLCÁN MISTI OBSERVADA EN DATOS DE TEMPERATURA

Macedo Orlando<sup>(1)</sup>, Masías Pablo<sup>(2)</sup>, Palacios David<sup>(3)</sup>, Machacca Roger<sup>(1)</sup>, Centeno Riky<sup>(1)</sup>, Úbeda Jose<sup>(3)</sup>, Arenas Ronald<sup>(4)</sup>

(1) Instituto Geofísico del Perú, Sede Regional IGP-Arequipa, orlando.macedo@igp.gob.pe

(2) Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, OD -Arequipa

(3) Dept. AGR y Geografía Física. Universidad Complutense, Madrid, España

(4) Proyecto Especial Majes Siguan (PEMS), Gobierno Regional de Arequipa

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los resultados preliminares del monitoreo de temperatura del suelo a 30 cm de profundidad en el cráter del volcán Misti en el periodo 2004-2011. La posible contribución de las mareas terrestres en el disparo de erupciones volcánicas ha sido observada en ambientes de volcanismo basáltico (Dzurisin, 1980; Van Manen et al., 2010; Sottili & Palladino, 2012), pero no se han reportado tal tipo de fenómeno en volcanes de arco. El volcán Misti es un volcán andesítico activo que no está en erupción pero que presenta, por ciertos lapsos de tiempo, una actividad fumarólica intensa al nivel de su cráter interno y en sus inmediaciones. El objetivo del presente trabajo es mostrar que en el volcán Misti se han observado variaciones de tipo periódico de la temperatura del suelo, y que dichas variaciones podrían tener asociación con las mareas terrestres. Los datos de temperatura provienen de la cúspide del volcán, a inmediaciones de la zona de fumarolas del cráter; los datos de la marea terrestre provienen de cálculos teóricos válidos para la zona donde se ubica el volcán.

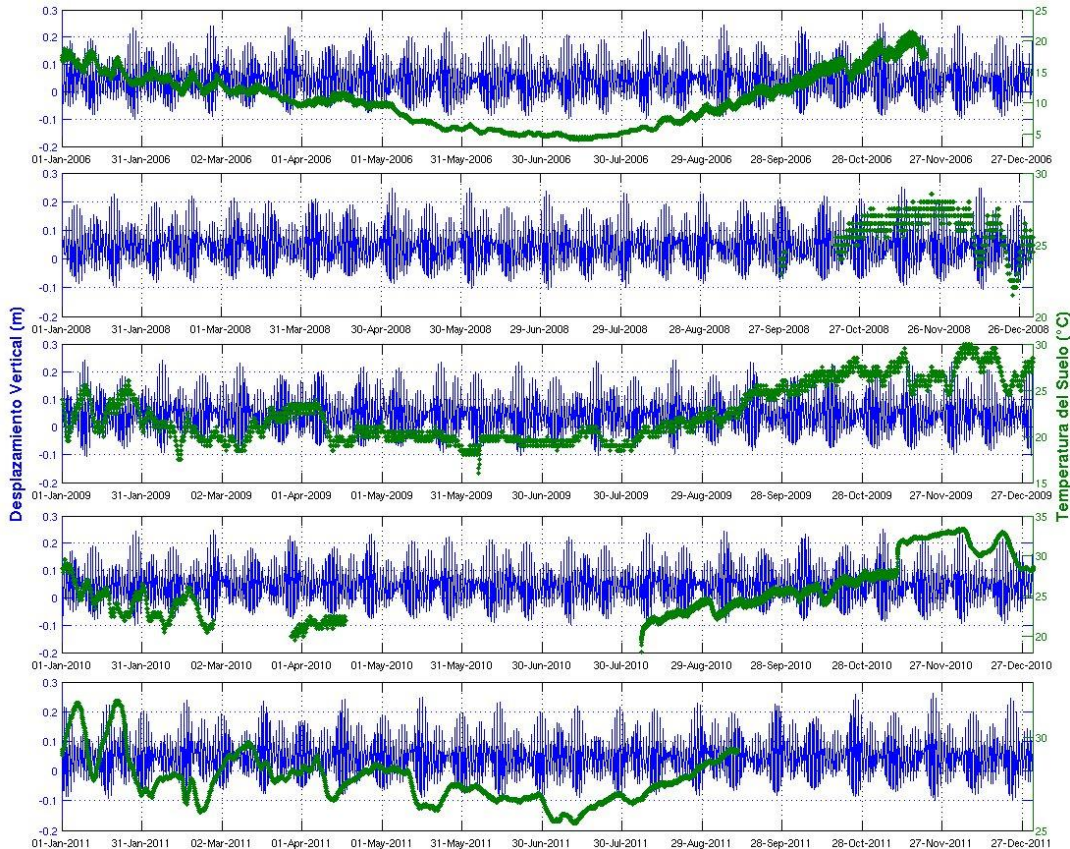


**Figura 1.** Mapa de ubicación del sitio MST-F1, en el borde norte del cráter interno del volcán Misti. El sensor de temperatura ha sido enterrado en el suelo a 30 cm de profundidad. En el recuadro de la izquierda se observa la ubicación del volcán Misti dentro de la Zona Volcánica Central (CVZ) de América del Sur.

## DATOS

Entre el 2004 y el 2008, la Universidad Complutense de Madrid (UCM) en colaboración con el Instituto Geofísico del Perú (IGP) instaló varios sensores digitales de temperatura (data-loggers) a diversas alturas sobre el cono del volcán Misti, siendo uno de los sitios escogidos el denominado MST-F1 (16.297° S, 71.405° O, 5745 msnm), localizado en el borde norte del cráter interno del volcán, en zona de fumarolas (Fig. 1). En este sitio, el sensor fue instalado bajo el suelo, a 30 cm de profundidad. Posteriormente, entre 2008-2011, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ha continuado con el monitoreo de la temperatura en el sitio MST-F1. Los sensores funcionaron bien en la mayor parte del tiempo, pero hubo periodos de interrupción del registro debido

a fallas diversas. Los datos para el presente trabajo provienen del site MST-F1 registrados durante las campañas de monitoreo del periodo 12 Agosto del 2004 al 07 Noviembre 2005, del 23 Noviembre del 2006 al 17 Abril 2010, y del 06 Agosto 2010 hasta 11 Septiembre 2011. Los data-loggers empleados en las tres campañas tuvieron características diferentes, en la primera campaña la precisión y el paso de las mediciones fueron de  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$  y de 90 min, respectivamente; en la segunda campaña fueron de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  y de 30 min respectivamente; y en la tercera campaña fueron de  $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$  y 15 min, respectivamente. Para efecto del análisis, tales características no han tenido mayor incidencia. Los datos utilizados suman un número total de 84467 mediciones de temperatura.

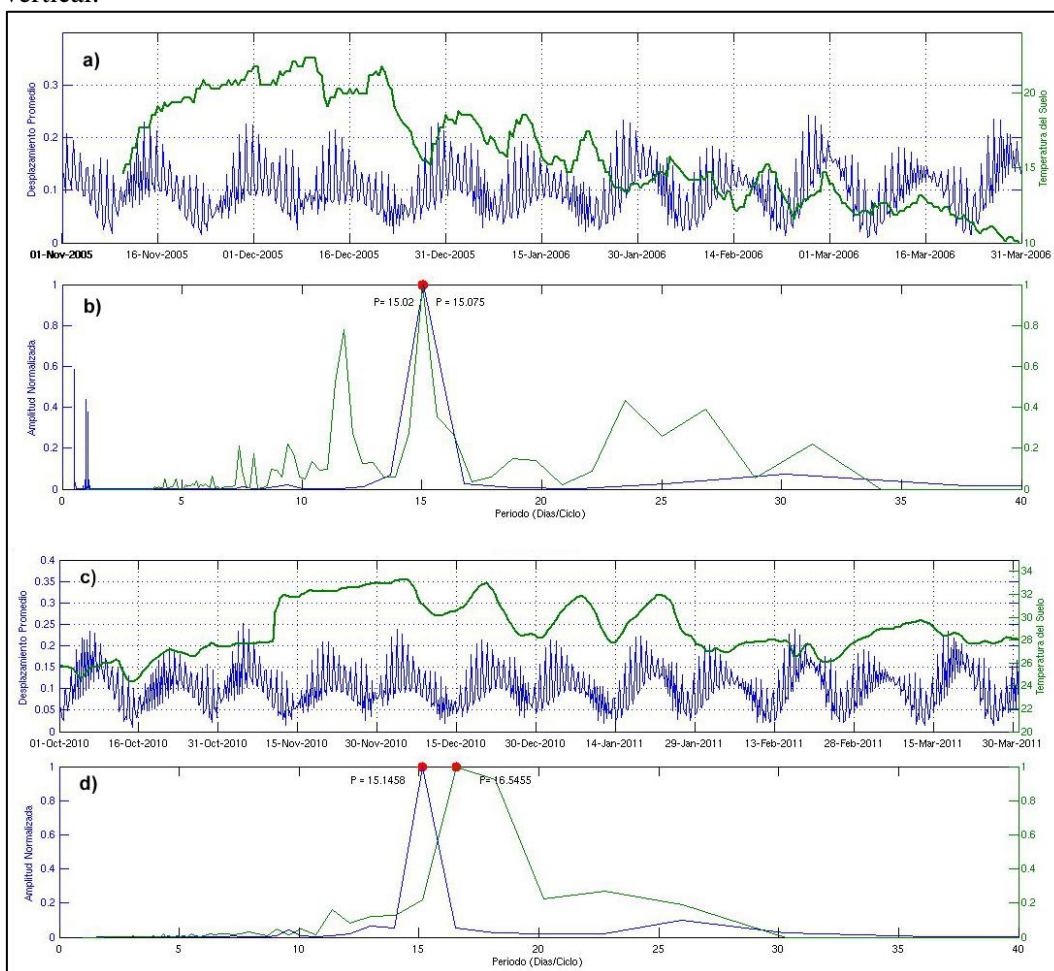


**Figura 2.** - Valores de Temperaturas registradas en MST-F1 (símbolos de color verde), y valores de Desplazamiento vertical teórico por marea terrestre (símbolos de color azul). Período: años 2005-2006 y 2008-2011

Al observar el gráfico de la serie temporal de temperatura (Fig. 2), resalta la periodicidad de la señal en la época de fin de año y comienzos del siguiente. No se ha identificado la causa para tal cambio en las temperaturas en el sitio MST-F1 en los meses de noviembre-febrero. Sin embargo, el periodo de tiempo del orden de 14-15 días lleva a pensar que quizás estos cambios en la temperatura estén relacionados con las mareas terrestres donde una de sus principales componentes, la “fortnightly tide” o marea quincenal, presenta periodos de 13,7 días. Se ha procedido, entonces, a obtener datos asociados al efecto de marea; no habiendo datos de mediciones de gravedad en continuo tomados en el área de estudio, se ha recurrido a datos teóricos del desplazamiento vertical por marea terrestre. Los datos de la marea terrestre provienen de cálculos teóricos obtenidos mediante el software “Solid” desarrollado por Dennis McCarthy del Center for Operational Oceanographic Products and Services, U.S. Naval Observatory (McCarthy & Petit, 2003); dichos datos corresponden al desplazamiento vertical de las mareas para una tierra sólida, para la región del volcán Misti ( $16^{\circ}\text{S}$ ,  $71^{\circ}\text{O}$ ) con un paso de muestreo de 1 minuto, y han sido obtenidos para los mismos periodos en que la temperatura fue registrada en el volcán Misti. La figura 2 muestra las temperaturas en MST-F1 y el desplazamiento vertical originado por la marea terrestre en las coordenadas del volcán Misti; se observa que, a priori, el grado de correlación temporal puede ser: a) muy baja o nula en la época de marzo-octubre, b) buena o notable en la época de noviembre-febrero.

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los datos de noviembre-febrero han sido analizados en mayor detalle con el fin de determinar la periodicidad de la señal “desplazamiento vertical” y la señal “temperatura”. Para este fin, en el primer caso se ha hallado el valor de las amplitudes absolutas del desplazamiento vertical, lo que está en relación a la energía asociada a esta señal (curva azul en el ejemplo de la figura 3a y 3c). Para el segundo caso, las temperaturas registradas, con valores entre los 15° y 33°C, son altas en comparación con las temperaturas reinantes en superficie, que pueden ser inferiores a 10° bajo cero; por tanto, a fin de eliminar cualquier eventual aporte frío del exterior, se ha tomado la temperatura máxima registrada cada lapso de 12 horas (curva verde en la figura 3a y 3c). De esta manera se está seguro de tomar solo el aporte de calor del interior del volcán. A cada una de las dos señales así obtenidas, se les ha hallado su periodo (días/ciclo) mediante la aplicación de transformada de Fourier discreta. Los resultados se muestran en la figura 3b y 3c. Se observa que para el caso del desplazamiento vertical el periodo más notable esta en los 15.1 días; en el caso de las temperaturas, aunque se observan valores más dispersos, que varían de 15.0 días/ciclo para el periodo noviembre2005-febrero2006, 12.6 días/ciclo para noviembre2008-febrero2009, 16.5 días/ciclo para noviembre2009-febrero2010, y 16.5 días/ciclo para noviembre2008-febrero2009, todos están muy próximos al valor 15.1 días/ciclo del desplazamiento vertical.

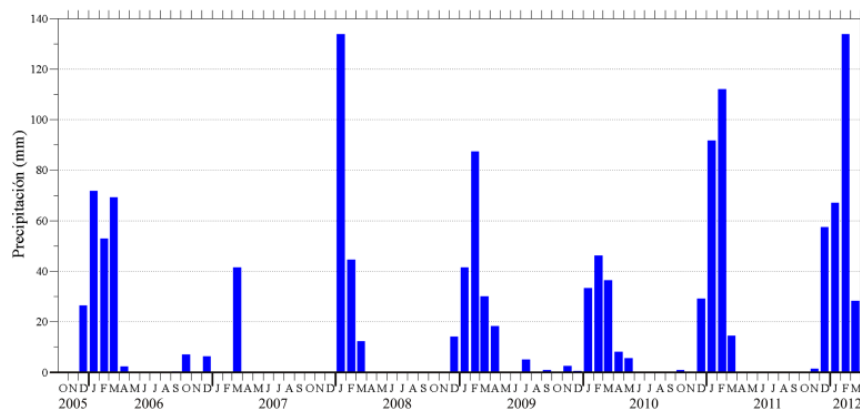


**Figura 3.** - Ejemplo de datos para los periodos noviembre2005-febrero2006 y noviembre2010-febrero2011 de valores de:

(a) y (c): Temperaturas máximas cada 12 horas registradas en MST-F1 (símbolos verdes), y de Amplitudes absolutas del desplazamiento vertical teórico por marea terrestre (símbolos azules).

(b) y (d): Periodo (Días/ciclo) correspondiente a las curvas 3a y 3c (mismos símbolos). Los valores máximos son muy parecidos: 15.1 para el caso de los desplazamientos verticales en ambos periodos de observación, y 15.0-16.5 para el caso de las temperaturas.





**Figura 4.** - Valores de precipitación pluvial registrados en la Represa de Aguada Blanca (8.5 km al NE del cráter) operado por el Proyecto Especial Majes Siguan (PEMS). La época anual de lluvias es muy marcada, y corresponde principalmente a los meses de Diciembre a Marzo.

## INTERPRETACIÓN

No se conoce con precisión la actual ubicación y amplitud del reservorio o cámara magmática del volcán Misti, pero hay recientes estudios que señalan que se encontraría entre 6 y 15 km de profundidad (Ruprecht & Worner, 2007; Cacya & Mamani, 2009; Rivera, 2010). En los volcanes activos los reservorios constituyen la principal fuente de calor geotérmico y están al origen de sistemas hidrotermales que pueden abarcar áreas amplias. En el volcán Misti, la zona hidrotermal tiene hasta 6 km de diámetro, está ubicada en la parte central del cono (Ramos, 2000; Finizola et al., 2004), y presenta manifestaciones fumarólicas en la zona de cumbres. La actividad fumarólica es moderada, aunque en algunos días de ciertas épocas del año se observan fuertes emisiones (Ramos, 2000; Macedo & Centeno, 2010; Masías et al., 2011; Centeno, 2012). En las inmediaciones del cráter interno actual se han medido temperaturas de 220°C a 430°C (Macedo, 2001; Cruz et al., 2004).

Las temperaturas registradas en el sitio MST-F1 están relacionadas con el contacto con flujos de vapor de agua y gases magmáticos en el momento de la medición. Como en todo sistema hidrotermal esos fluidos ascienden desde niveles profundos hasta la superficie por medio de células convectivas. Por esa razón cualquier cambio en el nivel del reservorio magmático debe reflejarse en un cambio en el nivel de la actividad fumarólica en superficie.

Los resultados de este estudio son coherentes con esa hipótesis, porque durante los meses de noviembre-febrero se observa una buena correlación entre la temperatura y el desplazamiento vertical por marea terrestre (Fig. 3).

Un eventual cambio en la presión de la cámara magmática podría producir un desplazamiento de los fluidos de la zona y trasladar sus efectos hasta la superficie, por ejemplo a través de un cambio de la temperatura en el nivel de las fumarolas. Algunos autores han sugerido que las variaciones de presión debidas a las mareas terrestres pueden desencadenar movimientos de magma relativamente superficial (Dzurisin, 1980; van Manen, 2010), como en el nivel de la cámara magmática.

Falta investigar por qué se observa una señal mucho más clara en el periodo noviembre-febrero. Como ese fenómeno sucede en la zona hidrotermal y su amplitud está relacionada con la recarga del reservorio durante la estación de las precipitaciones, se han analizado los registros pluviales de la zona. La figura 4 representa los registros de precipitación de la estación de la represa de Aguada Blanca, 8.5 km al NE del cráter. Se puede observar que se concentran mayoritariamente entre Diciembre y Marzo. En un volcán activo como el Misti, el agua es uno de los principales vehículos para la evacuación del calor de la zona hidrotermal, y su abundancia podría permitir detectar las variaciones de temperatura en lugares alejados de la cámara (como las inmediaciones del cráter). Es posible que durante la estación húmeda la señal de la temperatura sea amplificada por la recepción de las precipitaciones en la zona del cráter.

## Referencias

- Cacya, L. & Mamani, M., 2009.- Variaciones geoquímicas de los depósitos del volcán Misti: control de la asimilación somera y profunda. *Bol. Soc. Geol. Perú* 103: 91-107.
- Centeno, R., 2012.- Análisis de la actividad sísmica del volcán Misti entre octubre 2005-diciembre 2008 y su dinámica interna actual. Tesis profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa, 136p.
- Dzurisin, D., 1980. Influence of fortnightly Earth tides at Kilauea volcano, Hawaii. *Geophysical Research Letters* 7, 925–928.
- Finizola, A., Lenat, J-Fr., Macedo, O., Ramos, D., Thouret, J. & Sortino, F., 2004.- Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 135, 343-360
- Macedo, O., & Centeno, R., 2010.- Análisis de la actividad sísmica del volcán Misti para el periodo 2007-2008. XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Sociedad Geológica del Perú. Pub. Esp. N°9, Cuzco p. 1124-1127.
- Masías, P., Taipe, E., Antayhua, Y. & Ramos, D., 2011.- Monitoreo del volcán Misti. Periodo 2005 - 2010. Informe técnico n° A6568, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 37p.
- McCarthy, D., & Petit, G., 2003.- IERS Technical Note No. 32, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. 127 pp.
- Ramos, D., 2000.- Aplicaciones del método geofísico del Potencial Espontáneo para el estudio estructural del Volcán Misti. Tesis profesional: Ing. Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa, 135p.
- Rivera, M., 2010.- Genèse et évolution des magmas andésitiques a rhyodacitiques récents des volcan Misti et Ubinas (Sud du Pérou). Thèse de docteur d'université, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 407 p.
- Ruprecht, P. & Worner, G., 2007.-Variable regimes in magma systems documented in plagioclase zoning patterns: El Misti stratovolcano and Andagua monogenetic cones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 165, p. 142-162.
- Sottili, J.L. & Palladino, D., 2012.- Tidal modulation of eruptive activity at open-vent volcanoes: evidence from Stromboli, Italy. *Terra Nova*, doi: 10.1111/j.1365-3121.2012.01059.x
- Van Manen, S., Kervyn, M., Blake, S. & Ernst, G., 2010.- Apparent tidal influence on magmatic activity at Oldoinyo Lengai volcano, Tanzania, as observed in Moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 189, 151–157