

Informe Técnico N° A6568

Monitoreo del Volcán Misti 2005 - 2010



POR:
PABLO MASÍAS ÁLVAREZ
EDU TAIPE MAQUERHUA
YANET ANTAYHUA VERA
DOMINGO RAMOS PALOMINO

MAYO 2011

El Grupo de Monitoreo Volcánico durante el 2010 estuvo conformado por:

Yanet Antayhua Vera	Jefe de Proyecto – Sismología Volcánica
Pablo Masías Álvarez	Químico
Domingo Ramos Palomino	Sismología Volcánica
Edú Taipe Maquerhua	Geodesta
Beto Ccallata Pacsi	Practicante Geofísica
Fredy Apaza Choquehuayta	Practicante Química
Joseph Huanca Cardenas	Practicante Geofísica
Ludvic Ramirez Arzola	Practicante Geofísica

Colaboradores:

Anthony Finizola	VEA Francia
José Úbeda Palenque	UCM
David Palacios	UCM
Juan Lopa Bolivar	UNSA
Rodolfo Van Der Lat	OVSICORI
Rosario Paxi Zamalloa	Geofísica

Director de Geología Ambiental y Riesgo

Lionel Fídel Smoll

CONTENIDO

RESUMEN.....	4
1.0 INTRODUCCIÓN.....	5
2.0 ACTIVIDAD DEL VOLCÁN MISTI.....	7
2.1 MONITOREO GEOQUÍMICO	7
a) Monitoreo de la fuente termal Charcani V	9
b) Monitoreo de las fumarolas del cráter	11
c) Resultados preliminares del mapeo de CO ₂ de las laderas	20
2.2 MONITOREO VISUAL DE LAS FUMAROLAS.....	22
3.0 MONITOREO GEODÉSICO	26
3.1 TRABAJOS PRELIMINARES	26
3.2 CONSTRUCCIÓN DE BASES	27
3.3 INSTALACIÓN DE PRISMAS	29
3.4 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED GEODÉSICA	30
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

RESUMEN

El volcán Misti, se encuentra ubicado a tan solo 18 km de la ciudad de Arequipa, con una población cerca a 1 millón de habitantes que viven a escasa distancia del volcán, tales como los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, (Paucarpata) y Chiguata y con tendencia a seguir creciendo en dirección al volcán, lo que hoy en día hace que se sitúen a menos de 12 km del cráter. Por su ubicación tan cercana a la segunda ciudad más importante del Perú, con obras de infraestructura y la pendiente abrupta en sus flancos Noroeste (NO) y Sur (S), representa un peligro latente. En ese contexto, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ha realizado estudios geológicos, vulcanológicos y ha elaborado el mapa de peligros del volcán Misti (Mariño, et al., 2007). Además se continúa con el monitoreo geoquímico y visual del volcán (iniciado en 1998); implementando, además, nuevas técnicas como el monitoreo geodésico.

Los resultados obtenidos del monitoreo geoquímico de fuentes de agua y fumarolas, correspondiente al periodo septiembre 2005 a noviembre de 2010, del monitoreo visual in situ, mediante registros fotográficos del volcán Misti desde la oficina de INGEMMET-Arequipa obtenidos desde el año 2008 hasta noviembre de 2010, muestran que la fuente Charcani V presentó una temperatura promedio de 35.95 °C. Las variaciones de temperatura en este mismo periodo fluctuaron entre 36 °C y 29 °C; mientras que, descensos importantes de temperatura de hasta 29 °C, en la dicha fuente fueron registrados después de la ocurrencia de los terremotos de Arequipa del 23 de junio del 2001 y de Pisco del 15 de agosto del 2007. Variaciones en la Conductividad y Ph también fueron observados con un promedio de 1320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de 6.5 respectivamente. Asimismo, la concentración de sales disueltas en el agua (SO_4/Cl) presentaron, también, variaciones después de la ocurrencia de los sismos de Arequipa del 2001 y Pisco del 2007. Estos cambios oscilaron entre 800 y 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad, de 6.4 a 7.6 de Ph y la razón de SO_4/Cl entre 1 a 6 y 4 a 5 respectivamente. En los últimos 6 meses, la temperatura promedio de las fumarolas MST-F1, presentó valores de hasta 10 °C, en muchos casos esta temperatura sobrepasa la temperatura máxima registrada en los dos últimos años (8 °C). Las fumarolas del volcán Misti, visibles desde la ciudad de Arequipa muestran alturas por debajo de los 300 m y son de color blanquecino. Además, durante los últimos tres meses en la fuente termal Charcani V, los valores de temperatura, conductividad eléctrica han presentado variaciones sobre sus valores normales registrados los últimos 3 años, mientras que el Ph y la concentración de sales disueltas en el agua, expresadas como la razón SO_4/Cl , se mantienen dentro de los valores normales.

Por otro lado la implementación de la red de monitoreo de deformación en el volcán Misti, ha tenido grandes avances hasta noviembre de 2010. Siendo el trabajo más resaltante la construcción de 6 monumentos que se emplea para instalar de la Estación Total, estos monumentos se construyeron con el aporte de la municipalidad provincial de Arequipa y fueron distribuidos 4 en el flanco sur del volcán y 2 en el flanco oeste. De igual manera, la instalación de prismas presenta avances importantes (50 %); en total se han instalado 10 prismas permanentes en los flancos sur (3 prismas) y oeste (7 prismas) del volcán.

MONITOREO DEL VOLCÁN MISTI 2005 – 2010

1.0 INTRODUCCIÓN

El volcán Misti, es uno de los 8 volcanes activos de la Zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVAC) (De Silva et al., 1991) y se ubica en las coordenadas UTM: 19K 8196372S, 243543E, 5822 msnm, a solo 18 km en dirección NE del centro de la ciudad de Arequipa (Figura 1). Durante los últimos 2 mil años, el Misti ha presentado por lo menos cuatro erupciones. La última erupción se registró a mediados del Siglo XV, las cenizas emitidas en esta erupción poseen espesores de hasta 6 cm en el área de Arequipa (Chávez, 1992). El río Chili pasa entre los volcanes Misti y Chachani y posteriormente discurre por la ciudad de Arequipa, donde en sucesivas oportunidades se han emplazado flujos de barro (Lahares), tales como hace 1035 años, 520 años, 340 años, 330 años AP (Delaite et al., 2005), destruyendo todo a su paso. Algunos de estos flujos posiblemente estén asociados a fuertes precipitaciones, en épocas de tranquilidad volcánica, con la consiguiente erosión y remoción de piroclastos acumulados en los flancos del volcán.

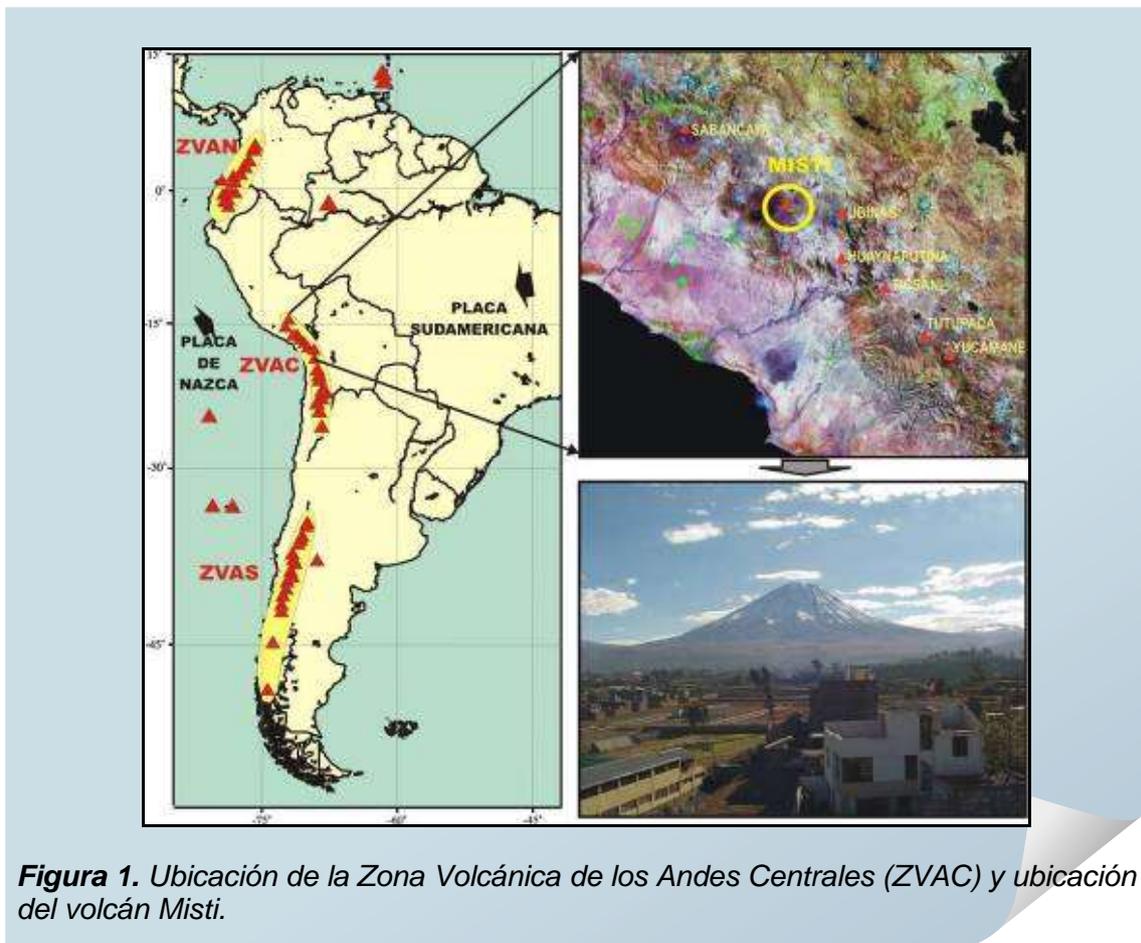


Figura 1. Ubicación de la Zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVAC) y ubicación del volcán Misti.

Por su cercanía al volcán, Arequipa representa uno de los casos más alarmantes, pues registra una población cerca a 1 millón de habitantes que viven

a escasa distancia del volcán y algunos distritos como Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata y Chiguata con tendencia a seguir creciendo en dirección al volcán, lo que hoy en día hace que se sitúen a menos de 12 km del cráter. Asimismo, obras de infraestructura mediante las cuales se brinda servicios básicos de agua y energía eléctrica a la ciudad arequipeña; tales como las represas de Aguada Blanca, El Fraile y las Hidroeléctrica Charcani I, II, III, IV, V y VI podrían ser afectadas considerablemente en caso de una erupción del volcán Misti.

Otro peligro latente con relación al volcán Misti, lo constituye su abrupta pendiente en sus flancos Noroeste (NO) y Sur (S), los cuales podrían sufrir colapsos y generar avalanchas de escombros. Las avalanchas de escombros del flanco NO, podrían desencadenar el represamiento del río Chili y posteriormente flujos de lodo (lahares) que afectarían seriamente áreas urbanas asentadas en el valle del río Chili, como por ejemplo Vallecito, la Av. La Marina, el Club Internacional, etc.

En ese contexto, es imprescindible realizar el monitoreo instrumental continuo, mediante los métodos sísmicos, geoquímicos, geodésicos y visuales a fin de detectar los primeros signos de actividad volcánica y conocer con antelación una posible erupción del volcán Misti. Con los fines antes mencionados, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ha realizado estudios geológicos, vulcanológicos y ha elaborado el mapa de peligros del volcán Misti (Mariño, et al., 2007). Además se continúa con el monitoreo geoquímico, geodésico y visual del volcán implementando, además, la instalación de una estación de monitoreo multiparámetro con información en tiempo real en la oficina de la OD INGEMMET en Arequipa, la que funcionara desde el 2011.

En este informe, se presentan los resultados obtenidos del monitoreo geoquímico de fuentes de agua, fumarolas, correspondiente al periodo Septiembre 2005 a noviembre del 2010 y, del monitoreo visual in situ y mediante registros fotográficos del volcán Misti desde la oficina de INGEMMET-Arequipa, obtenidos desde el año 2008 hasta la actualidad. Asimismo se presenta los avances alcanzados en la implementación de la red de monitoreo geodésico en el volcán Misti.

2.0 ACTIVIDAD DEL VOLCÁN MISTI

2.1 MONITOREO GEOQUÍMICO

El estudio geoquímico de fuentes de aguas termales y gases emitidos por volcanes activos, permite obtener información sobre el estado de la actividad de un volcán a nivel profundo; es decir, se puede obtener información de un aumento o ascenso de magma hacia la superficie. En tal sentido, la composición química de las aguas subterráneas que brotan en los alrededores de volcanes activos puede reflejar cambios precursores de la actividad volcánica. Las modificaciones en las características químicas del agua respecto a los valores de base pueden deberse a la disolución de gases volcánicos o al incremento en los procesos de interacción agua-magma. Los principales volátiles liberados del magma son: Dióxido de azufre (SO_2), Cloruro de hidrogeno (HCl), Fluoruro de hidrogeno (HF), Dióxido de carbono (CO_2) al disolverse estos compuestos en el agua, incrementan las concentraciones de los iones como: Ion sulfato (SO_4^{2-}), Ion cloruro (Cl^-), Ion Bicarbonato (HCO_3^-), produciendo variaciones en los parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales (Armienta et al., 2007), como la temperatura (T°), pH, Conductividad Eléctrica (CE) y los sólidos totales disueltos (TDS).

En el volcán Misti, el monitoreo de fuentes termales se ha realizado de manera periódica desde septiembre del 2005, es así que el INGEMMET inició el monitoreo de cinco fuentes termales: Charcani V desde septiembre del 2005; Jesús (JES), Umaluso (UMA), Tingo (TIN) y Agua Salada (AGS) desde febrero del 2006 y recientemente con la fuente termal Tuxa (TU1) en la quebrada del mismo nombre en Pampa Cañahuas (Figura 2). Estas fuentes se encuentran ubicadas alrededor del volcán Misti, en un radio de 30 km y pertenecen a un sistema hidrotermal de baja temperatura (Masías, 2008). Sin embargo, la fuente CHV, ha sido considerada la más representativa por su cercanía al cráter del volcán y desde donde proviene la mayor información de los parámetros fisicoquímicos (T° , pH, CE) y análisis químicos de las muestras de agua obtenidas en dicha fuente.

Las fumarolas del volcán Misti emanan principalmente de la base del cráter donde se encuentra un domo de lava (Figura 3). Estas fumarolas presentan temperaturas superiores a los 200 °C, con variaciones que llegaron a 430 °C en septiembre del 2001 (Cruz et al., 2007). Se han realizado trabajos para determinar los gases que emanan, muestreando en las fumarolas del domo en la estación MST-F2. Pero debido a la dificultad de acceso al domo del volcán y temperaturas altas, la medición continua de la temperatura se realiza en la estación MST-F1 ubicada en el borde Norte del cráter.

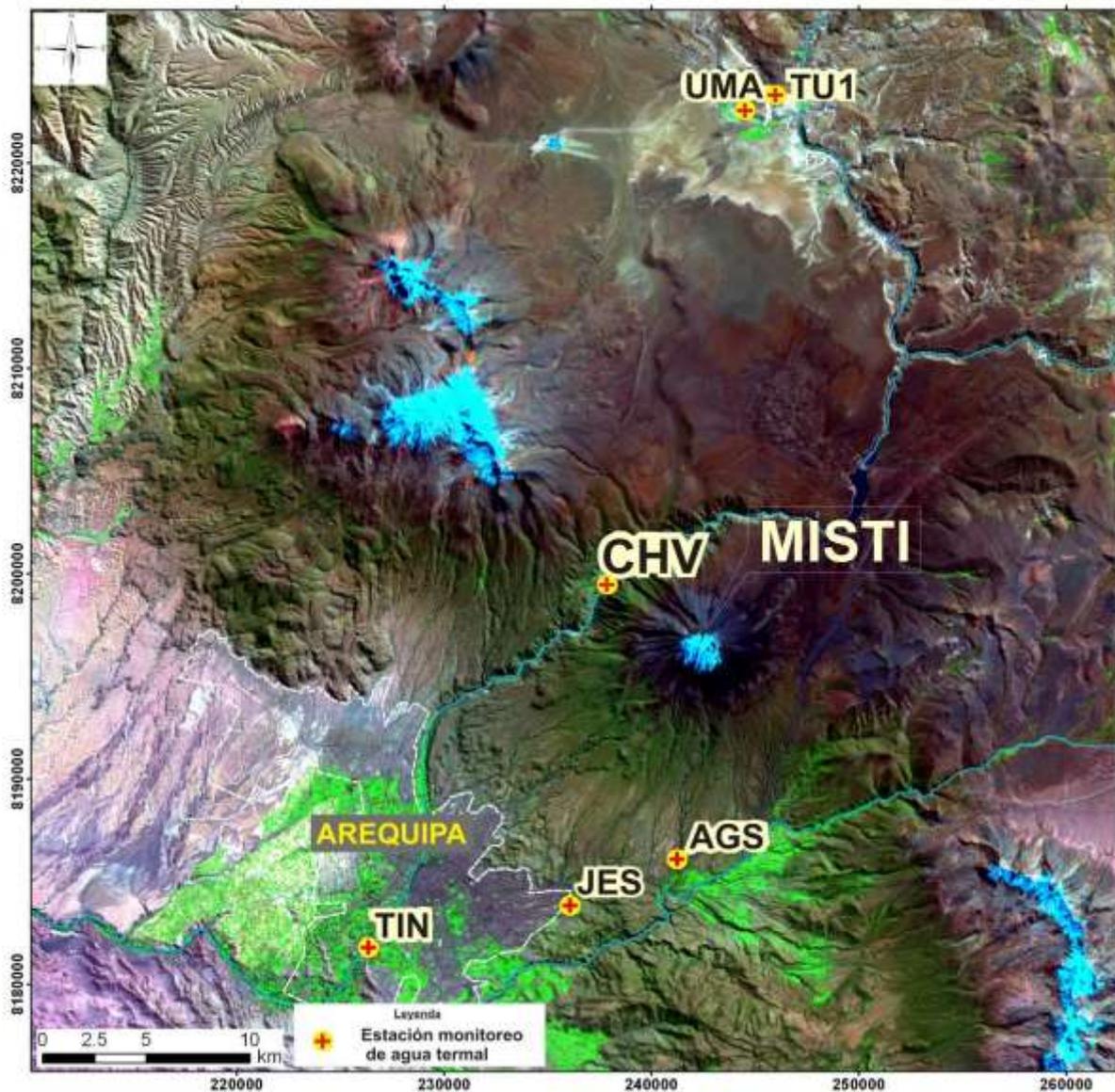


Figura 2. Mapa de la ubicación de las fuentes termales donde se realiza el monitoreo del volcán Misti.



Figura 3. Foto del cráter del Misti, donde se observan las fumarolas.

a) Monitoreo de la fuente termal Charcani V

En la fuente termal Charcani V, se han observado variaciones en los parámetros fisicoquímicos y sales disueltas, durante los últimos años. La Figura 4, muestra los resultados obtenidos del monitoreo geoquímico de la fuente Charcani V, durante el periodo septiembre de 2005 a noviembre del 2010. En dicha figura se observan los parámetros fisicoquímicos: Temperatura (registrada c/15 minutos), Potencial de Hidrogeno (pH) y Conductividad Eléctrica (CE); además los resultados de la concentración de Aniones: Bicarbonato (HCO_3^{-2}), Sulfato (SO_4^{-2}), Cloruros (Cl^-); Cationes: Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K). Todas estas concentraciones han sido tratadas estadísticamente para poder comparar las variaciones.

La temperatura es el parámetro que mas se ha medido (158456 datos en 5 años), esta presentó un promedio de 35,69 °C, con variaciones donde los descenso destacaron. Para un mejor análisis hemos seleccionado 5 periodos resaltantes (A, B, C, D, E).

En el periodo A (2006) se observa que la temperatura descendió hasta los 30.4 °C, en este periodo se observa un ligero incremento del pH, con valores que se acercan a 7, estos datos pudieron ser medidos con papel indicador por lo que solo son un parámetro de referencia de la disminución de la acides, sin embargo gracias al corto periodo de muestreo (c/7 días)

se puede observar variaciones, el anión Cl^- disminuyó posiblemente debió a una menor cantidad de fluidos profundos, lo que también produjo un efecto similar en los cationes.

En el periodo B (2007) se observa que la temperatura desciende hasta los $29,5\text{ }^\circ\text{C}$, esta variación se producía desde principios de agosto, el día 15 de agosto después de ocurrido el Terremoto de Pisco ($M_w=7.9$), con epicentro localizado a 657 km de distancia de la fuente CHV, la temperatura continuo disminuyendo con mayor velocidad, la anomalía duro cerca de 5 días, periodo en que ocurrieron 8 replicas con magnitud $M_w>5$, posteriormente se observaron algunas otras variaciones de menor intensidad. Durante ese periodo se conto con muy pocos resultados de concentración de aniones y cationes, pero se pudo observar que el anión SO_4^{-2} presentó un notable aumento, así como una disminución en el pH, todo esto registrado poco más de un mes del terremoto.

En el periodo C (2008) se observa que la temperatura desciende hasta los $32.5\text{ }^\circ\text{C}$, esta variación es relativamente menor que las anteriores, pero se encuentra acompañada de variaciones en los aniones y cationes, estos últimos aumentaron. Además Centeno et al. (2009), reporto que en ese periodo ocurrió un aumento de actividad tremorica diaria, así como de la actividad de sismos tornillo por lo que este hecho podría estar asociado con el movimiento de fluidos al interior del volcán, estos datos fueron registrados por equipos de periodo corto, por lo que quizás solo se registró lo más resaltante.

En el periodo D (2009) se observa que la temperatura desciende hasta los $29.0\text{ }^\circ\text{C}$, esta variación duro casi un mes, además estuvo acompañadas por disminución de los aniones Cl^- y SO_4^{-2} y de los parámetros CE y pH. Lo que nos podría hacer pensar que se debió a dos posibles causas, el ingreso de agua freática al sistema hidrotermal o la disminución de fluidos magnaticos en el sistema hidrotermal.

En el periodo D (2010) se observa que la temperatura desciende hasta los $28.4\text{ }^\circ\text{C}$, esta variación estuvo acompañada de variaciones en aniones y cationes, como también de CE. Para poder mayores alcances es necesario esperar los resultados del laboratorio para ver la evolución de la composición química de las sales.

Sin embargo este análisis no contemplo todas las variaciones y se trabajo con los datos más resaltantes de cada año, debido a que en muchos de los casos no se disponía mucha información para correlacionar.

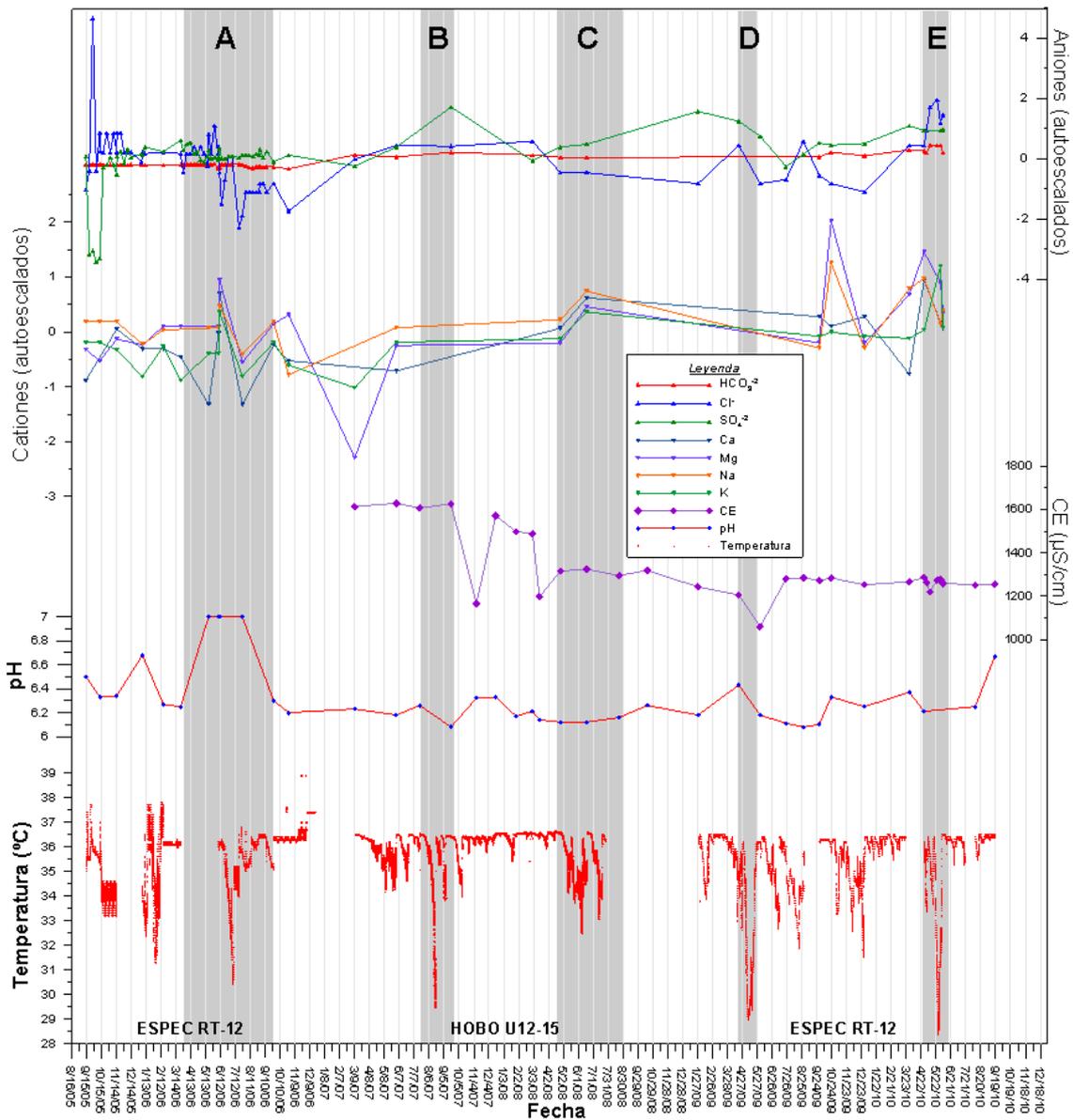


Figura 4. Gráfica de las variaciones de la composición química y parámetros fisicoquímicos de la fuente Charcani V.

b) Monitoreo las fumarolas del cráter

Luego de realizar un reconocimiento de las fumarolas del Misti en diversas ocasiones, durante los últimos 5 años, se han podido identificar varias zonas de emisiones: A, B y C en el fondo del cráter; D, E y F en el borde interno del cráter histórico y por ultimo G y H en el borde externo de la caldera (Figura 5).



Figura 5. Imagen donde se muestran las zonas de emisiones identificadas en el cráter del Misti.

De las zonas de emisiones B, C, E y F, no fue posible obtener datos por la dificultad que implica llegar a algunos de estos puntos. En el resto de zonas se realizaron muestreos cualitativos, medición de la temperatura periódica y continua utilizando registradores, estos últimos fueron donados por VEA- Francia y la UCM de España. También se tomaron muestras de gases utilizando ampollas al vacío cargadas con solución caustica donadas por Kathy y Fracer Goff, en las cuales se captura los gases reactivos: Dióxido de Carbono (CO_2), Dióxido de Azufre (SO_2) y Acido Sulfhídrico H_2S , además de Vapor de Agua. Estas muestras fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Todos estos trabajos se llevaron a cabo el marco de convenios de cooperación.

La **Zona A**, es la que presenta la mayor cantidad de fumarolas, estas emanan de intersticios en el domo de lava que cubre el fondo del cráter, casi la totalidad de emisiones se concentran de la mitad hacia el norte del domo. Al realizar ensayos cualitativos dio positivo al H_2S , pero el olor irritante es característico del SO_2 , la presencia de este gas es razonable debido a que en esta fumarolas se registraron temperaturas mayores a los $310\text{ }^\circ\text{C}$, limite de detección del termómetro de mercurio con el que se realizaron las medidas en junio del 2010, siendo la temperatura mínima medida en los intersticios de $80\text{ }^\circ\text{C}$, debido a esto es que los resultados de gases de azufre se expresaron como SO_2 .

El muestreo de gases se realizó en una de las fumarolas más calientes que se encontró (estación MST-F2), a aproximadamente 15 m del borde

Norte del domo (Figura 6), se realizo utilizando las técnicas descritas por Fahlquist et al., (1992).



Figura 6. Fotografía del muestreo de gases en el domo de lava en el cráter del Misti, Foto: M. Álvarez

Las muestras fueron analizadas con los siguientes métodos: CO₂ por retro valoración con volumétrica acido-base, SO₂ por turbidimetría (el mismo método se utilizó para H₂S) y H₂O por gravimetría.

Los resultados de los análisis se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los principales gases en la fumarola del domo del Misti, muestra tomada el 3 de junio del 2010.

Gases	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	Otros
Concentración % p/v	0,63	0.88	97.98	0,51

Estos resultados muestran que el componente mas abundante después del agua es el SO₂, seguido del CO₂, estos componentes le dan la acidez a la

fumarola, el pH del condensado de la fumarola registrado con papel indicador fue 1.

La **Zona D**, presenta fumarolas más pequeñas que se ubican en el borde Norte del cráter histórico, estas emanan de la parte superior por fracturas en la pared de roca. En esta zona se instaló la estación de monitoreo MST-F1 en las coordenadas UTM, 19K, 242952 E, 8196735S, 5745msnm (Figura 7), la que entro en funcionamiento en agosto del 2006.



Figura 7. Fotografía del borde del cráter histórico del Misti, donde se señala la estación de monitoreo MST-F1.

Estas fumarolas presentan temperaturas entre los 45 y 50 °C, el pH de los condensados registrado con papel indicado fue de 5. En ensayos cualitativos dio negativo para SO_2 y positivo para H_2S . Los resultados de las muestras obtenidas con ampollas al vacío cargadas con solución cáustica (Figura 8), dieron que la concentración de CO_2 expresado en % p/v = 0,91 %.



Figura 8. Fotografía del muestreo de CO₂ en la estación MST-F1 en el borde del cráter del Misti.

Además de los muestreos se instaló 3 registradores de temperatura en diferentes lugares de la misma fumarola, el primero se instaló dentro de una grieta en la boca de la fumarola (agosto 2006), la segunda se colgó junto a la fumarola y la tercera se enterró en el suelo a 35 cm, ambos en noviembre del 2006 (Figura 9).



Figura 9. Esquema de la disposición de los registradores de temperatura, estación MST-F1.

Para la medición continua de la temperatura en las fumarolas del volcán Misti se utilizaron 2 tipos de registradores de temperatura:

- Los Registrador de Datos de Temperatura con Interfaz LASCAR USB EL-USB-1, con un rango de temperatura de -25° a $+80^{\circ}\text{C}$ y una resolución de 0.5°C (Figura 10).
- Los Registrador de Datos de Temperatura HOBO UTL-1 (Universal Temperature Logger 1), dotado de un termistor TMC-1T, cubierta exterior de Delrin y tapa de aluminio, un rango de -29°C a $+39^{\circ}\text{C}$ y una precisión de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ (Figura 11).



Figura 10. Registrador de datos de temperatura LASCAR USB EL-USB-1

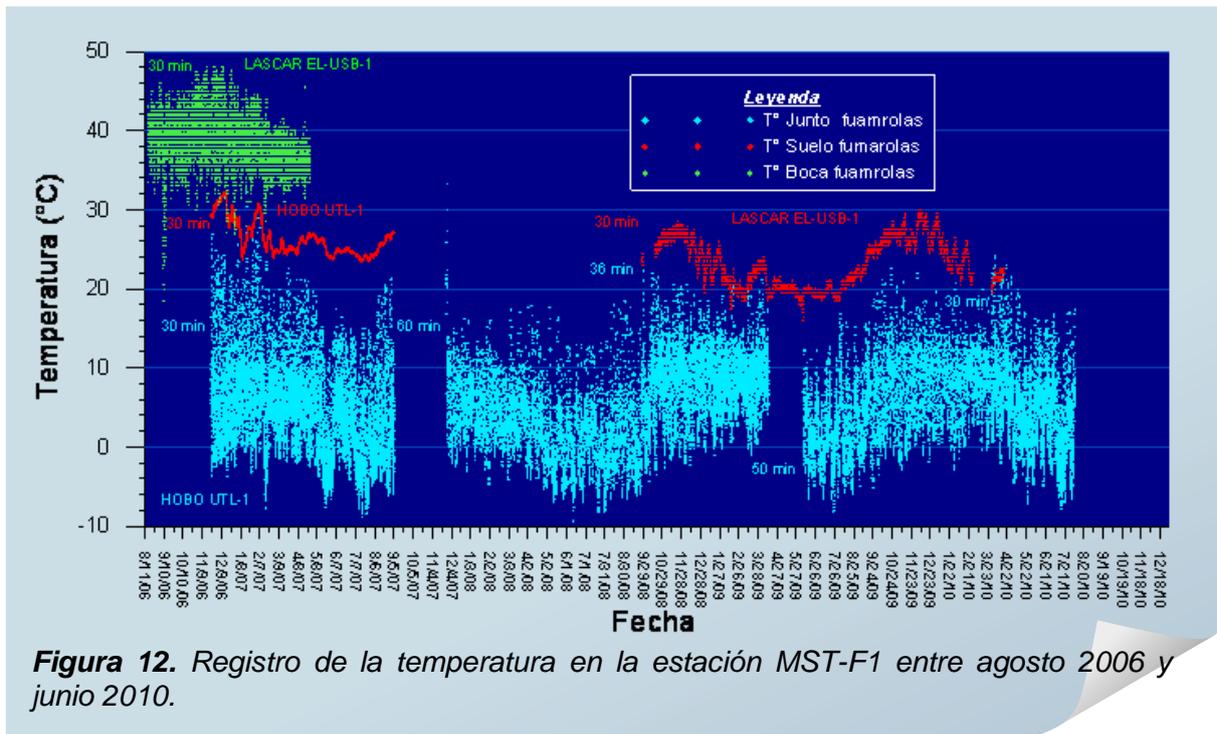


Figura 11. Registrador de datos de temperatura HOBO UTL-1

Ambos equipos fueron instalados por periodos de 6 a 11 meses, luego de estos periodos eran cambiados por otros equipos de iguales características. El intervalo de registro fue de 30, 36, 50 y 60 minutos, según el periodo.

En la Figura 12, se presenta los resultados obtenidos de la medición de la temperatura de las fumarolas en la estación MST-F1, de color verde el

registro de la temperatura en la boca de las fumarolas, con un promedio de 34,7 °C es el lugar donde se registra la temperatura más alta. De color rojo el registro de de la temperatura junto a la salida de la fumarola, con un promedio de 24, 26 °C es la temperatura mas estable. De color celeste el registro de la temperatura junto a la salida de la fumarola, con un promedio de 5, 17 °C. Estos registros se vieron afectados tanto por la temperatura de la fumarola como la del ambiente, la más estable es la que estaba enterrada.



Estos registros se vieron afectados tanto por la temperatura de la fumarola como la del ambiente, siendo la más estable la que estaba enterrada. Al comparar esta con el promedio cada 2,5 días (Figura 13), se observa claramente el efecto producido por la estacionalidad, donde se observa que la temperatura se eleva a partir de fines de octubre de todos los años. Esta estacionalidad afectó a los registradores en las 3 posiciones también se puede observar en la sección señalada como "A", la que se colocó a la misma escala para notar mejor estas variaciones (Figura 14). Al ignorar el efecto de la estacionalidad podemos observar que existen variaciones que en algunos casos coincidieron con eventos como el terremoto de Pisco, donde la temperatura de MST-F1 (enterrado) tuvo la tendencia de ascenso después del terremoto, manteniendo un comportamiento constante durante el periodo en que ocurrieron las 8 réplicas $M_w > 5$, de manera similar al agua de la fuente CHV. En ambos casos al acabar este periodo la temperatura ascendió (Figura 15).

Es por estas razones que podríamos pensar que estas pequeñas variaciones están estrechamente relacionadas con el sistema hidrotermal del Misti. Donde no se han observado cambios significativos.

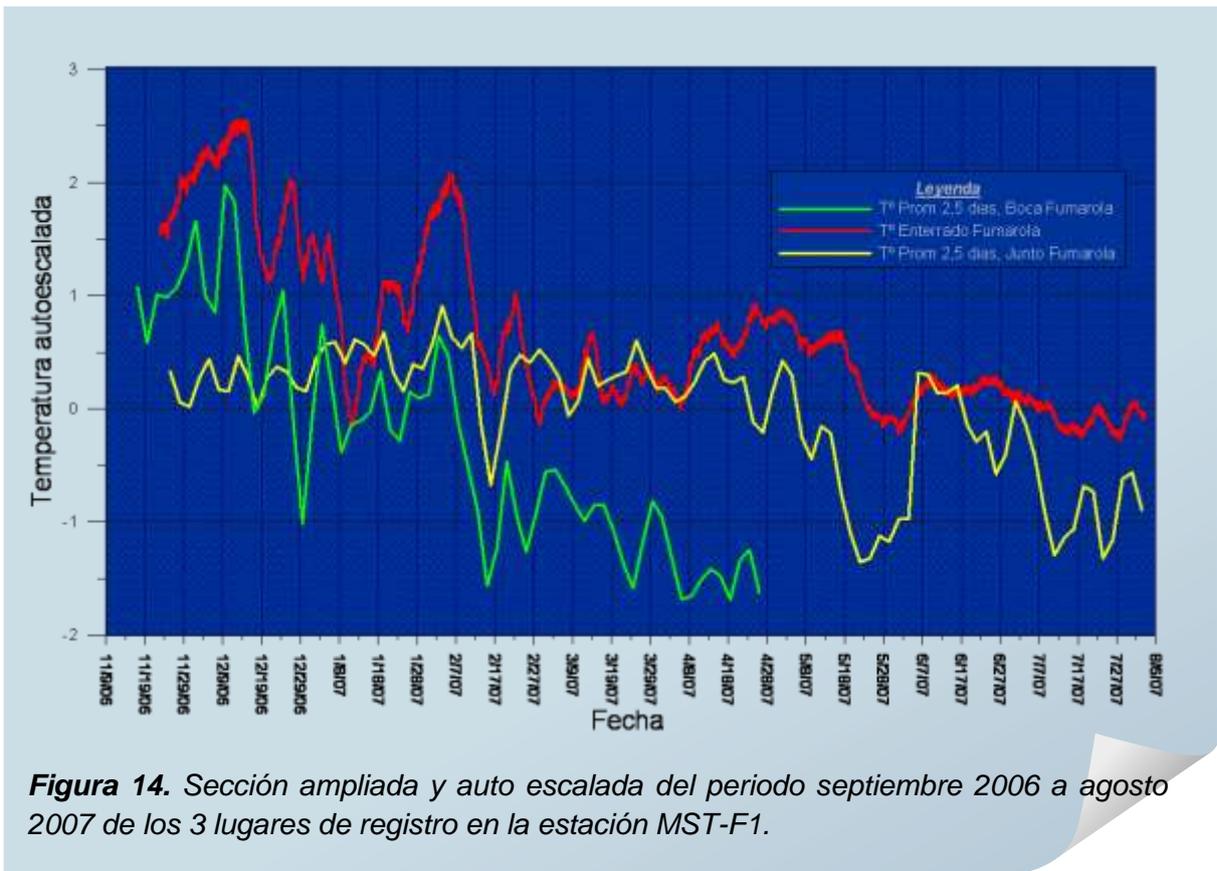
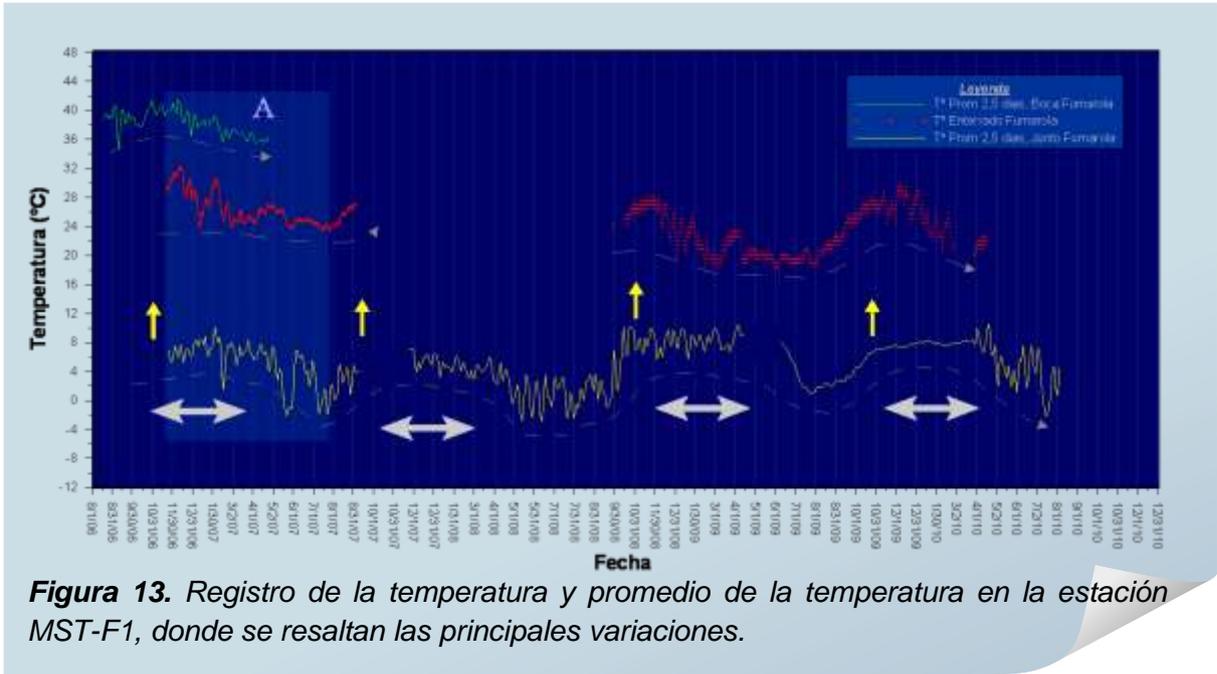




Figura 16. Fotografía de las fumarolas de la zona G, en la quebrada de Hornillos

c) Resultados preliminares del mapeo de CO₂ en las laderas

El Mapa de Concentración de CO₂ en las laderas del Misti se realizó realizando medidas cada 50 m de altura en las laderas y alrededor del cráter cada 25 m, para ello se utilizó un equipo con sensor GasCheck con rango de detección de 0-3000ppm, 0-3% y 0-10% en volumen (Figura 17). Preliminarmente es expresado en voltaje hasta realizar los cálculos completos de la calibración. En los lugares donde la concentración excedió el límite de detección se realizaron diluciones con el aire.

Para el muestreo se utilizó una sonda, la que se enterraba a una profundidad de 25 a 30 cm en el suelo, una jeringa de 100 ml, con la que se absorbía el gas del suelo, el sensor instalado en una maleta junto a las baterías y por último un voltímetro, donde se observaba las lecturas (Figura 18). Adicionalmente se utilizó un GPS para tener la ubicación y una libreta para anotar las lecturas.



Figura 17. Imagen del Equipo de muestreo de CO₂ en el suelo



Figura 18. Fotografía del muestro de CO₂ en el suelo

Los resultados preliminares se muestran en la Figura 20 donde se encuentran la imagen del volcán Misti allí se han coloreado las concentraciones de CO₂ expresadas en voltaje, además se observan los puntos de muestreo.

La mayor concentración de CO₂ se encontró al sur en el borde externo de la caldera, cerca de la Quebrada del Diablo. Otro punto interesante es en la zona Noreste, con la segunda concentración importante del volcán, allí se encuentran las zonas de fumarolas G y H. En el lado Norte y Este de la caldera no se encontraron concentraciones considerables, al igual que en las laderas Sur y Norte por debajo de los 5500 m de altura.

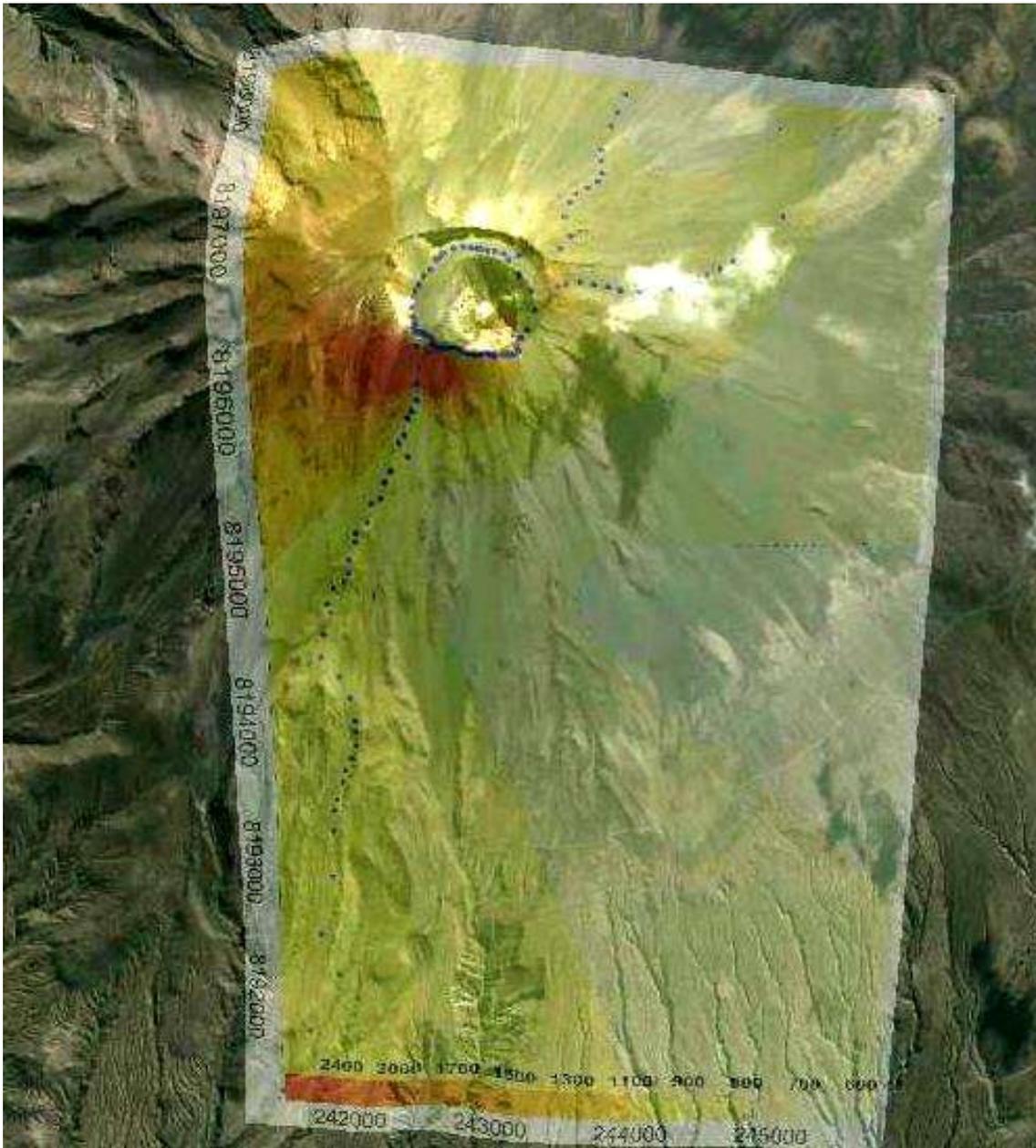


Figura 20. Imagen donde se resalta la concentración de CO₂ expresado en voltaje en el volcán Misti, de color amarillo a rojo de manera ascendente.

2.2 MONITOREO VISUAL DE LAS FUMAROLAS

Las fumarolas del volcán Misti son claramente visibles desde la ciudad de Arequipa y observadas principalmente por las mañanas. Desde el año 2008 hasta la actualidad, el INGEMMET viene realizando el registro fotográfico de las emisiones fumarólicas más resaltantes, in situ y desde la oficina de INGEMMET Arequipa. En general, estas emisiones son de color blanquecino y raramente sobrepasan los 300 m de altura sobre el cráter. Algunas veces es posible apreciar estas fumarolas después de que ocurre una nevada en la parte alta del volcán.

El monitoreo de las fumarolas se realiza durante periodos prolongados de observación, identificando posibles emisiones y haciéndoles un seguimiento de la secuencia de la emisión de las fumarolas, las mismas que son registradas fotográficamente, tal como se muestra en la Figura 21, y en la Figura 22, se presenta el registro fotográfico de las fumarolas del volcán Misti, obtenidas desde la oficina de INGEMMET-Arequipa y corresponden a los obtenidos en marzo, agosto, octubre del 2008; enero, febrero, abril, junio septiembre del 2009 y abril del 2010.

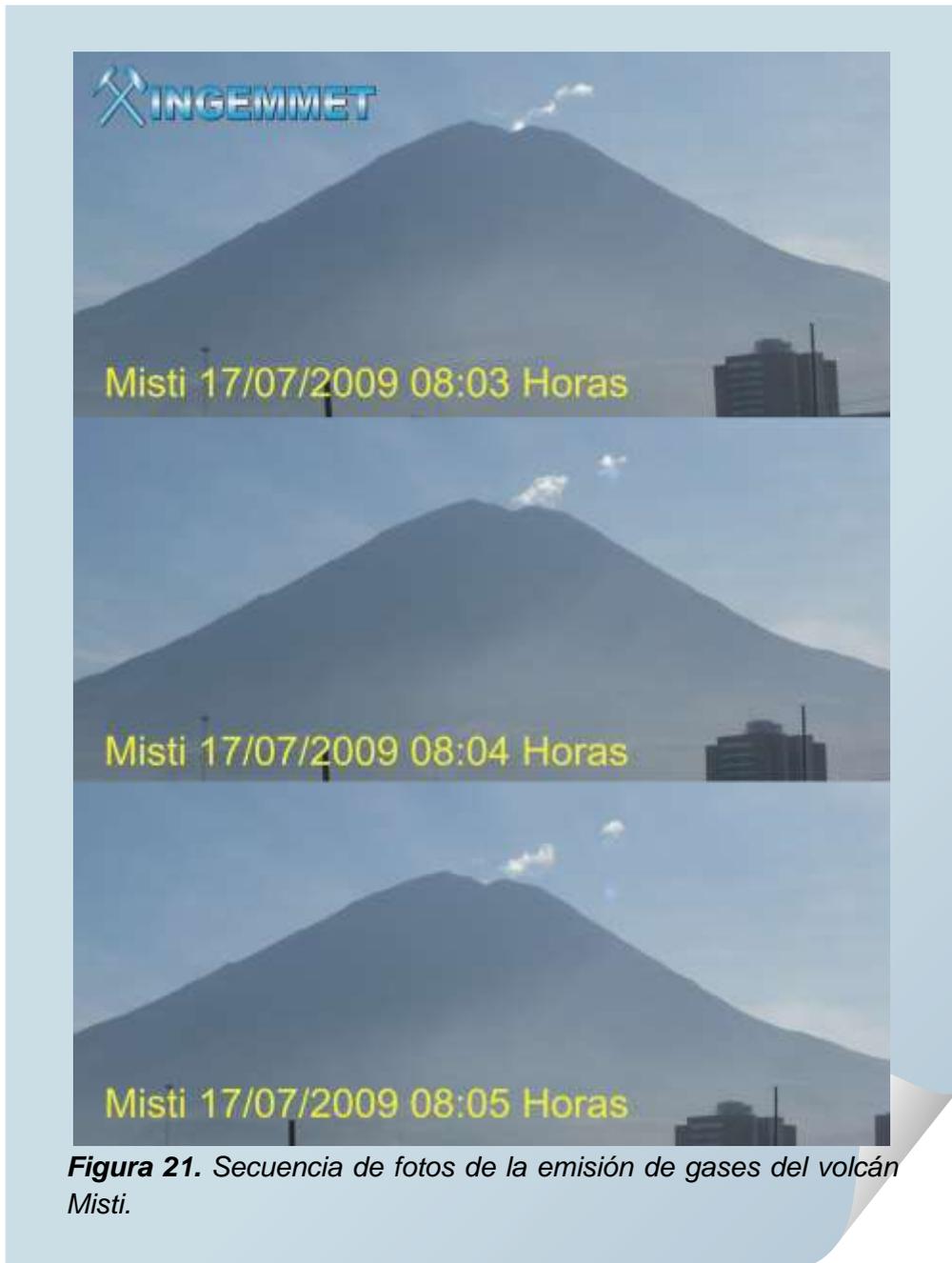


Figura 21. Secuencia de fotos de la emisión de gases del volcán Misti.



Figura 22. Fotos de las principales emisiones fumarólicas del Misti que se produjeron entre el 2008 y 2010

Considerando la visibilidad de las emisiones del volcán Misti, se han registrado desde abril del 2009, estas han sido clasificadas en: no visibles, poco visibles y visibles, además se registro los días nublados donde no fue posible realizar observaciones. Ejemplos de la clasificación son presentadas en la Figura 22. En general, la estadística de las emisiones desde abril 2009 hasta diciembre del 2010 (Figura 23), muestran que entre noviembre 2009 y enero 2010 se presentaron varios días de emisión fumarólica visible, además se observaron pocas fumarolas entre agosto y octubre tanto del 2009 y en menor cantidad en el mismo periodo del 2010.

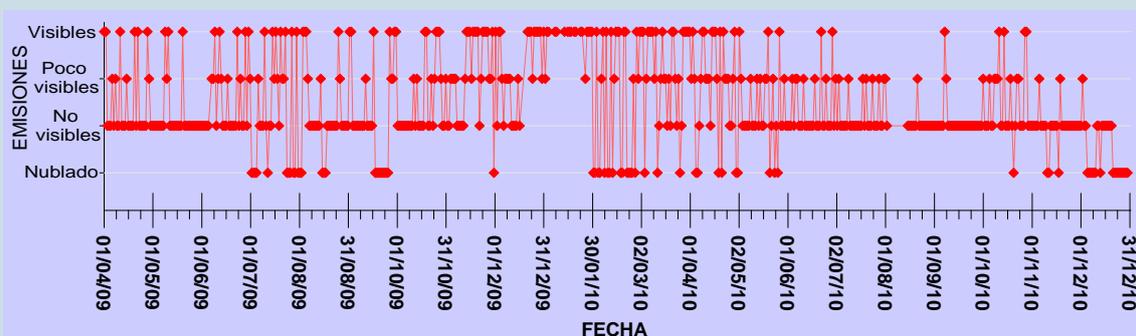
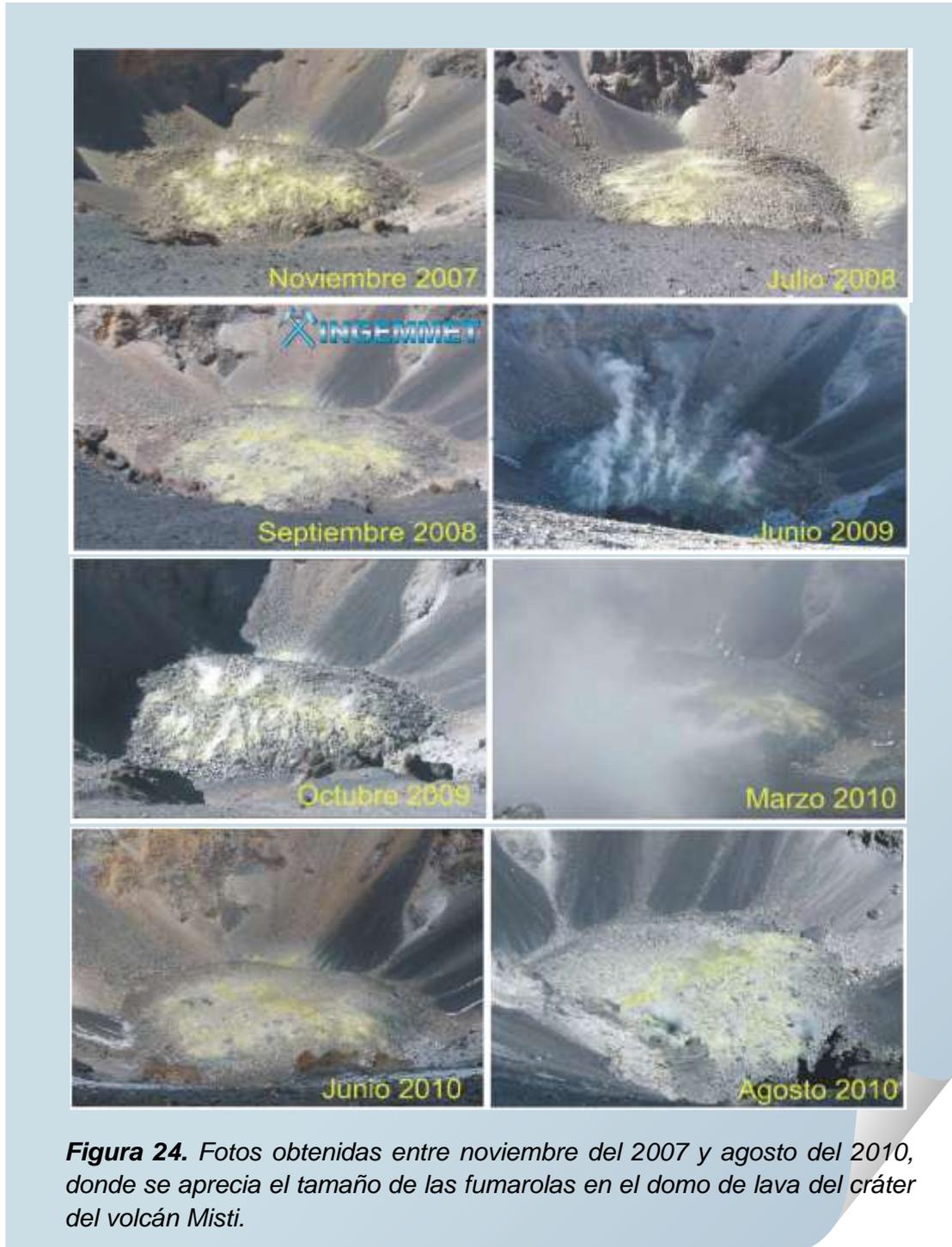


Figura 23. Gráfica de las características de las fumarolas registradas entre abril 2009 y diciembre del 2010.

Asimismo, se ha realizado el registro fotográfico, in situ, del domo del volcán Misti. En la Figura 24, se muestra que durante los años 2007 al 2010 las fumarolas del domo son difusas; en algunas imágenes se puede observar grades fumarolas, sobretodo en marzo del 2010, donde sobrepasaban con facilidad el borde del cráter.



3.0 MONITOREO GEODÉSICO

El monitoreo geodésico del volcán Misti, consistió en implementar la red de monitoreo de deformación empleando técnicas de geodesia clásica. Este trabajo se empezó desde noviembre del 2008, y en el presente informe se muestran los avances alcanzados hasta el 2010 en el proceso de construcción de monumentos e instalación de prismas.

3.1 TRABAJOS PRELIMINARES

Este consistió en trabajos de reconocimiento de campo para identificar las zonas de mejor performance para instalar prismas y construir bases para EDM, principalmente en los flancos Oeste-Noroeste y Sur, debido a que estas zonas del volcán son susceptibles a sufrir colapsos y generar avalanchas de escombros. Si colapsara el flanco Noroeste represaría el río Chili, cuyo desembalse generaría flujos de barro que se desplazarían a lo largo del río y afectaría áreas urbanas de la ciudad de Arequipa. Si colapsara el flanco Sur afectaría áreas de los distritos de Chiguata, Paucarpata y Mariano Melgar (Mariño et al., 2007) tal como se muestran en la figura 25 donde se presenta las delimitaciones de las zonas de inestabilidad en los flancos ya mencionados, según los trabajos de geología. De otro lado se identificaron también los flancos más estables para descartar o confirmar la fuente o causante de la deformación ya sea por avalanchas o propias de la actividad magmática.

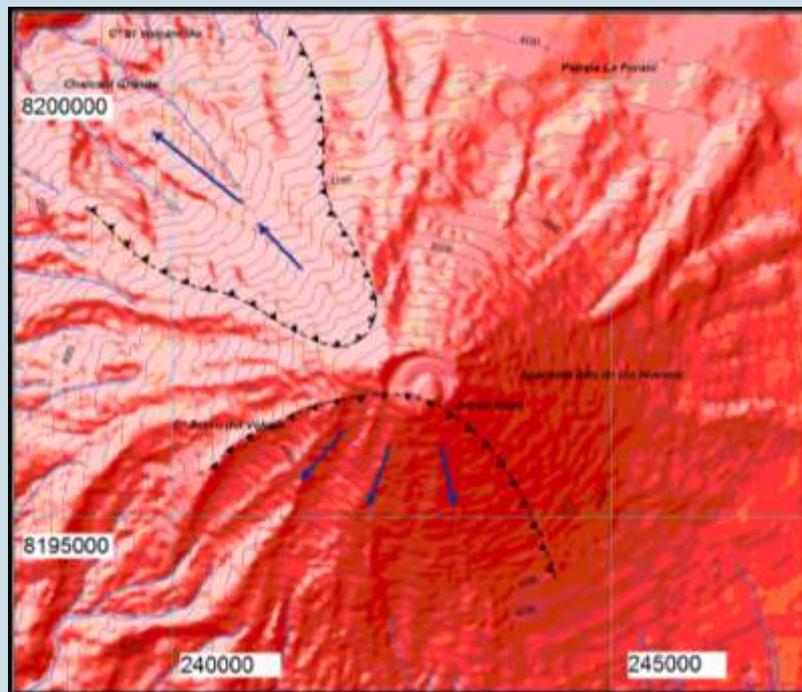


Figura 25. Identificación de los flancos inestables, según estudios geológicos (tomado de Mariño et al, 2007).

En la Figura 26, se muestra el reconocimiento de campo realizado con la participación y apoyo del Dr. Rodolfo Van Der Laat, profesional experto en el monitoreo de deformación, del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI).

Durante este trabajo se ubicaron, algunos puntos y áreas a tomar como prioritarias para la instalación de prismas y construcción de bases.

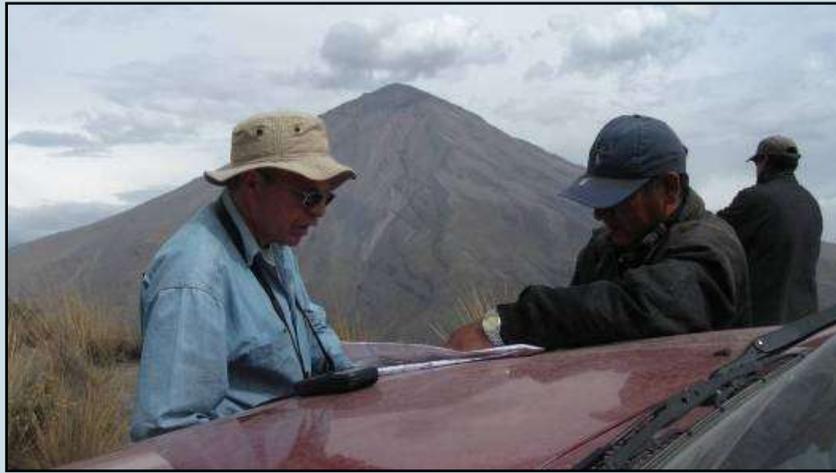


Figura 26. Foto del profesional del OVSICORI y del INGEMMET realizando el reconocimiento de campo.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE BASES

La siguiente etapa del trabajo de implementación de la red geodésica consistía en la construcción de las bases para la estación total. Para este caso, se tomó un modelo de un pilar robusto cuyo plano se puede observar en la Figura 27, en donde se proponen dos tipos de construcción, una sobre material no consolidado en donde es necesario construir sobre zapatas para darle estabilidad al pilar, y el segundo tipo corresponde a una construcción sobre roca estable en donde solo fue necesario anclar la estructura en la roca, este tipo es el que se considera como primera opción cuando se hace la búsqueda de sitios para la construcción. La construcción de estos pilares se llevó a cabo con la colaboración de la Municipalidad Provincial de Arequipa y el Gobierno Regional de Arequipa.

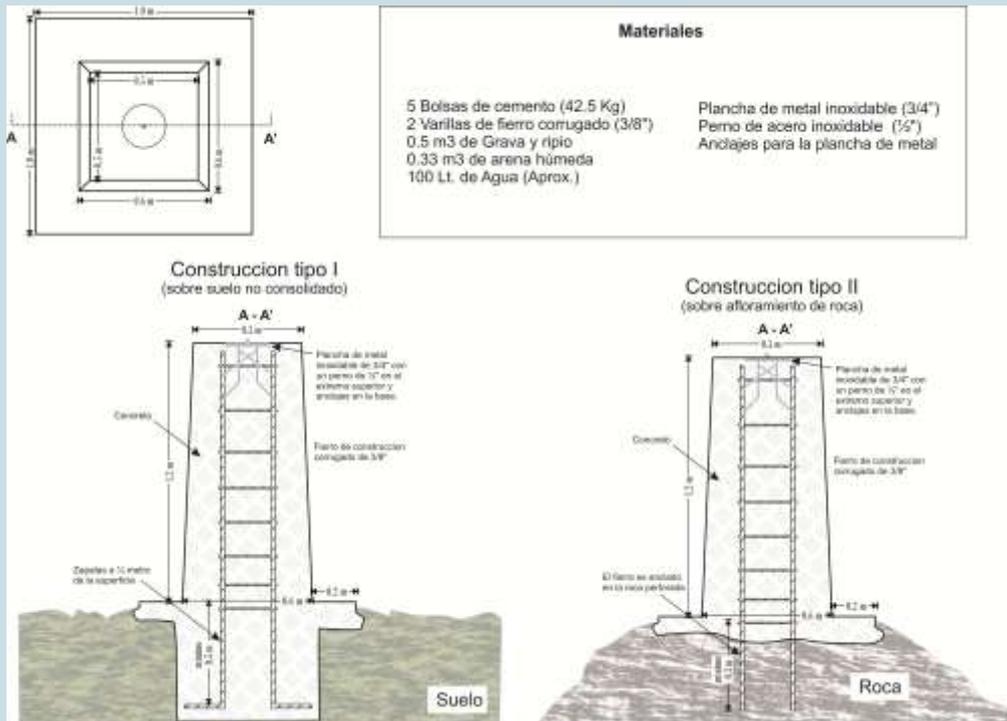


Figura 27. Planos para la construcción del monumento para medir distancias con la estación total.

De esta manera se construyeron hasta la fecha las bases MBS1, MBS2, MBS3 y MBS4 en el flanco Sur, en la Figura 28 se muestra un ejemplo de la base UBS3, así mismo se construyeron las bases MBTO y MBCU en el flanco oeste del volcán en la Figura 29 se puede ver un ejemplo de una de estas bases terminadas. Además, se ha previsto la construcción de dos bases mas una en el flanco noroeste y otra en el flanco noreste, optimizando el diseño de la estructura del monumento.



Figura 28. Monumento terminado y en uso, corresponde a la base MBS3, en el flanco Sur.



Figura 29. Monumento terminado y en uso, corresponde a la base MBTO, en el flanco Oeste.

3.3 Instalación de prismas

Otro de los trabajos concernientes a la implementación de la red de monitoreo con EDM es la instalación de prismas, durante el año 2010 se instalaron 3 prismas en el flanco sur, y 7 prismas en el flanco oeste, en total 10 prismas, en la Figura 30 se puede ver la metodología de instalación de los prismas, este proceso fue mejorado respecto al método de instalación que se solía emplear en el año 2009, haciendo este trabajo mas eficiente.



Figura 30. Proceso de instalación de los prismas. (a) Se perfora manualmente sobre roca estable con una broca diamantada, (b) y (c) se ancla el perno se expansión, (d) se asegura el adaptador, (e) se coloca el prisma sellando con soldadura al frío, (f) se protege y sella con cemento plástico y (g) se marca el punto para su ubicación con el equipo.

3.4 Resultados de la implementación de la red geodésica

El resultado final de la primera etapa de la implementación de la red de monitoreo con la técnica de EDM nos muestra que se han construido 6 estaciones base y se han instalado 10 prismas (Tabla 2 y Figura 31), sin embargo aun quedan tareas pendientes para tener la red geodésica completa, en la Figura 16 se muestra el objetivo final al que se quiere llegar para tener una red de monitoreo aceptable.

Tabla 2. Coordenadas de las estaciones y prismas instalados en el volcán Misti, todas las coordenadas están en Datum WGS84.

Tipo	Código	Longitud	Latitud	Altitud	Descripción
Base	MBS1	-71.42004	-16.34484	3498	Base Sur 1
Base	MBS2	-71.42043	-16.34032	3641	Base Sur 2
Base	MBS3	-71.43771	-16.34830	3440	Base Sur 3
Base	MBS4	-71.43669	-16.34309	3566	Base Sur 4
Base	MBCU	-71.46061	-16.26369	3192	Base oeste cultivos
Base	MBTO	-71.46668	-16.27464	3257	Base oeste torre
Prisma	MPS1	-71.41212	-16.30331	5417	Prisma Sur 1
Prisma	MPS2	-71.40941	-16.30742	5212	Prisma Sur 2
Prisma	MPS3	-71.41624	-16.31841	4506	Prisma Sur 3
Prisma	MPCR	-71.41274	-16.29398	5653	Prisma Cruz
Prisma	MPO2	-71.42664	-16.29049	4966	Prisma Oeste 2
Prisma	MPO3	-71.44612	-16.28973	3934	Prisma Oeste 3
Prisma	MPO4	-71.41055	-16.29161	5604	Prisma Oeste 4
Prisma	MPO5	-71.41427	-16.29050	5409	Prisma Oeste 5
Prisma	MPO6	-71.41831	-16.28763	5083	Prisma Oeste 6
Prisma	MPO7	-71.42373	-16.28228	4577	Prisma Oeste 7

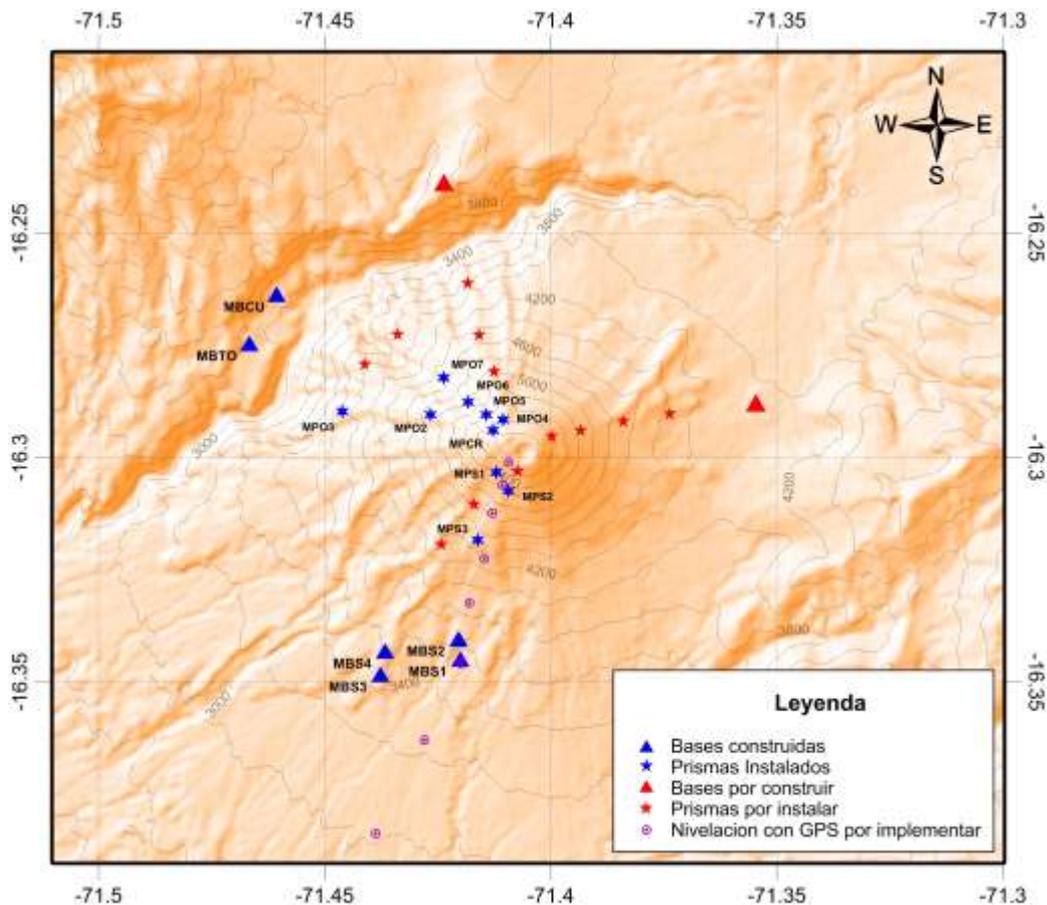


Figura 31. Diseño de la red geodésica para el monitoreo de deformación en el volcán Misti.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis del monitoreo geoquímico de fuentes de agua, fumarolas, observaciones visuales y monitoreo geodésico del volcán Misti se concluye que:

1. Durante el periodo de monitoreo 2005 y 2010 se han observado variaciones en los parámetros fisicoquímicos monitoreados; muchas de estas variaciones se asocian a cambios en el sistema hidrotermal producidos por la actividad sísmica regional y movimiento de fluidos en el interior del volcán. Siendo esta fuente, un buen punto de control de la actividad debido a su sensibilidad a estas variaciones.
2. La temperatura de las fumarolas MST-F1, presentó valores entre 16 °C y 32 °C en el suelo. Los resultados de los análisis químicos, muestran que estas fumarolas presentan componentes hidrotermales.
3. Los resultados obtenidos en la estación MST-F2, en el domo del cráter, muestran que esta fumarola tiene componente magmática, por lo que podría estar asociado directamente con la chimenea del volcán. Esta hipótesis se refuerza con la temperatura cercana a los 400 °C con la que emanan los gases.
4. Durante el 2010, en el mes de marzo se tuvieron la mayor cantidad de fumarolas observadas, periodo donde estas fueron fotografiadas en el cráter.
5. Las fumarolas del volcán Misti, son visibles desde la ciudad de Arequipa y los registros fotográficos obtenidos desde el 2008 hasta la actualidad, muestran fumarolas por debajo de los 300 m y de color blanquecino.
6. Por las consideraciones antes mencionadas, se concluye que durante los cinco años, los parámetros de monitoreo antes descritos muestran un comportamiento ligeramente dinámico, con anomalías que podrían ser causadas por factores externos y propios del volcán, los que no han desencadenado ningún tipo de crisis, pero que deben ser observados para obtener mayor información.
7. Los trabajos de monitoreo geodésico se centraron principalmente en el diseño e implementación de la red para el monitoreo de deformación del volcán Misti. Se han construido hasta la fecha, 4 bases e instalado 3 prismas en el flanco sur; mientras que en el flanco oeste se han construido dos bases y 7 prismas, teniendo un avance del 50%. Por otro lado, se han logrado hacer las primeras lecturas de distancias en los flancos Sur y Oeste, las cuales representan la línea base para el análisis posterior de variaciones de distancias.

Debido a que el volcán Misti es un volcán activo, se recomienda que:

8. Continuar y optimizar el monitoreo geoquímico del volcán Misti. Para ello es necesario e impostergable contar con un mayor número de análisis químico de agua de las fuentes termales.

9. Continuar y optimizar el monitoreo visual del volcán Misti, sistematizando la adquisición de datos. Para ello es imprescindible la instalación de una cámara con registros continuos.
10. Implementar un sistema de medición continua de las plumas de gas que emanan del cráter, utilizando métodos ópticos (UV) con equipos como el DOAS.
11. Durante el año 2011, se culmine la implementación del monitoreo geodésico, empleando de los métodos GPS y EDM. Esto permitirá conocer posibles deformaciones en los flancos del volcán, que podrían estar asociados a la generación de deslizamientos o ascenso de magma.
12. Considerando la carencia de información sismovolcánica del Misti, es urgente la instalación de por lo menos una estación sísmica de banda ancha con transmisión en tiempo real desde el cráter del volcán hasta la oficina de INGEMMET en Arequipa.
13. Continuar con las acciones de mitigación y prevención ante una probable erupción del volcán Misti en la ciudad de Arequipa. Para ello es importante, replicar los avances logrados en el Distrito de Alto Selva Alegre, en los demás distritos de la ciudad.
14. Continuar con la educación y sensibilización a autoridades locales, regionales y población en general de Arequipa, a fin de reducir el riesgo volcánico del Misti.
15. Implementar un Sistema de Alerta Temprana ante la erupción del volcán Misti en la Región Arequipa. Este Sistema debe garantizar una rápida y eficiente transferencia de información de las entidades geocientíficas hacia las autoridades de Defensa Civil, y por intermedio de ellos a la población, para responder de manera oportuna y eficaz ante una crisis volcánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Armienta A., De la Cruz-Reyna S., Lesage P., Ortiz R., Van der Laat R. (2007). Conclusiones y Recomendaciones del Taller-Seminario "Señales Volcánicas Precursoras". México, p7.

Centeno R., Macedo O. (2009). Análisis Preliminar de la Actual Actividad Sísmica del Volcán Misti. , XVIII Simposio Peruano de Física. SFP – Arequipa. 11p

Chávez, J. (1992). La erupción del Volcán Misti. Pasado Presente y Futuro. Imprenta Zenit Arequipa.

Delaite, G., Thouret, J., Sheridan, M., Labazuy, P., Stinton A., Souruot, T. y Evan Westen, C. (2005). Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. Z.Geomorph. N. F., vol 140, p. 209-231.

Cruz V., Masías P. (2007). Geochemical survey of hot and cold waters around the Misti volcano. Poster, Conferencia Internacional Conmemorativa, Volcán Chichón: 25 años después, México. Abstracts p 21.

De Silva, V. & P. Francis (1991). Volcanoes of the Central Andes. Springer, Berlin, p 34-35.

Fahlquist L., Janik C. (1992). Procedures for Collecting and Analyzing Gas Samples from Geothermal Systems. U.S. Department of the Interior. U.S. U.S.G.S. 19 p.

Mariño, J., Rivera, M.,Thouret J-C, Salas, G., Cacya, L., Siebe, C., Tilling, R., (2007). Preparation of Updated Volcanic Hazards Map for El Misti Volcano, Peru. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú; Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise-Pascal, France; Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Escuela de Geología, Arequipa, Perú; Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, UNAM, México; Multinational Andean Project: Geoscience for Andean Communities, Estados Unidos.

Masías P., (2008). Estudios geoquímicos de las fuentes de aguas termales y frías asociadas al volcán Misti, Póster, 75 Congreso Iberoamericano de Química, Cusco.