



PERÚ

Ministerio
de Energía y Minas

Instituto Geológico Minero
y Metalúrgico - INGEMMET



Monitoreo de los volcanes Misti y Ubinas Periodo 2006 - 2012

Boletín N° 54 Serie C
Geodinámica e Ingeniería Geológica



Por:

Pablo Masías Álvarez
Yanet Antayhua Vera

Edú Taipe Maquerhua
Domingo Ramos Palomino



Lima, Perú
2013



PERÚ

Ministerio
de Energía y Minas

Instituto Geológico Minero
y Metalúrgico - INGEMMET



Monitoreo de los volcanes Misti y Ubinas Periodo 2006 - 2012

Boletín N° 54 Serie C
Geodinámica e Ingeniería Geológica

Por:

Pablo Masías Álvarez
Yanet Antayhua Vera

Edú Taipe Maquerhua
Domingo Ramos Palomino

Lima, Perú
2013

SERIE C GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO,
N° 54, 2013.

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N°
2013-15492

Razón Social: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
(INGEMMET)

Domicilio: Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima, Perú
Primera Edición, INGEMMET 2013

Se terminó de imprimir el 30 de setiembre del año 2013 en los
talleres de INGEMMET.

© **INGEMMET**

Derechos Reservados. Prohibida su reproducción

Presidente del Consejo Directivo: Susana Vilca

Secretaria General: Elizabeth Ramos

Comité Editor: Susana Vilca, Lionel Fídel, Víctor Carlotto,
Jorge Chira, Marden Rojas

Dirección encargada del estudio: Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo Geológico

Unidad encargada de edición: Unidad de Relaciones
Institucionales.

Corrección Geocientífica: Pablo Samaniego
Corrección gramatical y de estilo: Elias Rengifo
Diagramación: Zoila Solis

Portada: Volcanes Misti y Ubinas

Referencia bibliográfica

Masías, P.; Taípe, E.; Antayhua, Y. & Ramos, D. (2013) -
Monitoreo de los Volcanes Misti y Ubinas, período 2006 - 2012,
*INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo
Geológico*, 54, 104p.

Contenido

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I	
ASPECTOS GENERALES	5
CAPÍTULO II	
MONITOREO GEOQUÍMICO DEL VOLCÁN MISTI	15
CAPÍTULO III	
MONITOREO GEODÉSICO DEL VOLCÁN MISTI	31
CAPÍTULO IV	
MONITOREO VISUAL DEL VOLCÁN MISTI	43
CAPÍTULO V	
MONITOREO GEOQUÍMICO DEL VOLCÁN UBINAS	49
CAPÍTULO VI	
MONITOREO GEODÉSICO DEL VOLCÁN UBINAS	59
CAPÍTULO VII	
MONITOREO VISUAL DEL VOLCÁN UBINAS	67
CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	87

RESUMEN

Con el fin de conocer el estado de la actividad y de los volcanes Misti y Ubinas, el INGEMMET inicia el monitoreo de estos dos volcanes en septiembre del 2005, inicialmente con el monitoreo geoquímico de fuentes termales en ambos volcanes y monitoreo visual en el volcán Ubinas.

Entre el 2006 y el 2007 se inician los trabajos de monitoreo geoquímico en fumarolas, inicialmente con la medición continua de la temperatura en las fumarolas del Misti y en las fuentes termales UBT (Ubinas) y CHV (Misti). Entre el 2009 y 2012 se accedió a las fumarolas del volcán Misti, tanto del borde exterior como del interior del cráter, se midieron valores de temperatura de entre 46 y 310 °C y valores de pH de entre 1 y 6-. Además se amplió la red de monitoreo de temperatura a 5 estaciones en el cráter y se inició el muestreo de condensados de las fumarolas del domo y fuentes termales, encontrándose que el sistema hidrotermal en la parte alta es alimentado por una componente magmática, y parte de este es arrastrado por aguas freáticas a las partes bajas del edificio volcánico, emergiendo como fuentes termales alrededor del edificio volcánico. Por otro lado, en el año 2008 se diseñó e inició la implementación de una red geodésica para el monitoreo de la deformación en el volcán Misti, principalmente empleando las técnicas de EDM (medida electrónica de distancias) y GPS.

El monitoreo visual del Misti se implementó inicialmente con imágenes fotográficas de las fumarolas del domo del cráter desde el 2007, fotografías de las fumarolas observadas desde Arequipa y posteriormente con reportes cualitativos de la presencia de

fumarolas entre el 2009 y 2011 y desde el 2012 se realiza el registro de la altura alcanzada por las fumarolas, siendo la más alta de 700 m, registrada en junio del 2012.

En el 2006 inicia la crisis eruptiva del volcán Ubinas, la que se prolonga hasta noviembre del 2009, fecha en que el monitoreo visual reporto la última emisión de ceniza. Es en este periodo en que se mejora sustancialmente el monitoreo visual apoyado con imágenes fotografías, videos y seguimiento con imágenes satelitales. Siendo las emisiones más altas registradas en el 2006 con alturas máximas de 4000 m sobre el cráter.

El monitoreo Geoquímico de la fuente UBT, muestra variaciones asociada a la actividad volcánica y cambios asociados a la actividad tectónica regional en el 2007, además un claro descenso de la temperatura que inicia en el 2008 y no se detiene hacia el 2012.

La implementación de la red de monitoreo geodésica en el volcán Ubinas se inició entre el 2008 y 2009, básicamente para EDM, obteniendo datos desde el 2010. Esta red se complementa con perfiles de GPS diferencial, tanto para el volcán Ubinas como para el Misti. Además se monitoreo la deformación con el método de interferometría de imágenes satelitales (InSAR). En los primeros años del monitoreo geodésico, Los volcanes Misti y Ubinas, no presentan deformación medible con las técnicas empleadas, sin embargo estos resultados nos permiten conocer el estado no deformativo del volcán como línea base para compararlo con posibles etapas pre-eruptivas en el futuro.

INTRODUCCIÓN

El INGEMMET, basado en su Reglamento de Organización y Funciones-ROF (DS N° 026-2001-EM) decidió iniciar diversos estudios en los volcanes peruanos a fin de prevenir y mitigar efectos de una erupción hacia la población y sus inversiones.

En el año 2005, INGEMMET inicia con el monitoreo de fuentes termales en los volcanes Misti y Ubinas, en este mismo periodo se realizan los primeros registros visuales de la fumarola del volcán Ubinas.

En el 2006, la erupción del volcán Ubinas (Moquegua), mostró la carencia de instrumentación para el monitoreo de los volcanes peruanos; es así que las primeras noticias sobre la reactivación de

este volcán fueron emitidas por el Ministerio de Salud de Ubinas-MINSA y pobladores de las inmediaciones del volcán.

Así, el INGEMMET implementó el monitoreo visual del volcán Ubinas desde un campamento base localizado a 4600 msnm, a 9 km al oeste del cráter del volcán; el monitoreo geodésico de deformación del flanco sur del volcán; y el monitoreo geoquímico de fuentes termales. Además, se elaboró mapas de peligros volcánicos y se participó en trabajos de comunicación a las autoridades y población como parte del manejo de crisis efectuada por el Gobierno Regional de Moquegua. De igual forma, se participó activamente en el proceso de planificación y evacuación de los pueblos del valle de Ubinas hacia la zona de Chacchagen.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

ACTIVIDAD VOLCÁNICA HISTÓRICA EN EL PERÚ

En el Perú existen más de 400 estructuras volcánicas (Fidel et al., 1997). Actualmente se consideran doce volcanes activos o potencialmente activos: Sara Sara, Solimana, Coropuna, Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Yucamane, Tutupaca y Casiri (Simkim & Siebert, 1994), todos estos se encuentran emplazados en la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC) (De Silva y Francis, 1991) ver figura 1.1.

Históricamente, se han registrado erupciones en siete de estos volcanes (cuadro 1.1). De estos volcanes, el Misti y el Ubinas son considerados el más peligroso y el más activo del Perú respectivamente.

MARCO GEOLÓGICO DEL VOLCÁN MISTI

El Misti (UTM 19K 8196372 m S, 243543 m E, 5822 msnm), es un estrato volcán, situado a sólo 17 km al Noreste del centro de la ciudad de Arequipa, con una diferencia de 3500 m de desnivel que existe entre la cumbre del volcán (5822msnm) y el centro de la ciudad (2300 msnm). El cono volcánico tiene un diámetro aproximado de 17,5 Km (De Silva et al, 1991).

El Misti comprende dos edificios: un estrato volcán «antiguo» erosionado al Oeste (Pleistoceno medio) también llamado Misti 1; un flujo de lava de la base del Misti fue datado en 833 Ka. y un

estrato-cono «moderno» al Este y Sureste que se eleva hasta los 5800 m. (Thouret et al., 1999; 2001). El estrato-cono moderno se ha formado al lado, y se ha superpuesto en parte, al estrato volcán «antiguo» al Oeste y Noroeste y se formó en aproximadamente 112 Ka, en etapas llamadas Misti 2, Misti 3 y Misti 4. Ambos edificios se han formado al menos sobre cinco ignimbritas riolíticas soldadas y no soldadas, que reciben el nombre de «sillares» (Pre Misti) Los cuales observados en la quebrada del río Chili alcanzando más de 300 m de espesor y pertenecen al Plioceno superior. (Thouret et al., 2001)

MARCO GEOLÓGICO DEL VOLCÁN UBINAS

El Ubinas (UTM 19K 8191580 m S, 296790 m E, 5672 msnm), es un estratovolcán, situado a 68 km al Este de la ciudad de Arequipa. Tiene forma de cono truncado, con una altura de 1400 m, desde su base a 4207 msnm.

Según los trabajos de Rivera et al., (1998), Thouret et al., (2005), Rivera (2010), el volcán Ubinas se construyó en dos grandes periodos: Ubinas I; caracterizado por el emplazamiento de coladas de lava andesítica, de 500 m de altura y el colapso del flanco Sur. Ubinas II; este periodo es menor a 370 Ka al presente y se caracterizó por crecimiento de domos, emplazamientos de flujos de lava, formación de calderas, destrucción de domos, colapsos de flanco y actividad explosiva.

Cuadro 1.1
Erupciones volcánicas con registro histórico

Volcán	Erupciones recientes	Referencias
Misti	Años: 50, 655, 1304, 1440-1470. Además 12 crisis fumarólicas y erupciones freáticas desde el año 1550.	Rivera, 2010
Sabancaya	Años: 1460, 1752, 1784. Última erupción registrada entre 1933 - 1997.	Fidel et al., 1997
Ubinas	24 erupciones desde 1550. Última erupción registrada entre 2006 y 2009.	Rivera, 2010
Huaynaputina	Año 1600.	De Silva et al., 1998a, 1998b, 2000; Thouret et al., 1999; Lavallée et al., 2006
Ticsani	1 erupción en los últimos 400 años.	Mariño, 2002
Tutupaca	Años: 1780, 1802, 1862. Última erupción registrada en 1902.	Fidel et al., 1997
Yucamane	Año 1787.	Fidel et al., 1997

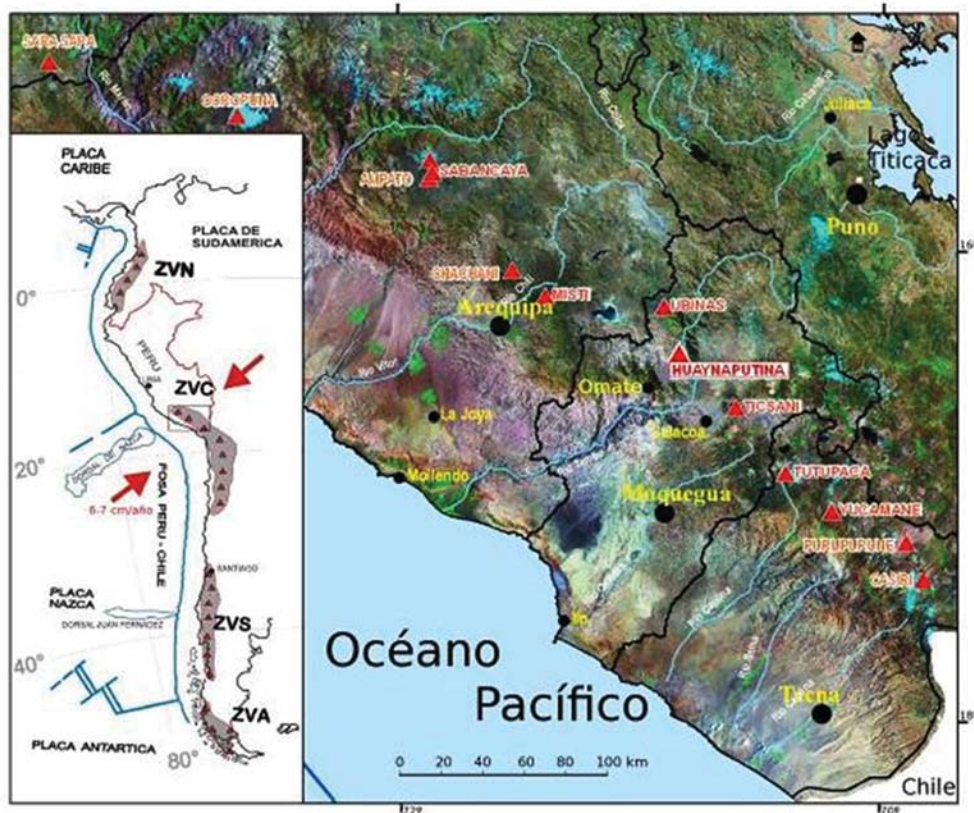


Figura 1.1 Distribución del volcanismo en el sur peruano.

OBJETIVOS GENERALES

- Contribuir al conocimiento de los volcanes del Perú.
- Proveer información sobre el estado actual de los volcanes peruanos.
- Establecer un sistema de monitoreo multidisciplinario en los volcanes Misti y Ubinas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización de los parámetros fisicoquímicos de fuentes termales y fumarolas en los volcanes Misti y Ubinas.
- Establecer redes geodésicas para el monitoreo de deformación de los volcanes Misti y Ubinas.
- Establecer un sistema de monitoreo visual de las emisiones fumarólicas de los volcanes Misti y Ubinas.
- Mostrar los avances en cuanto a implementación instrumental para el monitoreo de los volcanes Misti y Ubinas.
- Establecer la línea base de datos para la comparación con el monitoreo permanente.

EL MONITOREO VOLCÁNICO

Según Banks et al. (1989), el monitoreo volcánico consiste en la aplicación de una serie de técnicas sísmicas, geoquímicas, geodésicas y visuales con la finalidad de observar, registrar y analizar sistemáticamente los cambios que se producen en los volcanes y/o sus alrededores.

El principal objetivo del monitoreo volcánico consiste en detectar oportunamente las condiciones anómalas precursoras que evidencien un proceso eruptivo. Es así que el monitoreo ha permitido evidenciar que la mayoría de erupciones se encuentran precedidas por cambios geofísicos y/o geoquímicos (Tilling, 1989). Estos cambios reflejan el estado interno del sistema volcánico.

Los volcanes: Monte Santa Elena en EE.UU. (Shevenell y Goff, 2000; Vinciguerra et al., 2005), Pinatubo en Filipinas (Harlow et al., 1996) y Redoubt en Alaska (Lahr et al., 1994), constituyen ejemplos representativos de la efectividad del monitoreo volcánico.

En 1980, el volcán Monte Santa Elena erupcionó violentamente tras 123 años de calma. La evaluación del riesgo geológico en

1978 y la observación del incremento de la sismicidad volcánica, permitieron predecir esta erupción con dos meses de anticipación.

En 1988 se instaló el Observatorio Vulcanológico de Alaska (AVO) para el monitoreo de los volcanes próximos a Cook Inlet. El análisis del monitoreo sísmico permitió, 24 horas antes, oficializar la alerta de erupción (14 de diciembre de 1989) del volcán Redoubt (Brantley, 1990).

En 1991, el Servicio Geológico de EE.UU. (USGS) y del Instituto Filipino de Vulcanología y Sismología (PHIVOLCS) instalaron un observatorio móvil para monitorear al volcán Pinatubo-Filipinas (Ewert et al., 1997; Murray et al., 1996). El incremento de la sismicidad volcánica, emisiones de SO_2 , altura de las columnas eruptivas > 15 km (White, 1996; Harlow et al., 1996), condujeron a la evacuación de miles de personas de las zonas circundantes tres días antes de la gran erupción del 15 de junio de 1991.

En términos generales, el monitoreo volcánico se realiza principalmente en función de los métodos sísmico, geoquímico,

geodésico y visual. En el presente trabajo, se describen los métodos geoquímico, geodésico y visual, los cuales se implementaron en los volcanes Misti y Ubinas.

MÉTODO GEOQUÍMICO

El monitoreo volcánico mediante el método geoquímico consiste en el estudio del sistema hidrotermal y la medición sistemática de los parámetros físicos y químicos de los gases volcánicos emitidos. Estos gases fluyen desde el magma hacia la superficie, donde se manifiestan como fumarolas, respiraderos de vapor, fuentes termales, etc. (figura 1.2). El monitoreo geoquímico se divide en el monitoreo de fuentes de aguas termales y monitoreo de fumarolas. Desde septiembre del 2005, INGEMMET está realizando el monitoreo geoquímico de los volcanes Misti y Ubinas. En este boletín se presentan los resultados obtenidos hasta julio del 2012.

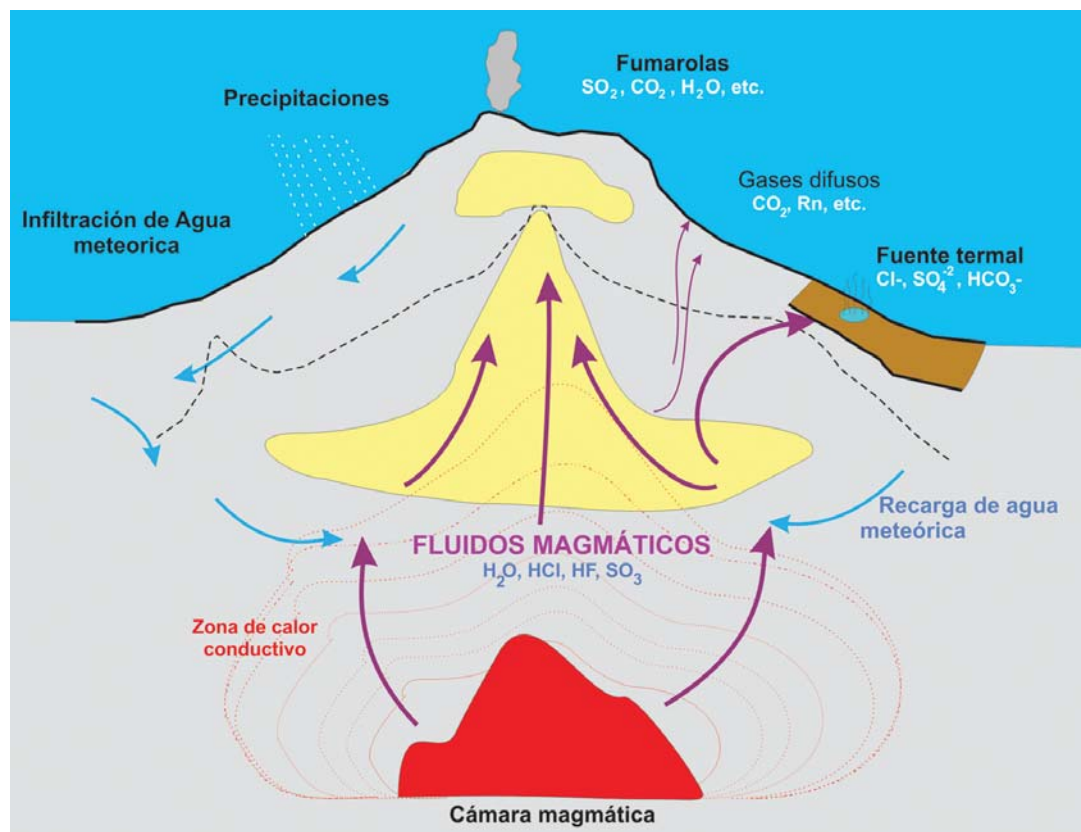


Figura 1.2 Modelo de un sistema hidrotermal y su interacción con los gases volcánicos (modificado de Hochstein & Browne, 2000).

Monitoreo de Fuentes de Aguas Termales

El monitoreo de fuentes de aguas termales consiste en caracterizar químicamente la composición de cada una de las fuentes, posteriormente se selecciona las fuentes más representativas (aquellas que tengan influencia del sistema hidrotermal en la composición química de las aguas), seguidamente se establece el monitoreo continuo de dichas fuentes.

De esta manera, se inició con el muestreo de las fuentes de agua caliente en los alrededores del volcán, tomando un radio de hasta 30 km. En volcanes activos como el Popocatépetl (México), se encontró efectos de la actividad volcánica en fuentes en un radio de hasta 40 km (Martin-Del Pozzo et al., 2002). Seguidamente, para identificar las fuentes, se representan por tres caracteres (letras y/o números) que indican el nombre original de la fuente.

El muestreo del agua se realiza en el punto de surgimiento del agua utilizando la técnica de inmersión simple. Se llena dos botellas de plástico, la primera con 1,0 L para el análisis de los aniones, la segunda con 0,5 L para metales disueltos, esta última previamente

filtrada (0,45 μm) y preservada con ácido nítrico (HNO_3 1:1) hasta llegar a un pH =2. Para el análisis de isotopos δD y $\delta^{18}\text{O}$, la muestra se toma en micro tubos Eppendorf de 2 mL, estos son llenados y cerrados evitando el ingreso de aire.

Adicionalmente se miden los parámetros fisicoquímicos Temperatura (T°) con un termómetro electrónico, el potencial de hidrógeno (pH) con un pH-metro electrónico, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos (TDS) con un conductímetro en el momento del muestreo y en la surgente de la fuente de agua (los detalles de los equipos se pueden observar en el cuadro 1.2 y la figura 1.3).

Por otro lado, se mide la temperatura utilizando registradores de datos en las fuentes de agua, los que se describen en el cuadro 1.3. Los detalles del periodo de lectura y el equipo utilizado se describirán más adelante.

De las mediciones obtenidas en campo, se busca hallar posibles variaciones en el sistema hidrotermal que se pueden asociar a la actividad propia de cada volcán.

Cuadro 1.2
Equipos de medición de los parámetros fisicoquímicos

Equipo	Parámetro	Marca	Modelo	Precisión	Periodos
Termómetro (1)	Temperatura	AA	Precisión	$\pm 0,1$	sep. 2005 – dic. 2011
Termómetro (2)	Temperatura	TECPEL	318	± 0.1	ene. 2012 – jul. 2012
pH-metro (1)	pH	Cyberscan	waterproof	± 0.01	sep. 2005 – dic. 2011
pH-metro (2)	pH	WTW	3210	± 0.001	ene. 2012 – jul. 2012
Conductímetro	CE	HACH	sensION5	$\pm 0.5\%$	feb. 2007 – jul. 2012
Conductímetro	TDS	HACH	sensION5	± 0.1	feb. 2007 – jul. 2012

Cuadro 1.3
Características de los registradores de datos de temperatura

Marca	Modelo	Rango medida	Precisión	Resolución	Memoria/datos
ESPEC	RT-12	Int. (-)10° a 60° C Ext. (-) 40° a 110° C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ (-40 a -20/80 a 110°C)	0.10°C	-8 000
HOBO	UTL-1	(-) 29° a 39° C	$\pm 0.10^\circ\text{C}$	0.27 °C	-7 988
HOBO	U12-15	(-) 40° a 125° C	$\pm 0.22^\circ\text{C}$ a 25° C	0.025°C a 25°C	64 kb (43 000)
HOBO	U23-002	(-) 20° a 70° C	$\pm 0.47^\circ\text{C}$ a 25° C	0.10° C a 25° C	64 kb (43 000)
LASCAR	EL USB-1	(-) 35° a 80° C	$\pm 1.00^\circ\text{C}$	0.50° C	-16 382
TINY TAG	AQUATIC2	(-) 40° a 70° C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ (0 a 50°C)	0.01°C	-32 000

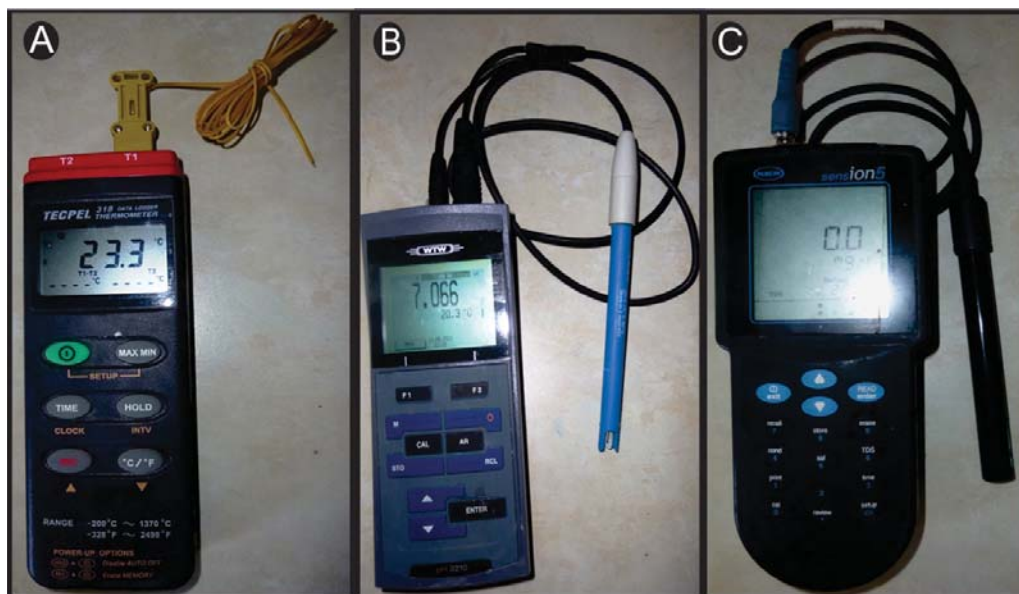


Figura 1.3 Equipos utilizados en el monitoreo geoquímico: (A)Termómetro (B) pH-metro (C) Conductímetro.

El Análisis de las Muestras de Agua

El análisis de las muestras, según la época en que se tomaron, se enviaron a analizar en diferentes laboratorios los cuales son detallados en el cuadro 1.4, mientras que los métodos de análisis se detallan en el cuadro 1.5.

Cuadro 1.4
Laboratorios químicos donde se realizaron los análisis de aguas

Laboratorio	Periodo de análisis	
(1) INGEMMET (A)	sep.2005	dic.2006
(2) CIMM-Perú	may.May-2007	jul.2008
(3) SERVILAB U.N.S.A.	ago.2008	abr.2010
(4) INSPECTORATE	dic.2009	ago.2010
(5) INGEMMET (B)	nov.2010	jul.2012

Cuadro 1.5
Métodos de análisis de aguas y sus respectivas normas de regulación, efectuados en los laboratorios:
(1) INGEMMET A, (2) CIMM-Perú (3), SERVILAB-UNSA, (4) INSPECTORATE, (5) INGEMMET B

Elemento	Método y/o Norma de Referencia	Precisión mg/L
Cloruros	(1) Método volumétrico. Vía clásica.	±2
	(2) Método argentométrico. SMEWW 21. Ed., 2005. Parte- 4500- Cl- B. Pág. 4-70. APHA-AWWA-WEF.	±1
	(3) Método mercurimétrico.	±0.01
	(4) Método de análisis de agua y residuos. EPA 325,3 Cloruro, Valoración, Nitrato de Mercurio. Doc. 20460; EPA 621-C-99-004, Junio 1999.	±1
	(5) Cromatografía iónica	± 0.5
Sulfatos	(1) Método gravimétrico (Ba SO ₄). Vía clásica.	± 2
	(2) Método gravimétrico con secado de residuos. SMEWW 21. Ed., 2005. Parte- 4500-SO42- D. Pág. 4-187. APHA-AWWA-WEF.	± 2
	(3) Método turbidimétrico.	± 0.01
	(4) Método de análisis de agua y residuos. EPA 374,4 Sulfatos (Turbidimétrico). Doc. 20460; EPA 621-C-99-004, Junio 1999.	± 2
	(5) Cromatografía iónica	± 0.5

Cuadro 1.5

Métodos de análisis de aguas y sus respectivas normas de regulación, efectuados en los laboratorios:
(1) INGEMMET A, (2) CIMM-Perú (3), SERVLAB-UNSA, (4) INSPECTORATE, (5) INGEMMET B

continuación

Elemento	Método y/o Norma de Referencia	Precisión mg/L
Bicarbonatos	(1) Método volumétrico. Vía clásica.	± 1
	(2) Método de valoración – alcalinidad. SMEWW 21. Ed., 2005.Parte-2320 B. Pág. 2-27. APHA-AWWA-WEF.	± 1
	(4) Método de valoración – alcalinidad. SMEWW 21. Ed., 2005.Parte-2320 B. Pág. 2-27. APHA-AWWA-WEF.	± 1
	(5) Tritrimétrico	± 1
Metales Disueltos	(2) Determinación de metales y elementos en agua y residuos por plasma de acoplamiento inductivo-espectrometría de emisión atómica. EPA 200.7 Rev. 4.4, 1994.	
	(4) Determinación de elementos traza en agua y residuos por plasma acoplado inductivamente mediante espectrometría de masas. EPA 200.8. Rev. 5.4, 1994.	
Calcio	(1) Método por absorción atómica-flama.	± 0.03
	(2) Determinación de metales y elementos en agua y residuos por plasma de acoplamiento inductivo-espectrometría de emisión atómica. EPA 200.7 Rev. 4.4, 1994.	± 0.05
	(4) Procedimiento para la determinación espectroquímica de elementos totales recuperables por absorción atómica de calcio para muestras por aspiración directa. EPA Métodos para análisis químico de agua y residuos. Doc., 20460; EPA 621-C-99-004, Junio 1999.	± 0.0303
	(5) Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES)	± 0.3
Magnesio	(1) Método por absorción atómica-flama.	± 0.001
	(2) Determinación de metales y elementos en agua y residuos por plasma de acoplamiento inductivo-espectrometría de emisión atómica. EPA 200.7 Rev. 4.4, 1994.	± 0.02
	(4) Método de análisis de aguas y residuos. Doc. 20460; EPA 621-C-99-004, Junio. Procedimiento para determinación espectroquímica de elementos totales recuperables por absorción atómica de magnesio para muestras por aspiración directa. EPA 243.1. 1999.	± 0.0356
	(5) Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES)	± 0.1
Sodio	(1) Método por absorción atómica-flama. APHA AWWA WEF.	± 0.1
	(2) Determinación de metales y elementos en agua y residuos por plasma de acoplamiento inductivo-espectrometría de emisión atómica. EPA 200.7 Rev. 4.4, 1994.	± 0.01
	(4) APHA AWWA WEF, Stándar Méthod for the Examination of Water and Wastewater odoestándar para el examen de aguas y aguas residuales. Ed. 2005. Parte 3050-Na-B.	± 0.0050
	Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES)	± 0.1
Potasio	(1) Método de absorción atómica-flama.	± 0.1
	(2) Determinación de metales y elementos en agua y residuos por plasma de acoplamiento inductivo-espectrometría de emisión atómica. EPA 200.7 Rev. 4.4, 1994.	± 0.01
	(4) Métodos estándar para el examen de aguas y aguas residuales. APHA AWWA WEF, 21. Ed., 2005.	± 0.0237
	(5) Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES)	± 0.2

Los datos obtenidos de los análisis químicos y mediciones de parámetros físico químicos son almacenados en una hoja de cálculo Microsoft Excel 2010 y son graficados para realizar interpretaciones utilizando los programas AquaChem v.5.1 y Golden Software Grapher 9.

La gráficas utilizadas son el diagrama de Piper Hill Langgeliier (Cruz & França, 2006) para identificar los tipos de agua según sus iones mayoritarios, el diagrama Ternario $\text{SO}_4 - \text{Cl} - \text{HCO}_3$ para conocer su posible origen y el geotermómetro Giggenbach (1988) para conocer la temperatura en el reservorio, además de diagramas binarios donde se observa la relación de temperatura – TDS y la composición del agua en función del tiempo.

Monitoreo de Fumarolas

El monitoreo de fumarolas consiste en ubicar los puntos de emanación en donde se miden periódicamente parámetros físicoquímicos y se toman muestras. A estos puntos se les llaman estaciones y son denominados por tres letras del nombre del volcán (Misti: MST y Ubinas: UBN), seguido de un guión la letra F que simboliza la fumarola y un número correlativo. En estos lugares se mide la temperatura utilizando termómetros; en algunos casos, se han instalado registradores de temperaturas cuyos datos son recuperados luego de varios meses.

Adicionalmente se toma muestras de las fumarolas. Para ello se condensa la fumarola utilizando un embudo para captar los gases y vapores, conectado a este va una manguera de silicona la que es refrigerada con paños húmedos y transporta la muestra a los frascos. A estas muestras se les realiza análisis químicos similares a las aguas de las fuentes, se mide el pH con papel indicador. Pero principalmente se ha realizado el análisis de los isótopos estables del agua δD y $\delta^{18}\text{O}$ en el Centro de Isótopos estables Alaska, en el Centro de Investigación del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Alaska, Fairbanks, utilizando análisis por pirolisis elemental-espectrometría de masas de radio isótopos (pirolisis-EA-IRMS) sistema Delta V. Este método utiliza un Thermo Finnigan MAT analizador elemental (TC/EA) y con interfaz III con un espectrómetro de masas Delta V. El reactor de pirolisis de alta temperatura que consiste en un tubo de reacción lleno de carbono vítreo (GC) / grafito y lana de plata. Otras condiciones TC/EA durante el análisis son: temperatura del tubo de pirolisis de 1450 °C, velocidad de flujo de helio de 120 ml / min, columna GC de 3 m con un tamiz de 5 Å mol y la temperatura del horno de 75°C a 100°C. Cada muestra de 0,2 micro litros de agua extraída del agua submuestrese inyecta en la TC / EA con un CTC Analytics

A200SE líquido muestreador automático. Cada muestra se piroliza en H_2 y gas CO y después se separa cromatográficamente. Estos gases se transfieren a continuación al espectrómetro de masas de proporciones isotópicas donde los isótopos se miden. Los valores de $\delta\text{Dv-SMOW}$ y $\delta^{18}\text{Ov-SMOW}$ se presentan en referencia a las normas internacionales de isótopos. También se cumple con las normas de referencia de laboratorio cada siete análisis de muestras. Para cada secuencia de lotes se calibra con el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST normas). Las muestras estándar NIST fueron analizados por duplicado a lo largo de la secuencia. Las estimaciones de error para los análisis son $\delta^{18}\text{O}$ de $\pm 0,4\%$ o mejor, y δD superior a $\pm 3,0\%$.

Los resultados son expresados en diagramas binarios utilizando el patrón internacionalmente aceptado, el V-SMOW (Vienna Standart Mean Ocean Water) (Gonfiantini, 1978), y las interpretaciones para aguas de origen andesíticas (Taran et al., 1989a; Giggenbach, 1992).

Para la determinación cualitativa de Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) se utilizan hojas de papel filtro con solución de Nitrato de Plata (AgNO_3) y hojas de papel filtro con Acetato de Plomo (CH_3CO_2)₂Pb. Estas se exponen en la zona de emanación de la fumarola donde en presencia de H_2S es posible observar cambios en la coloración inicial.

MÉTODO GEODÉSICO

La aplicación del método geodésico en la vulcanología se resume en el estudio del cambio de la forma y tamaño de los edificios volcánicos (Dzurisin, 2007). En la figura 1.4A se muestra un esquema de un volcán activo sin deformación, en la figura 1.4B, el volcán en proceso de deformación debido a la expansión de la cámara magmática. Estos cambios pueden ser medidos con la instalación y monitoreo de puntos geodésicos en la superficie del volcán, tal como se ve en el gráfico. Existen varias técnicas y métodos geodésicos que pueden usarse para el monitoreo de deformación en volcanes.

Técnicas de Monitoreo Geodésico

Existen diversas técnicas para el monitoreo de la deformación de volcanes activos y existen, también, diferentes formas de agrupar estas disciplinas. El Cuadro 1.6 presenta los métodos geodésicos más empleados y sus respectivas variantes. Para el monitoreo de volcanes activos en el Perú se ha contemplado las mediciones con Medición Electrónica de Distancia (EDM), GPS, inclinómetros e interferometría de radar de apertura sintética (InSAR).

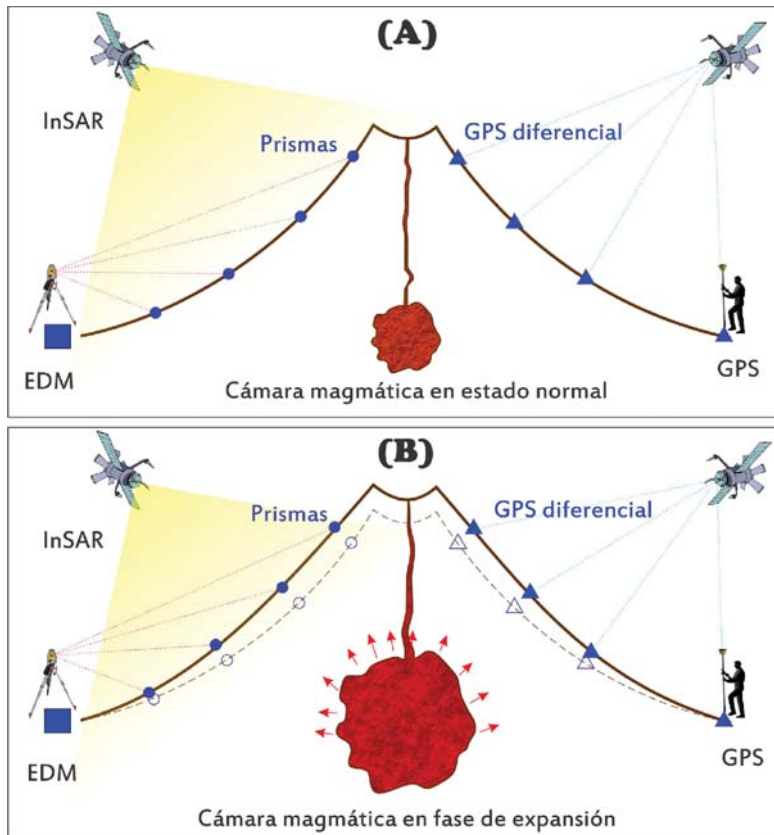


Figura 1.4 A) La superficie volcánica al inicio de un incremento de magma, véase la posición inicial de las estaciones geodésicas. B) El magma asciende y genera inflación y por ende deformación en la superficie del volcán y cambio en la posición de los hitos geodésicos.

Cuadro 1.6
Técnicas de monitoreo de deformación en volcanes (Villar, 2008)

Técnicas de monitoreo		
Horizontales	Redes Geodésicas	Triangulación
		Trilateración
		Redes tridimensionales
	Redes Simplificadas	Angulos y distancias
		Solo distancias (EDM)
	Extensometría	
	GPS	
Verticales	Nivelación Geométrica	
	Nivelación Trigonométrica	
	Nivelación con GPS	
	Interferometría de Radar (InSAR)	
	Gravimetría	
Inclinación	Topografía convencional	Con nivelación geométrica (Inclinometría Seca)
		Con nivelación Trigonométrica
	Uso de superficies líquidas	Lagos y mareas
		Inclinómetros Mecánicos
	Fuerza de gravedad	Inclinómetros de péndulo
	Inclinómetros magnéticos	

Equipos de monitoreo geodésico

El INGEMMET cuenta con tres tipos de instrumentos para monitoreo de deformación: un GPS diferencial (Base y Rover) marca Trimble modelo R6 de doble frecuencia (Figura 1.5), un GPS diferencial

(Base Rover) de frecuencia simple marca THALES modelo ProMark3 (Figura 1.6) y una estación total marca Topcon modelo GPT80002A (Figura 1.7).



Figura 1.5 Foto del receptor GPS Trimble R6.



Figura 1.6 GPS de frecuencia simple marca THALES modelo ProMark3.



Figura 1.7 Estación Total marca: Topcon, modelo GPT-8002A

MÉTODO VISUAL

El monitoreo visual consiste en observar continuamente las condiciones físicas del volcán tales como el aumento o disminución de emisiones fumarólicas, aparición y/o ampliación de grietas, deformación del terreno, actividad magmática en el cráter, ocurrencia de lahares, deslizamientos, movimientos sísmicos intensos, explosiones o pérdida inusual de color o muerte de vegetación.

El monitoreo visual lo realiza un observador a simple vista. Sus observaciones son registradas en una libreta y pueden apoyarse con el uso de binoculares, mediante registros con videocámaras, fotografías, etc. Estas observaciones generalmente se realizan desde puntos fijos estratégicamente preestablecidos, y pueden ser fortalecidos con vuelos de reconocimiento. El análisis de estos registros provee de indicadores cualitativos, los cuales son muy útiles si se llevan a cabo de manera sistemática.

OTROS MÉTODOS

Además de los métodos de monitoreo descritos anteriormente se han empleado herramientas complementarias como las imágenes satelitales GOES, proporcionado por el Instituto de Geofísica y Planetología de Hawaii de Estados Unidos (<http://goes.higp.hawaii.edu>), que permiten conocer la orientación y el desplazamiento de la columna fumarólica y detectar anomalías térmicas considerando el grado de color y nitidez del pixel (Mariño et al., 2011)

Como complemento a los métodos de monitoreo descritos anteriormente, se realizan estudios geofísicos (eléctricos, gravímetros y magnetométricos), que permiten estimar la ubicación de la cámara magmática y su evolución durante la erupción.

La correlación de los diferentes tipos de monitoreo y estudios geológicos, permitirán entender mejor el comportamiento de un volcán activo.

CAPÍTULO II

MONITOREO GEOQUÍMICO DEL VOLCÁN MISTI

Con el objetivo de determinar las fuentes termales que podrían ser propicias para implementar el monitoreo geoquímico en el volcán Misti, en febrero de 2006, se realizaron estudios para la caracterización geoquímica de las fuentes termales del volcán Misti (Masías, 2007; Masías et al. 2008). En este trabajo, se obtuvieron muestras de agua y se midieron los parámetros físicoquímicos de 17 fuentes de agua termales del volcán Misti, ubicadas en un radio de 30 km alrededor de su cumbre. Asimismo, se efectuaron trabajos de identificación de las zonas de emisión de fumarolas en cinco estaciones (MST-F1, MST-F2, MST-F3, MST-F4, MST-F5) donde se realizaron ensayos cualitativos, muestreo, medición de T°, pH y medición continua de T°.

A continuación se presentan y describen los resultados obtenidos en cada uno de los trabajos efectuados entre septiembre de 2005 y julio de 2012.

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS FUENTES TERMALES

En el cuadro 2.1 y en la figura 2.1 se presentan las coordenadas y ubicación geográfica de las 17 fuentes que fueron muestreadas

para la caracterización geoquímica del volcán Misti. Tal como se observa en la figura 2.1, el mayor número de estas fuentes se ubican en el lado sur del volcán, en las cuencas de los ríos Chili (CHV, CHN, CHS, ZEM, PFE, CCZ, TIN) y Andamayo (AGS, BED, YUM, OMI, P2S, JES). Mientras que hacia el lado norte son muy escasas, se reducen las aledañas al río Sumbay (UMA).

Asimismo, se tomaron muestras de las fuentes que se ubican junto al volcán Chachani, en la cuenca del río Yura (QIS, TIG), así como de la fuente MAR, en la laguna Salinas. Las muestras de las fuentes de la cuenca del río Yura y la laguna Salinas fueron obtenidas para verificar el área de influencia del sistema hidrotermal asociado al Misti.

Paralelamente, a los trabajos de muestreo, se midieron los parámetros físicoquímicos: T°, pH, CE y TDS. Los valores de estos parámetros, obtenidos durante los días 17, 18 y 23 de febrero del año 2006, se presentan en el anexo 2.1.

Cuadro 2.1

**Ubicación de las fuentes termales muestreadas para la caracterización del volcán Misti.
Las coordenadas están en UTM (Datum: WGS84)**

N°	Fuente	Código	Coordenadas UTM		Altura (msnm)
			Norte	Este	
1	Charcani V	CHV	8199470	237881	2 960
2	Ojo Chilina 1	CHS	8188537	229125	2 382
3	Ojo Chilina 2	CHN	8188537	229125	2 382
4	Zemanat	ZEM	8186522	228966	2 340
5	Ojo Calle Cuzco	CCZ	8182271	226544	2 245
6	Puente Fierro	PFE	8183977	227885	2 300
7	Tingo	TIN	8181802	226382	2 232
8	Ojo del Milagro	OMI	8177638	237617	2 581
9	Yumina	YUM	8179818	235916	2 569
10	Sabandia	P2S	8179686	233537	2 420
11	Bedoya	BED	8184836	243201	2 913
12	Agua Salada	AGS	8186105	241258	2 896
13	Jesús	JES	8183848	236103	2 640
14	Quiscos	QIS	8209729	215570	2 919
15	Umaluso	UMA	8222575	244548	3 950
16	Tigre	TIG	8202449	212344	2 417
17	Mariposa	MAR	8187191	269600	4 352

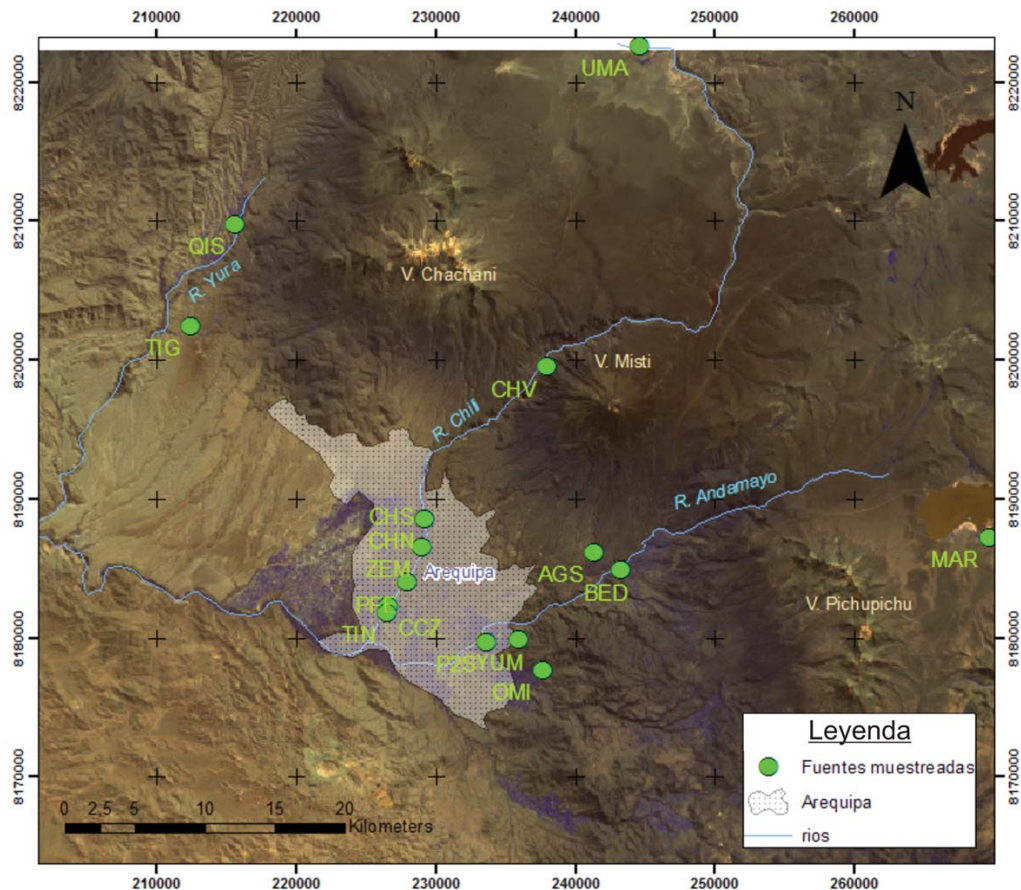


Figura 2.1 Ubicación de las 17 fuentes muestreadas para la caracterización del volcán Misti.

RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Con la información obtenida del muestreo y medición de parámetros fisicoquímicos en las 17 fuentes ubicadas en los alrededores del volcán Misti, Masías (2007) elaboró los siguientes diagramas:

Diagrama de Piper Hill Langelier

De acuerdo al diagrama de Piper Hill Langelier, se han identificado (en función de los iones mayoritarios) tres tipos de agua en las fuentes circunscritas al volcán Misti (Figura 2.2):

- **SULFATO Y/O CLORURO ALCALINAS TÉRREAS ($\text{SO}_4\text{-Cl}/\text{Ca-Mg}$).** A este tipo de agua, pertenecen las fuentes: CHN, CHS, ZEM, YUM, PFE, TIN, OMI y CCZ.
- **CLORURO Y/O SULFATO ALCALINAS ($\text{Cl- SO}_4/\text{Na+K}$).** A este tipo pertenecen las fuentes: UMA, JES, P2S, BED, QIS y MAR.

- **BICARBONATADAS ALCALINAS TÉRREAS ($\text{HCO}_3/\text{Ca-Mg}$).** A este tipo pertenecen las fuentes: AGS, CHV y TIG.

Diagrama Ternario $\text{SO}_4\text{-Cl- HCO}_3$

Con el diagrama Ternario de $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ de Nicholson (1990), se han diferenciado tres grupos de fuentes, en función del posible origen del agua (Figura 2.3).

- **Grupo A.** Corresponde a las fuentes: UMA y JES y podrían tener un origen profundo.
- **Grupo B.** Corresponde a las fuentes: P2S, BED, CHN, CHS, ZEM, YUM, PFE, TIN, OMI y CCZ. El agua de estas fuentes podrían tener su origen en condensados volcánicos, con tendencia a estar diluidos.
- **Grupo C.** En este grupo se encuentran las fuentes AGS y CHV y podrían tener su origen en vapores condensados o ser calentados por vapor.

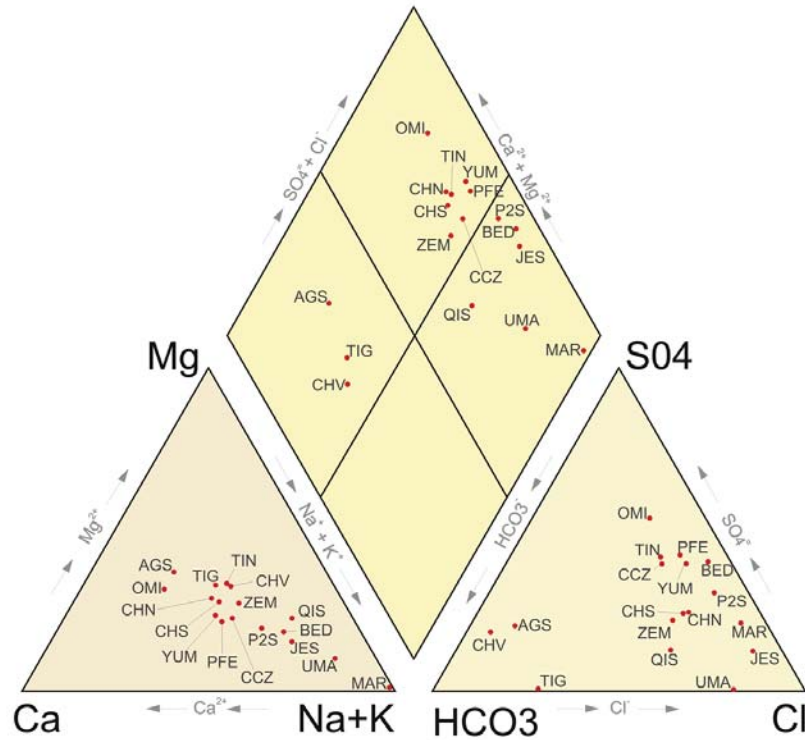


Figura 2.2 Diagrama de Piper Hill Langgelier, donde se identificaron los tres tipos de agua a las cuales pertenecen las fuentes circunscritas al volcán Misti.

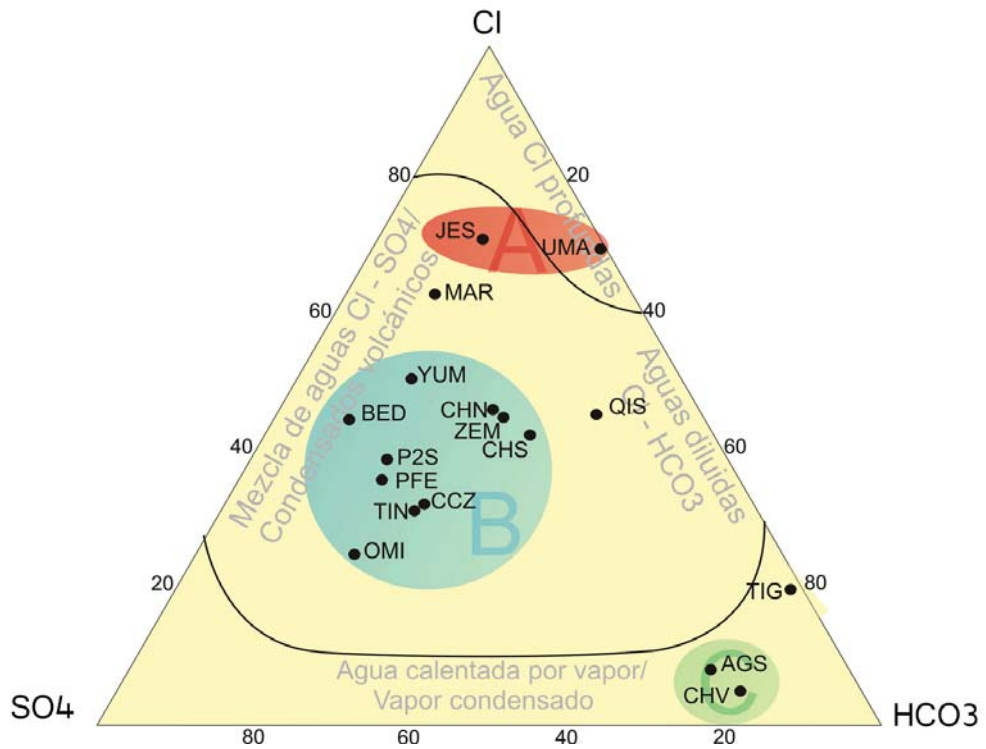


Figura 2.3 Diagrama ternario SO_4 -Cl- HCO_3 (Nicholson, 1990).

Geotermómetro Na-K-Mg

Los resultados obtenidos del geotermómetro Na-K-Mg (figura 2.4) muestran que las fuentes MAR, UMA, JES, QIS y BED se encuentran en la zona de aguas de poco recorrido (inmaduras) y no alcanzan el equilibrio parcial para determinar la temperatura del reservorio; sin embargo, estas fuentes por su composición química (cloruradas neutras, bicarbonatadas) y temperaturas < 100 °C, corresponderían a manifestaciones geotermales de sistemas volcánico-hidrotermales. Según Hochstein et al. (2000), este tipo de sistemas, presentan temperaturas > 40 °C y en el reservorio <125 °C, asemejándose más a un sistema hidrotermal de baja temperatura posiblemente alimentado por un sistema volcánico-hidrotermal alto (en la parte alta del volcán).

Al compilar todos los resultados y las consideraciones geográficas, en el trabajo de Masías (2008) se concluyó que las fuentes de agua UMA, JES, CHV, AGS, P2S, BED, CHN, CHS, ZEM, YUM, PFE, TIN, OMI y CCZ presentarían cierta influencia de fluidos asociados al sistema hidrotermal del volcán Misti. Mientras que las fuentes MAR, QIS y TIG podrían estar asociados a otros sistemas.

Tomando en cuenta estas consideraciones, no se ha encontrado agua con un alto contenido de sulfatos para realizar el monitoreo y el sistema evidencia una baja temperatura; por ello se propuso como fuentes de monitoreo del volcán Misti, a las fuentes más cercanas al edificio volcánico: CHV, AGS (bicarbonatadas), con un origen en vapor condensado y/o agua calentada por vapor, UMA y JES (cloruradas de baja temperatura y con presencia de burbujas) y un origen en fluidos profundos.

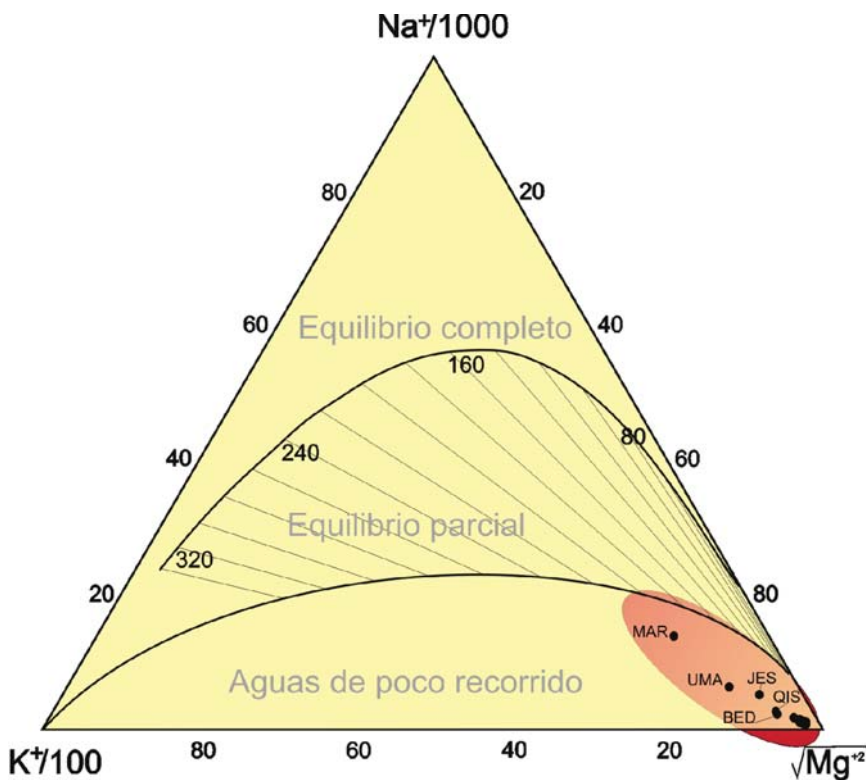


Figura 2.4 Diagrama del Geotermómetro Na-K-Mg de Giggenbach (1988).

MONITOREO DE FUENTES TERMALES

Considerando los resultados de la caracterización geoquímica obtenidos por Masías (2007) y Masías (2008), en el volcán Misti se realiza el monitoreo de cinco fuentes de agua termal: CHV, JES, UMA, AGS y TIN, estas cinco fuentes se encuentran ubicadas alrededor del volcán Misti, en un radio de 30 km (ver figura 2.1).

Del total de las fuentes monitoreadas, CHV es considerada la más representativa por su cercanía al cráter del volcán (6 km) y mayor temperatura (37 °C), y es de esta fuente de donde proviene la mayor cantidad de información acerca de los parámetros fisicoquímicos (T°, pH, CE, TDS) y composición química del agua.

Muestreo y Medición de Parámetros Fisicoquímicos

El inicio del muestreo en cada una de las cinco fuentes termales se puede ver en el cuadro 2.2, mientras que en la figura 2.5, se presenta las fechas de muestreo y medición de parámetros

fisicoquímicos realizados desde septiembre del 2005 a julio del 2012, donde se obtuvieron 183 muestras de agua. En la figura 2.6, se observan las fotos del muestreo y medición de parámetros fisicoquímicos en las fuentes CHV (figura 2.7A), UMA (figura 2.7B), JES (figura 2.7C), AGS (figura 2.7D) y TIN (figura 2.7E).

Cuadro 2.2
Fechas de inicio del muestreo de las cinco fuentes termales que se monitorearon en el volcán Misti

N°	Fuente	Código	Inicio del Monitoreo
1	Charcani V	CHV	Sep-05
2	Jesús	JES	Feb-06
3	Umaluso	UMA	Feb-06
4	Agua Salada	AGS	Feb-06
5	Tingo	TIN	Feb-06

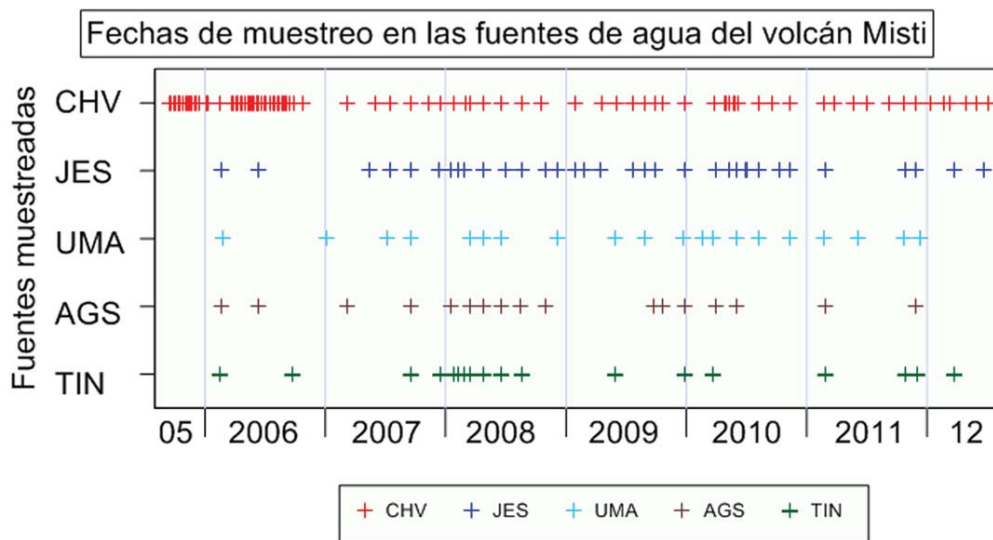


Figura 2.5 Adquisición de datos en las cinco fuentes termales donde se realiza el monitoreo del volcán Misti, entre septiembre 2005 y julio 2012.

Resultados del análisis de las muestras de agua

Los resultados del análisis químico de las 183 muestras obtenidas de las cinco fuentes de agua termales, son presentados en el anexo 1. En este cuadro, se consignan los datos de cada fuente, la fecha de muestreo, los valores de las mediciones de T°, pH, CE, TDS, así como las concentraciones de aniones y cationes.

Con esta información se ha elaborado las gráficas que se presentan a continuación:

a) Relación SO₄/Cl

En la figura 2.7, se presenta los resultados obtenidos del muestreo de fuentes termales expresados en SO₄/Cl. En esta figura se puede observar que en la fuente CHV, el valor más bajo (1,6) se observó en el año 2005, entre los años 2006 y 2011 los valores se han mantenido entre 3 y 5, mientras que en el 2012 se dieron los más altos (6,5). Del resto de fuentes no se observaron variaciones significativas.



Figura 2.6 Fotos de muestreo de agua realizada en las fuentes: (A) Charcani V, CHV; (B) Umaluso, UMA; (C) Jesús, JES; (D) Agua Salada, AGS y (E) Tingo, TIN.

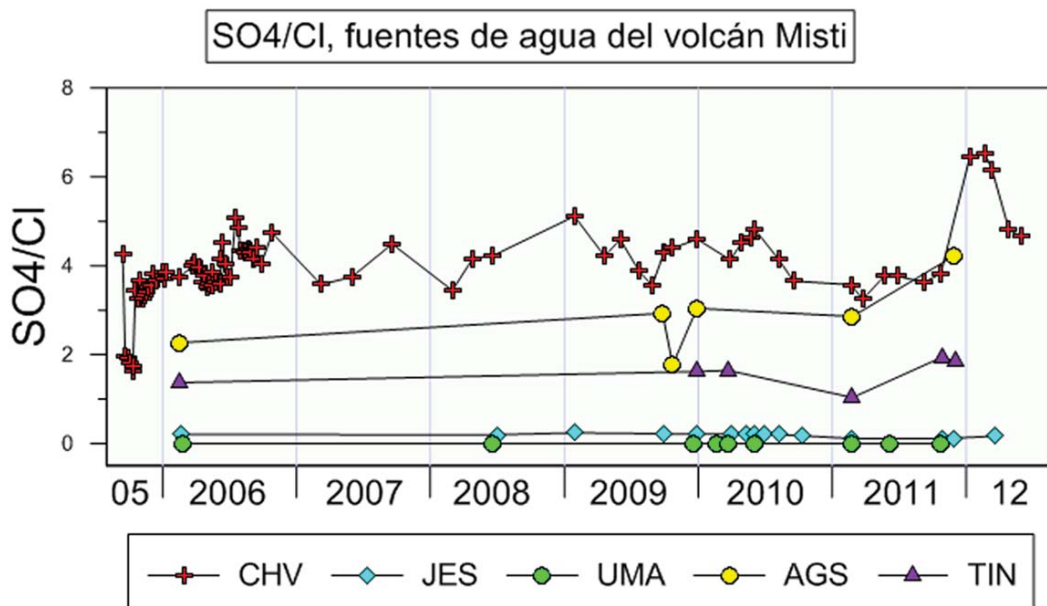


Figura 2.7 Resultados expresados en SO₄/Cl, para las seis fuentes de monitoreo del volcán Misti.

b) Diagrama Ternario SO₄-Cl-HCO₃

En la figura 2.8, se presenta el diagrama Ternario SO₄-Cl-HCO₃ de las cinco fuentes de agua. En este diagrama, se puede observar que en los casi siete años de monitoreo las

fuentes, presentan variaciones que se pueden considerar como un comportamiento normal en periodo de baja actividad volcánica del Misti.

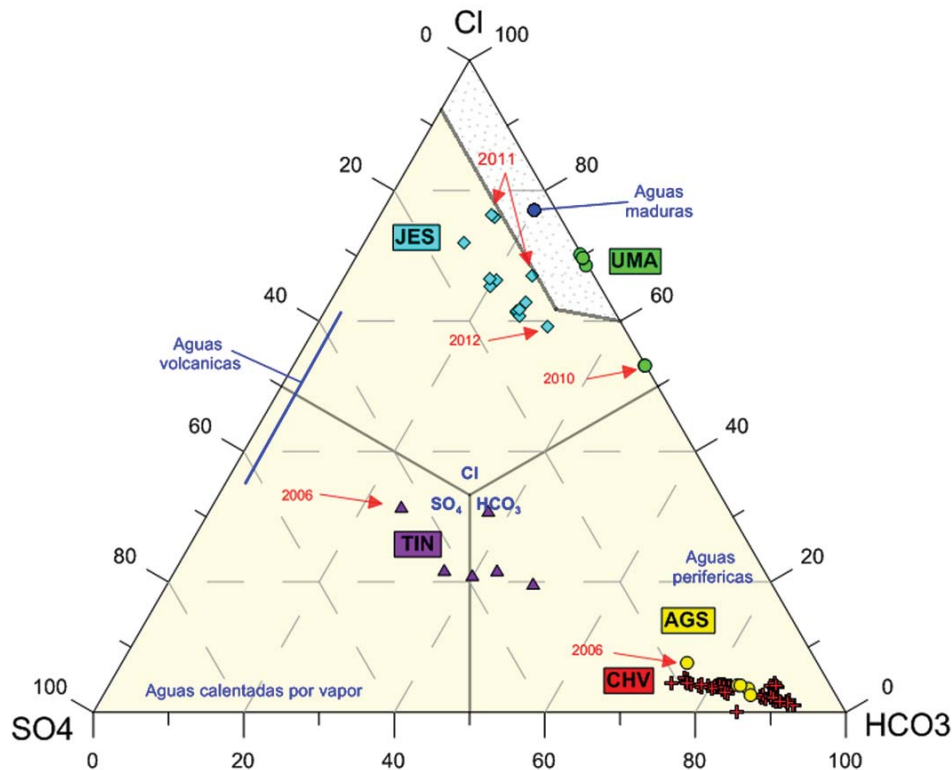


Figura 2.8 Resultados del monitoreo en las fuentes JES, UMA, TIN, AGS y CHV entre el 2005 y 2012, graficados en el diagrama Ternario SO₄-Cl-HCO₃ (Giggenbach, 1988).

Resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos

Al realizar la gráfica donde se compara la temperatura con el TDS (figura 2.9), se observa que las fuentes CHV y JES se encuentran ligeramente distanciadas del grupo principal. CHV presenta una cantidad baja de sales disueltas para su temperatura. Esta baja cantidad de sales podría deberse al aporte de vapor que no contiene sales, mientras que en la fuente JES es posible que el agua se enfríe durante el recorrido a la superficie, explicando la gran cantidad de sales disueltas.

Análisis de Muestras y Medición de Parámetros Físicoquímicos en CHV

En la fuente CHV, al contar con la mayor cantidad de datos obtenidos en periodos de tiempo más cortos, se ha observado importantes

variaciones en los parámetros fisicoquímicos y sales disueltas. La figura 2.10 muestra los resultados obtenidos durante el periodo septiembre 2005 a julio 2012. En dicha figura, se observan los parámetros fisicoquímicos: T° registrada cada 15 y 5 minutos, pH, CE; además se muestran los resultados de la concentración de aniones: Bicarbonato (HCO₃⁻²), Sulfato (SO₄⁻²), Cloruros (Cl⁻); cationes: Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K).

Por otro lado, en esta fuente la temperatura es el parámetro que más se ha medido. En total, se han obtenido 331749 datos en casi siete años de medición continua. Esta fuente presentó una temperatura promedio de 35,26 °C, con ascensos y descensos entre 28,4 °C y 37,8 °C. El límite superior de temperatura presentó una gran estabilidad, esto es debido a que la fuente se encuentra en el fondo de un túnel de más de 300 m donde la temperatura promedio del ambiente es de 23,3 °C.

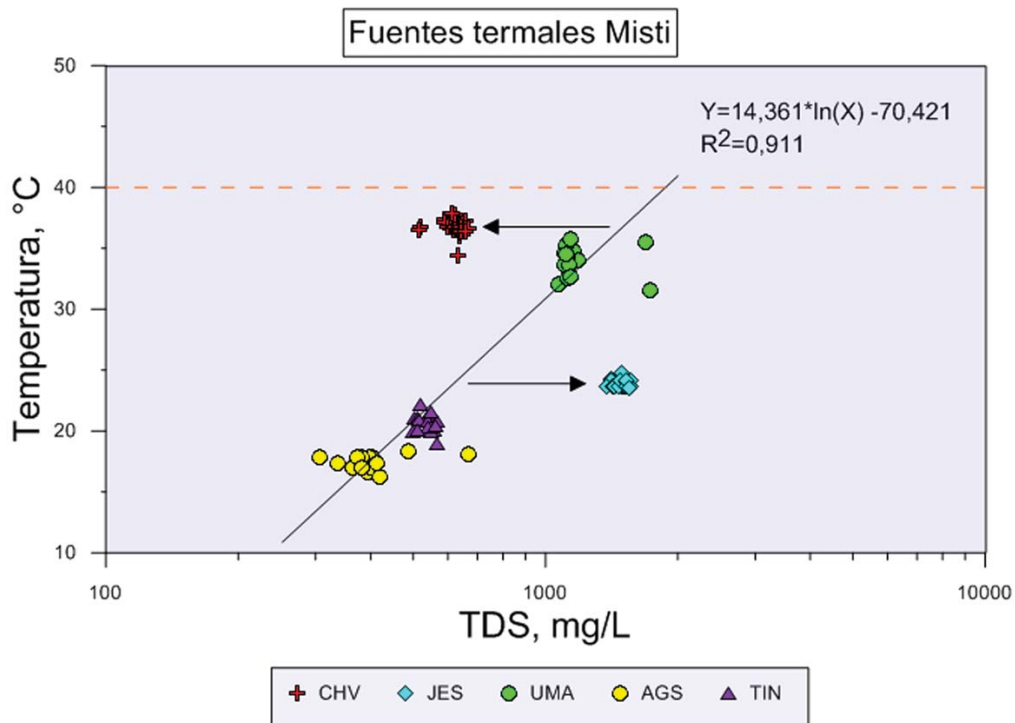


Figura 2.9 Gráfica donde se compara la temperatura con el TDS obtenido de los resultados del monitoreo en las fuentes JES, UMA, TIN, AGS y CHV entre el 2005 y 2012. Las flechas indican las fuentes que no tienen relación directa entre la temperatura y la cantidad de sales disueltas.

Una de las variaciones de temperatura más resaltantes es la que se evidenció desde principios de agosto del 2007; así, 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 disminuyó paulatinamente de 34,2 °C hasta los 29,5 °C durante cinco días, durante los cuales ocurrieron ocho réplicas con magnitud $M_w>5,0$. Posteriormente la temperatura retornó rápidamente a su estado inicial.

Otro hecho resaltante del monitoreo de CHV, es un incremento en la concentración de bicarbonatos que coincide con el menor registro de la temperatura y un ligero aumento en los cloruros en mayo del 2010. Este mes se vio afectado por dos sismos, el de Tacna del 5 de mayo con una magnitud de 6,5 ML (Tavera & Villegas, 2010) y el sismo de Ayacucho el 24 de mayo, con una magnitud de 6,0 ML (IGP, 2010).

El resto de parámetros no han mostrado cambios significativos que evidencien un comportamiento anómalo que se pueda asociar a un incremento de la actividad volcánica.

En general, lo que se esperaría en el caso de producirse un incremento de la actividad es principalmente un aumento de los niveles máximos de temperatura y variaciones en la relación SO_4/Cl , tal como se observó en el agua termal (UBT) del volcán Ubinas, en la última crisis eruptiva (Masías et al., 2012). En el agua termal CHV del volcán Misti no se ha observado variaciones que se puedan asociar con un aumento de la actividad, si no con eventos sísmicos regionales como el sismo de Pisco del 2007 y posiblemente con otros eventos que afectaron levemente el sistema hidrotermal.

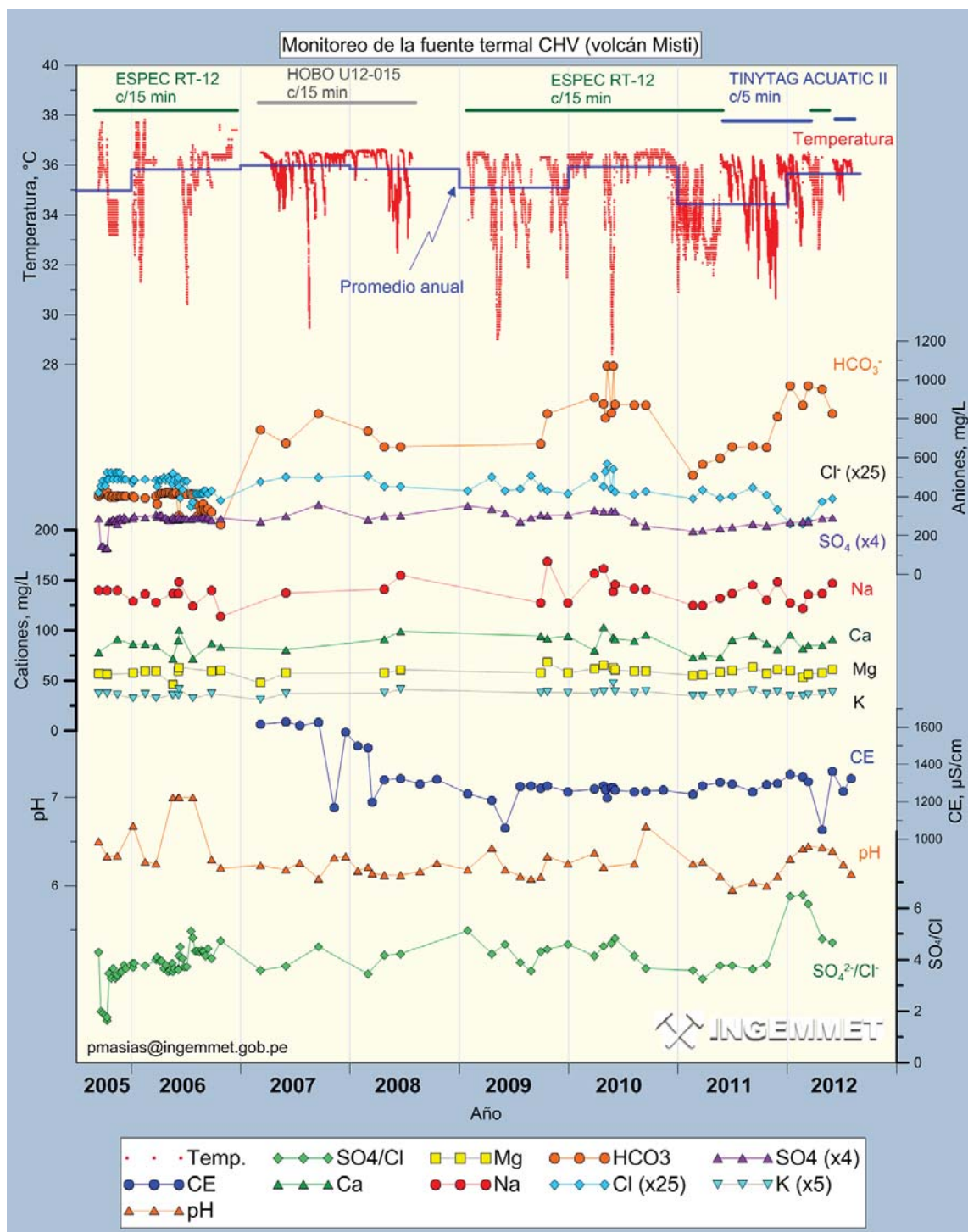


Figura 2.10 Variaciones de la composición química y parámetros fisicoquímicos de la fuente CHV.

MONITOREO LAS FUMAROLAS DEL VOLCÁN MISTI

Las fumarolas del volcán Misti emanan principalmente de la base del cráter donde se encuentra el domo de lava. Estas fumarolas presentan temperaturas superiores a los 200°C, con variaciones que llegaron a 430°C en septiembre del 2001 (Cruz & Masías, 2007); otras zonas de emisión de fumarolas se ubican en los bordes del cráter del volcán.

Identificación de Zonas de Emisión de Fumarolas

Luego de recopilar datos en varias campañas llevadas a cabo entre agosto del 2006 y agosto del 2010 se identificaron ocho zonas de emisión de fumarolas. Además, en la campaña de julio 2011 se pudo observar una gran cantidad de emisiones, es así que las fumarolas del domo superaban ampliamente el borde del cráter (figura 2.11). Con recorridos por el borde del cráter, se completó el mapeo de las emisiones de fumarolas, sobre todo en el borde interno y externo (Figura 2.12).



Figura 2.11 Vista de las fumarolas del domo de lava sobrepasando el borde de la caldera del Misti en julio del 2011.

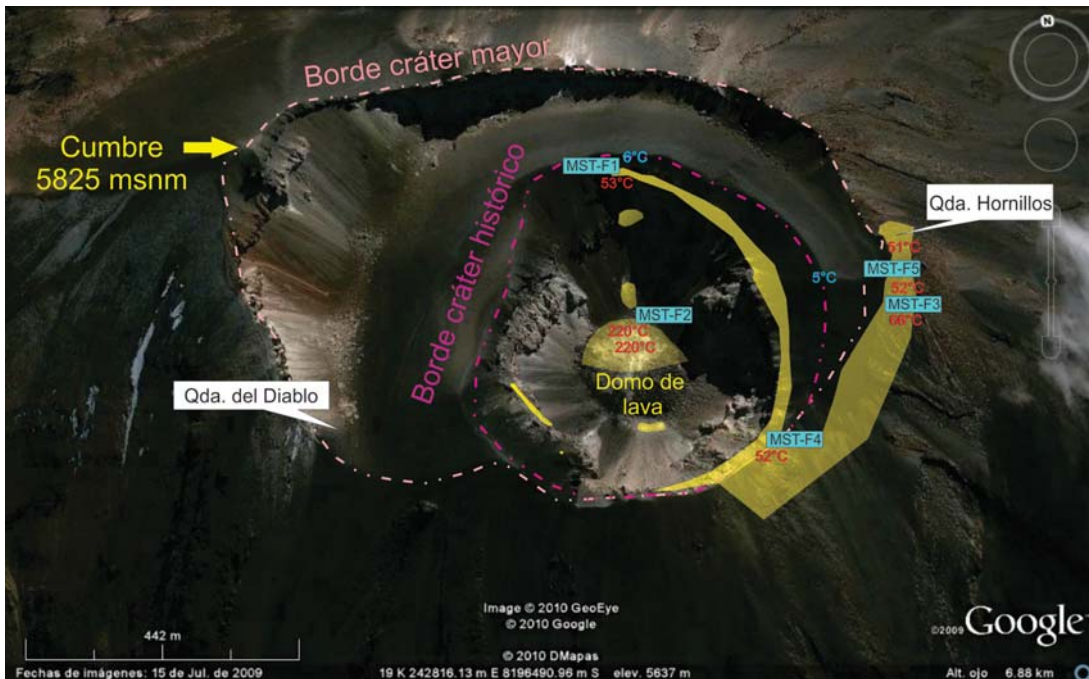


Figura 2.12 Ubicación de las zonas de emisión de fumarolas en el cráter del volcán Misti.

Características de las Zonas de Emisión de Fumarolas

a) Fumarolas del Interior del Cráter y el Domo de Lava

El domo de lava se ubica en el fondo del cráter histórico. Tiene una forma circular con un diámetro aproximado de 150 m, la parte central se eleva alrededor de 15 m por encima del nivel más bajo del cráter (sureste). En los extremos se pueden observar bloques de roca de diferentes tamaños, algunos alcanzan hasta 4 metros de diámetro, los que han caído de las paredes del cráter. Todo el domo está cubierto de una pátina de azufre, que se ha sublimado de las fumarolas; estas emanan del lado norte del domo, en grandes cantidades (aproximadamente 17 puntos de emanación), además existen dos fumarolas bien marcadas en el lado sur del interior del cráter cerca al domo (figura 2.13). Normalmente estas

fumarolas son visibles desde el borde del cráter con alturas de varias decenas de metros, pero en algunas ocasiones cubren todo el cráter y sobrepasan ampliamente el borde de la caldera (ver figura 2.11). Los gases emitidos son irritantes y asfixiantes.

b) Fumarolas del Borde Interno del Cráter

El borde interno del cráter histórico del Misti cuenta casi en su totalidad con fumarolas, las más resaltantes son las del norte y este, aunque se han observado algunas zonas con fumarolas más pequeñas al oeste y sur, el acceso a la mayoría de éstas es muy difícil.

c) Fumarolas del Borde Externo del Cráter

Las fumarolas de esta zona se encuentran desde el noreste (quebrada de Hornillos) hacia el este y sureste. Estas fumarolas son de un acceso más sencillo que las de las otras dos zonas.

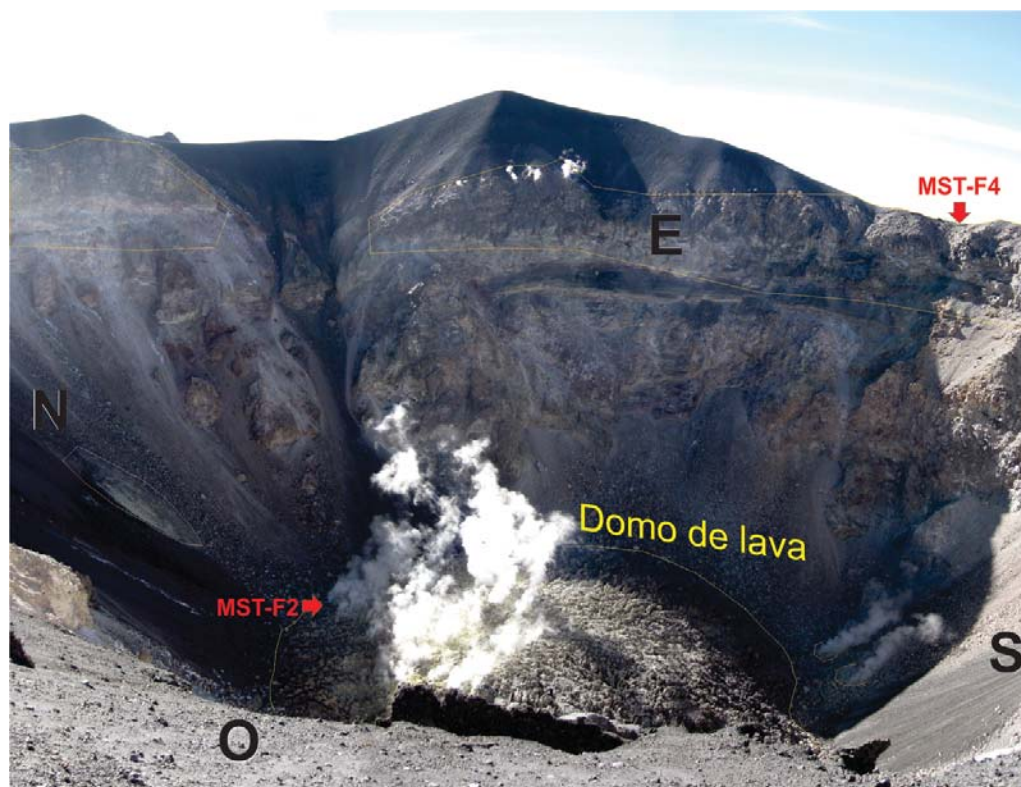


Figura 2.13 Vista del cráter del volcán Misti, donde se observa las zonas de emisión de fumarolas del fondo del cráter y paredes del interior Este.

Estaciones de Monitoreo de las Fumarolas

El INGEMMET realiza el monitoreo de la temperatura de las fumarolas en cinco estaciones (cuadro 2.3). La estación MST-F1 se instaló en el año 2006, posteriormente en octubre del 2011 se instalaron registradores de temperatura en las estaciones MST-F2, MST-F3 y MST-F4. En julio del 2012 se instaló la estación MST-F5. En la estación MST-F2, desde 2009, se realiza la medición, *in situ* de la temperatura del domo y se muestrearon las fumarolas en octubre del 2011 para el análisis de isotopos de los condensados.

Cuadro 2.3

Estaciones de monitoreo de las fumarolas en el cráter del volcán Misti

Estaciones	Zona	Este	Sur	Altura
MST-F1	19K	242925	8196740	5 732
MST-F2	19K	242947	8196522	5 558
MST-F3	19K	243299	8196522	5 723
MST-F4	19K	243122	8196356	5 707
MST-F5	19K	243296	8196510	5 711

Parámetros Físicoquímicos en las Estaciones de Monitoreo de Fumarolas

Los ensayos cualitativos del gas ácido sulfhídrico (H_2S) se realizaron el 27 de marzo de 2010, en las fumarolas de las estaciones MST-F1 (Figura 2.14A) y MST-F3 (Figura 2.14B) y el 3 de junio de 2010, en MST-F2. Para este fin, se utilizaron los papeles indicadores de H_2S . Paralelamente, se midieron dos parámetros físicoquímicos: T° y pH, en el 2011 y 2012, utilizando para ello un termómetro de mercurio, un termómetro digital y papel indicador.

En el cuadro 2.4, se presenta los resultados obtenidos de los ensayos cualitativos. En este cuadro, se observa que en las fumarolas de las tres estaciones de monitoreo: MST-F1, MST-F2 y MST-F3 dieron positivos al H_2S ; mientras que la temperatura en las estaciones MST-F1, MST-F3 y MST-F5 entre el 2009 y el 2012 fueron $46^\circ C$ a $66^\circ C$ y el pH entre 5 y 6, mientras que en MST-F2 la temperatura es de $220^\circ C$ a $> 310^\circ C$ y el pH de 1.



Figura 2.14 A) Ensayos cualitativos del gas ácido sulfhídrico (H_2S), realizados en las fumarolas en el cráter del Misti. A) En la estación MST-F1. B) En la estación MST-F3.

Cuadro 2.4
Estaciones de monitoreo de las fumarolas en el cráter del volcán Misti

Estación	Ensayos Cualitativos		Parámetros		
	Fecha	H ₂ S	Fecha	T°	pH
MST-F1	mar.10	+	jun.09	46	5
MST-F2	jun.10	+	jun.10	> 310	1
MST-F2				210	1
MST-F3	mar.10	+	mar.10	46	5
MST-F3			jul.12	52	
MST-F5			jul.12	66	6

Medición continua de la Temperatura en MST-F1 y MST-F3

La estación MST-F1 fue instalada en agosto del 2006 con apoyo de la ONG Volcán-Explor-Action (VEA, Francia). Inicialmente, se instaló el registrador de temperatura LASCAR USB-1; posteriormente en septiembre del mismo año, se instalaron dos registradores HOBO UTL-1, con apoyo de la Universidad Complutense de Madrid (UCM, España). Estos equipos estuvieron ubicados en tres lugares de la fumarola: el primero (MST-F1 A), se

instaló dentro de una grieta en la boca de la fumarola, el segundo (MST-F1 B) se colgó junto a la fumarola y el tercero (MST-F1) se enterró en el suelo a 35 cm de profundidad y posteriormente se cambió a 50 cm en noviembre 2010, el objetivo fue medir la variación de la temperatura y determinar la posición más óptima. En el 2007 no se continuó con MST-F1 A. En octubre del 2011 el registrador de MST-F1 B (figura 2.15) se reinstaló en MST-F3, protegido del ambiente para medir la temperatura absoluta de la fumarola.



Figura 2.15 Disposición de los registradores de temperatura, estación MST-F1.

Medición de Temperatura en la Estación MST-F1

Del registro continuo de la temperatura en la estación MST-F1 se obtuvieron 12150 datos (MST-F1 A), 85519 datos (MST-F B) y 77219 datos (MST-F1). Mientras que en MST-F3 entre octubre 2011 y julio 2012 se obtuvieron 25274 datos.

Los resultados de la medición de la temperatura desde agosto del 2006 hasta julio del 2012, además de los tipos de equipos y el intervalo de registros de cada uno de ellos en las estaciones MST-F1 y MST-F3, son presentados en la figura 2.16, en esta figura se observa que el registrador MST-F1, tiene una gran amplitud,

producida por el efecto del día y la noche, las variaciones son poco distinguibles. Situación similar ocurre con MST-F1 B. A diferencia de los anteriores, en MST-F1 se nota claramente las variaciones de la temperatura sin el efecto del día y la noche, pero es evidente que existe un efecto producido por la estacionalidad, con temperaturas bajas en invierno y más altas en verano, esto también se pudo observar en MST-F B. Estas condiciones hicieron necesario que se amplie la red de termómetros a fin de no concentrar muchos equipos en un solo punto, por ello se instaló el registrador de MST-F3, pero en este caso se buscó observar si se registra el mismo comportamiento en la temperatura absoluta.

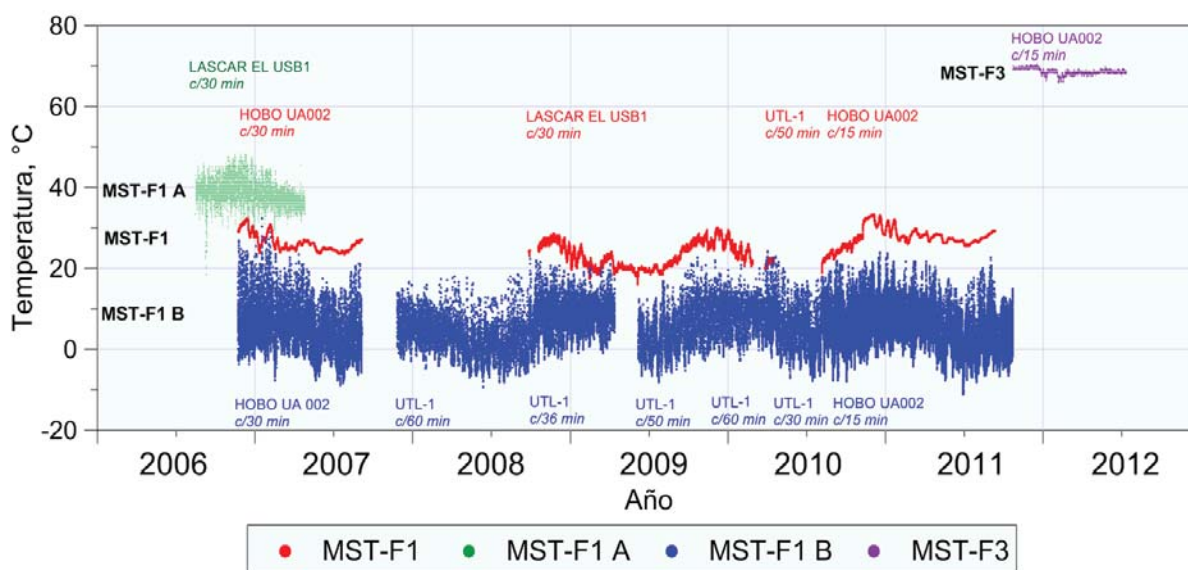


Figura 2.16 Registro de la temperatura en las tres zonas de la estación MST-F1, entre agosto 2006 y noviembre 2010, además se detalla el intervalo de registro y el equipo utilizado.

Otro detalle interesante se observa con mayor amplitud entre los meses de noviembre a febrero, son ascensos y descensos de la temperatura. Al realizar un tratamiento estadístico a los datos de los registradores MST-F1 A y MST-F1 B y compararlos con MST-F1 se observa que también fue registrado (figura 2.17). Al comparar el registro de MST-F1 año por año se puede observar que es un proceso que se repite todos los años (figura 2.18).

En todos los casos no se ha observado cambios que indiquen un aumento en la actividad, aunque en años como el 2011 se incrementó la cantidad de fumarolas (ver monitoreo visual), sin embargo no se han registrado aumentos en la temperatura.

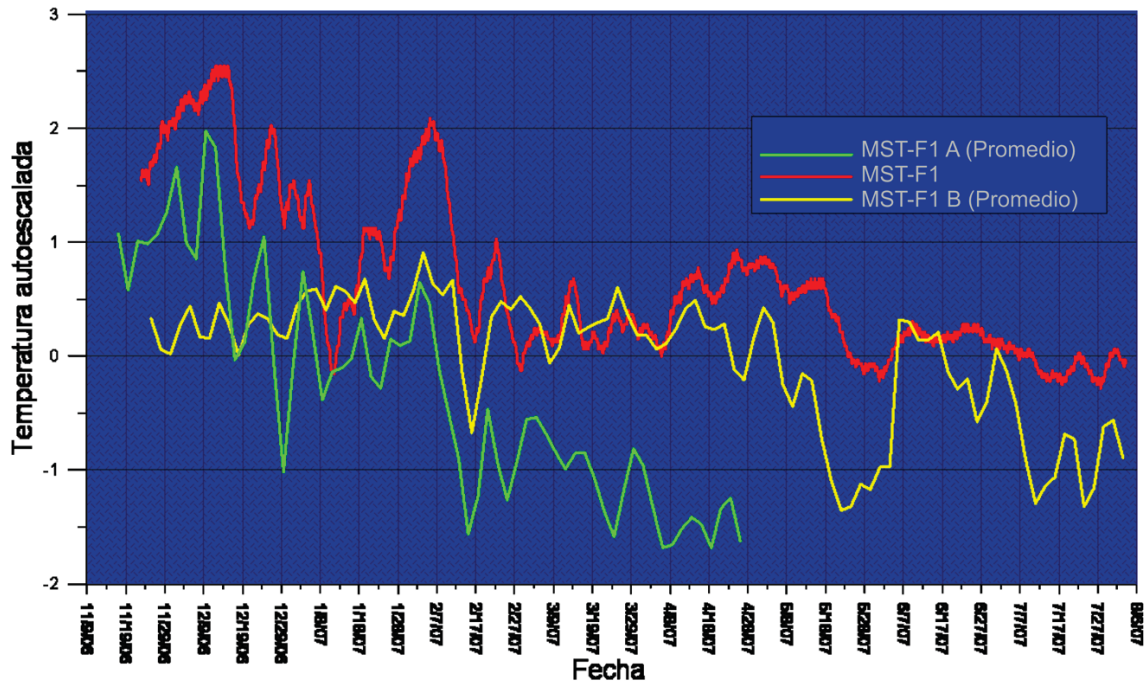


Figura 2.17 Comparación de la temperatura tratada del periodo septiembre 2006 a agosto 2007 de los tres registradores de la estación MST-F1.

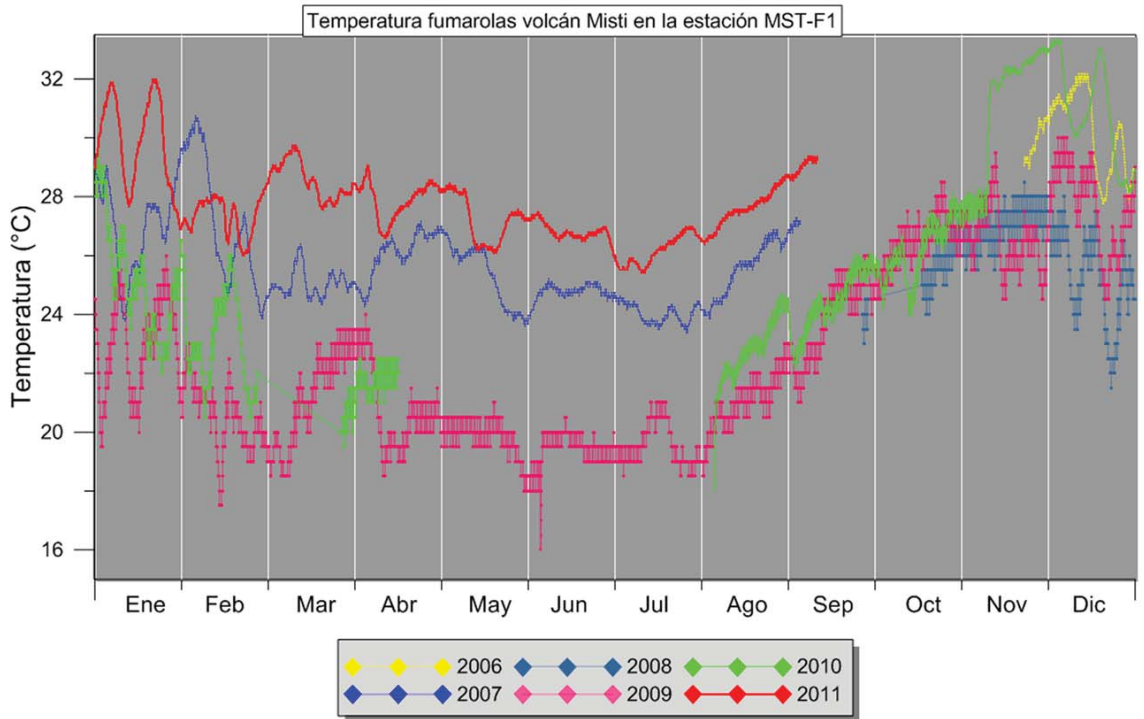


Figura 2.18 Gráfica de la temperatura de MST-F1 por años, del 2006 al 2011.

ANÁLISIS ISOTÓPICO EN LA FUMAROLA MST-F2 Y EL AGUA DE CHV

En cooperación con el PhD Kenji Yoshikawa de la Universidad de Alaska Fairbanks, se analizaron dos muestras para isótopos de hidrógeno y oxígeno. La primera se tomó de los condensados de las fumarolas (MST-F2) obtenida el 23 de octubre del 2011, la segunda muestra se tomó de la fuente CHV el 8 septiembre del 2011. Con fines de comparación en la figura 2.19, se ha graficado los resultados de isotopía tomados en las fumarolas del volcán Misti en julio de 1967 por Birnie & Hall (1974); además se incluyeron algunos datos de isotopía de aguas de fuentes termales consideradas en este trabajo muestreadas en el 2009 por Sulca

(2012). Los resultados de la isotopía nos indican que el agua de las fumarolas del volcán Misti proviene de un origen andesítico, que además se encuentra diluido con aguas meteóricas, mientras que el agua de la fuente termal CHV tienen un origen freático y posiblemente un componente magmático mínimo. Lo que se puede interpretar que el Misti tienen un sistema hidrotermal en la parte alta del volcán alimentado por componente magmático proveniente de la chimenea, mientras que el edificio volcánico es un gran colector del agua freática, la que alimenta los manantiales de los alrededores del volcán, que en su recorrido arrastra parte del componente magmático del sistema hidrotermal de la parte alta del volcán, lo que también se observó en la caracterización de las fuentes de agua.

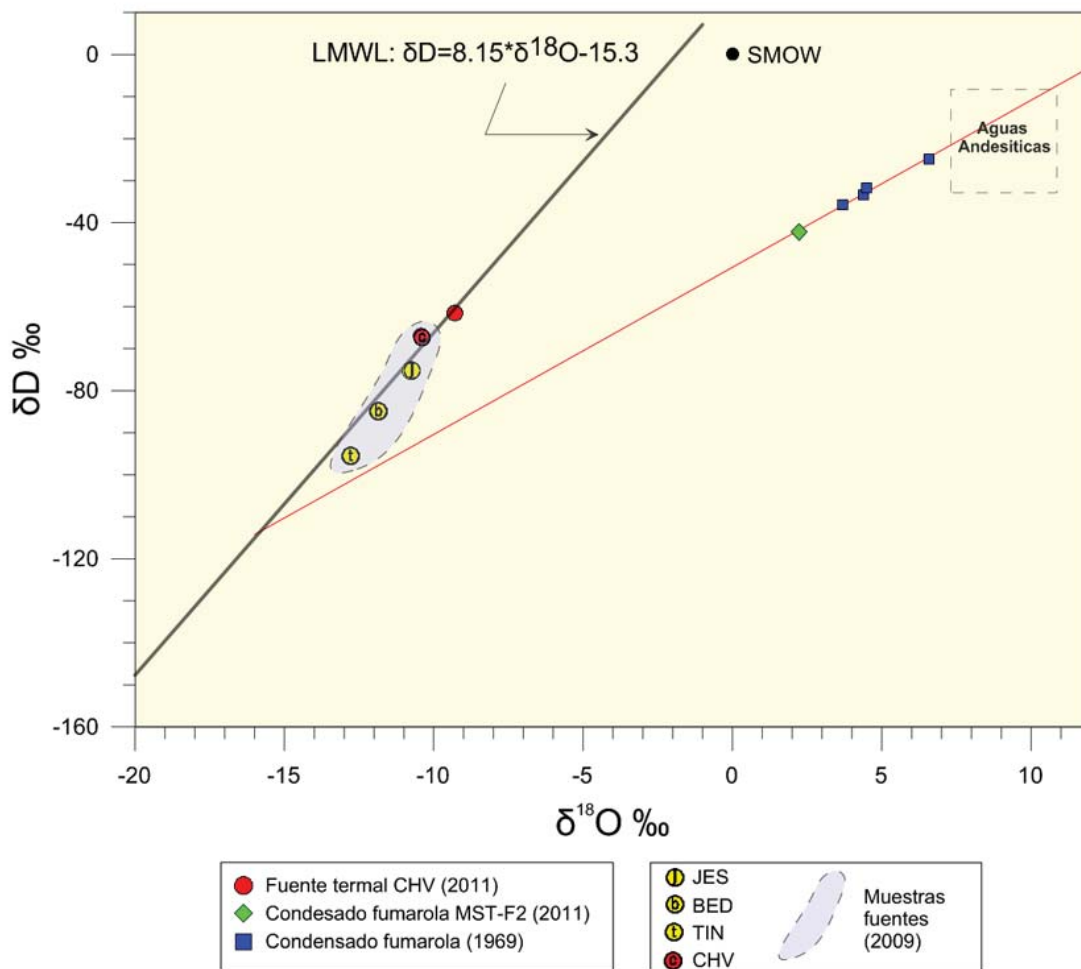


Figura 2.19 Resultados de los isótopos estables del Agua (Hidrógeno y Oxígeno) muestreados en el 2011 en las fumarolas del cráter del Misti y en la fuente CHV, además se incluyeron resultados de isótopos de las fumarolas del cráter del Misti tomadas en 1967 (Birnie & Hall, 1974), de fuentes de agua muestreadas en el 2009 (Sulca, 2012), la línea de aguas meteóricas para el desierto de Atacama (Chaffaut et al., 1998) y la zona de las aguas andesíticas (Taran et al., 1989b; Giggenbach 1992).

CAPÍTULO III

MONITOREO GEODÉSICO DEL VOLCÁN MISTI

El monitoreo de geodésico del volcán Misti durante el periodo comprendido entre junio de 2008 y julio de 2012 involucró la etapa de implementación de la red geodésica, lecturas de distancias con el método EDM y lecturas de datos GPS. En tal sentido, se ha considerado la instalación de monumentos para el monitoreo con EDM y GPS. Por otro lado, se han hecho análisis de imágenes satelitales con la técnica de InSAR, con ello se ha sentado la línea base a partir de la cual se continúa con el monitoreo periódico del volcán usando técnicas geodésicas.

MODELO TEÓRICO DE DEFORMACIÓN

En el Misti, se ha empleado el modelo de deformación básico para volcanes planteado por Mogi (1958). Para aplicar este modelo en el Misti, se requieren de diferentes parámetros físicos. Se ha empleado estos parámetros de estudios previos y se infirió algunos por analogía con otros volcanes similares. En tal sentido se han definido valores para cada una de las variables empleadas por el algoritmo de Mogi (figura 3.1), con ello se calculan valores referenciales de deformación en el volcán. Los resultados muestran el desplazamiento vertical y horizontal en función de la distancia radial desde el cráter del volcán.

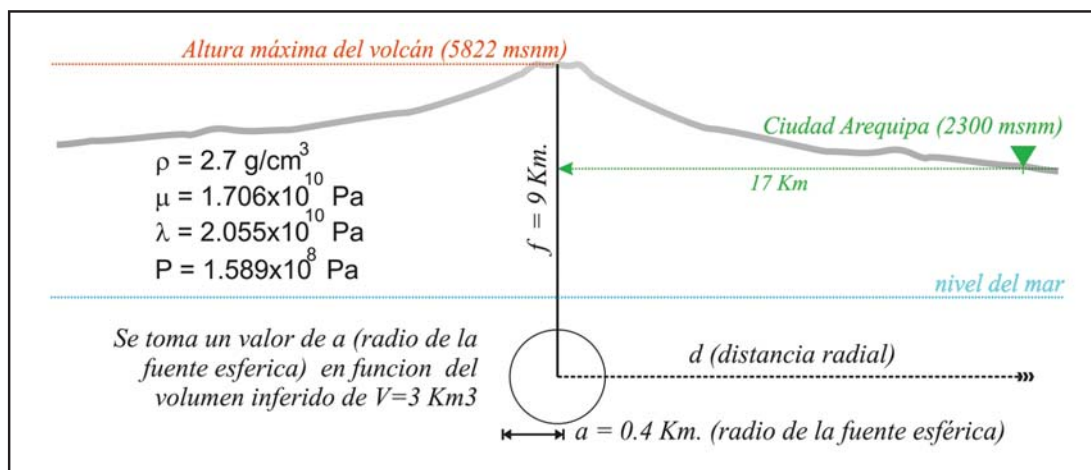


Figura 3.1 Parámetros físicos que se consideraron en el cálculo teórico de deformación para el volcán Misti, usando el modelo de Mogi.

En la figura 3.2, se presenta los resultados de este cálculo para el volcán Misti, los cuales permiten conocer, de manera referencial, a qué distancias del cráter del volcán se presentarán las mayores deformaciones tanto en la componente vertical como en la horizontal. Sin embargo, en estos resultados, los valores de deformación deben ser tomados como referencia, ya que los valores de los parámetros físicos son aproximados y en algunos casos deducidos, de manera que los resultados pueden variar dependiendo de la profundidad de la fuente y el radio de la misma. En todo caso el modelo indica que las mayores deformaciones verticales se presentarían hasta 2 km del centro volcánico y las variaciones

horizontales hasta 6 km del centro. La magnitud de las deformaciones dependen de la etapa de deformación durante el proceso eruptivo y los resultados presentados muestran la deformación mínima esperada y esta va hasta 30 mm de deformación en la componente vertical.

Con la aplicación de este modelo de deformación básico se inician los trabajos de monitoreo de deformación en el volcán Misti, sin embargo este modelo es preliminar y está sujeto a mejoras en función de nuevos estudios que se realicen para conocer mejor las características del volcán.

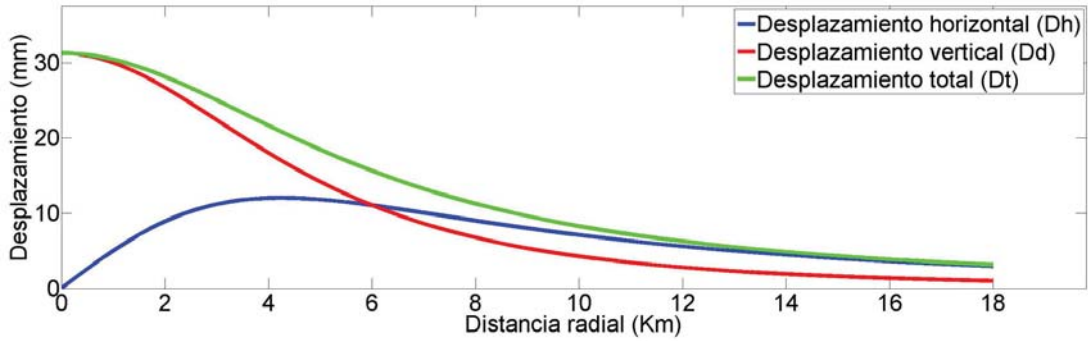


Figura 3.2 Resultados de los cálculos de deformación a partir del modelo teórico de Mogi (1958)

CONSIDERACIONES GEOLÓGICO-ESTRUCTURALES

Uno de los factores que se consideró para el diseño de la red de monitoreo geodésico es el aspecto geológico, que aporta elementos de análisis con respecto las zonas de mayor inestabilidad estructural. Es así que se han identificado dos zonas con estas características, el flanco oeste, en donde se aprecia muy claramente una cicatriz asociada a una zona de colapso y el flanco sur (Thouret et al., 2001) esto se puede ver en la figura 3.3. Es el flanco oeste el de mayor inestabilidad, por lo que se propone instalar hitos de monitoreo en estas áreas que nos permita conocer la evolución de un eventual

deslizamiento, además de la deformación inherente a la actividad volcánica.

Por otro lado, para descartar y/o confirmar que las probables anomalías que se encuentren sean por efectos de un deslizamiento o por fenómenos propios del volcán, se ha propuesto la instalación de un perfil para la Medición Electrónica de Distancias (EDM) en el flanco este del volcán por considerarse como el más estable o menos propenso a sufrir un colapso de flanco o deslizamiento, de manera que nos permita tener información sobre la eventual deformación relacionada a la actividad magmática y/o conducto volcánico.

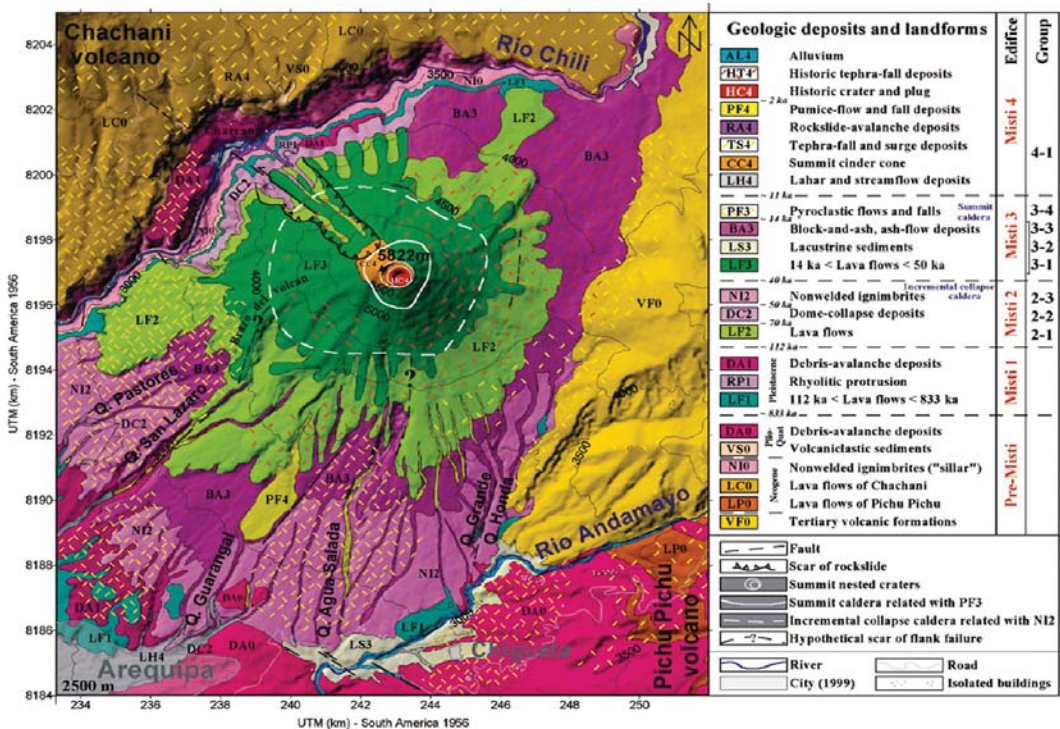


Figura 3.3 Mapa geológico del volcán Misti en donde se han delimitado las zonas inestables en los flancos oeste y sur (tomado de Thouret et al., 2001).

CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO

La construcción e instalación de las estaciones de monitoreo comprende dos tipos de trabajos: la construcción de bases o monumentos para la Estación Total y GPS, además de la instalación de reflectores o prismas en los flancos del volcán.

Pilares de Concreto

Para la instalación de la Estación Total se requiere de estructuras robustas y estables que permitan realizar mediciones de distancias

con una altura de referencia invariable entre cada medición. En tal sentido, se consideró el uso de pilares de concreto, estos pilares tienen una altura de 1.2 metros, contruidos en concreto con un soporte de fierro corrugado y según el terreno en donde se construyeron. Estas estructuras presentan zapatas y cimientos para estabilidad en suelo blando o anclaje en roca para afloramientos rocosos (en la figura 3.4 se presenta el croquis y un ejemplo de estos pilares contruidos en el volcán Misti).

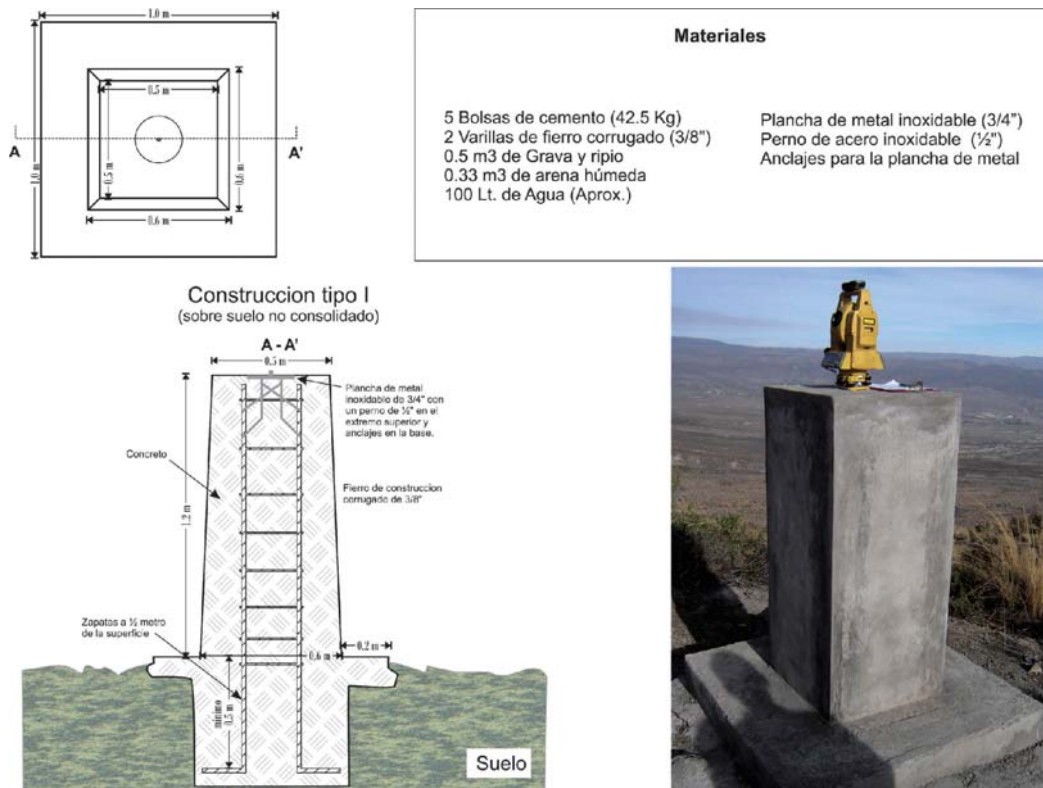


Figura 3.4 Planos estructurales de los monumentos que son usados como bases para EDM y GSP. Además se acompaña una foto donde muestra el monumento terminado y en uso.

Instalación de Prismas

Otro de los trabajos realizados fue la instalación de reflectores (prismas) en diferentes flancos del volcán, para implementar la red de monitoreo con EDM. Inicialmente la instalación de los reflectores se realizaba anclando con concreto sobre coladas de lava, sin

embargo, para el caso del volcán Misti se emplea un sistema de instalación más eficiente en cuanto a tiempo y personal, básicamente la instalación consiste en anclar pernos de expansión en rocas estables (coladas de lava), usando una broca diamantada. En la figura 3.5 se muestra una secuencia de la instalación de un prisma realizado en el volcán Misti.

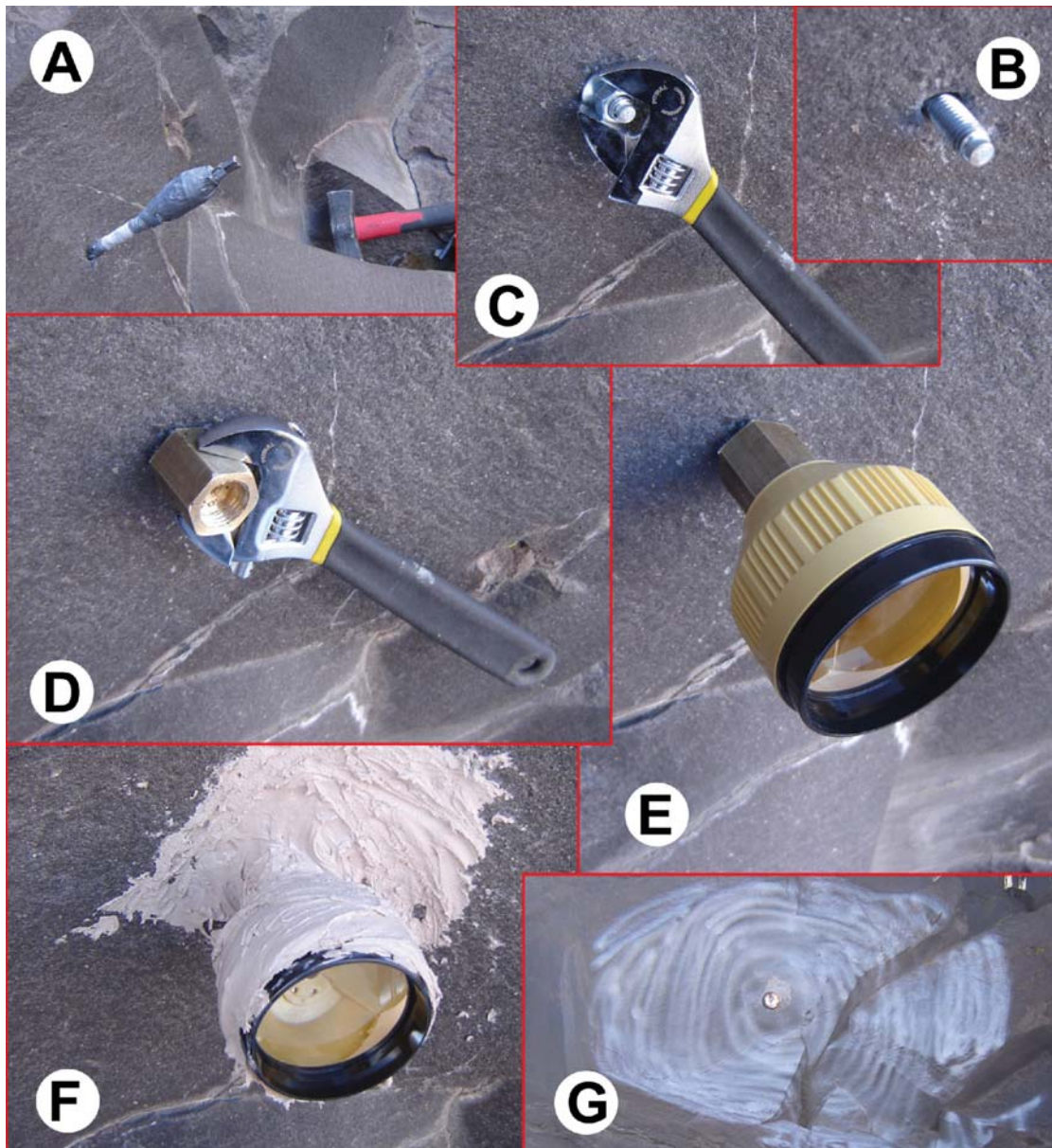


Figura 3.5 Secuencia de la instalación de un prisma con perno de expansión. (a) se perfora manualmente, (B) se ancla el perno de expansión, (B) (D) y (E) mediante un adaptador de bronce se acopla el prisma al perno y se ajusta untando pegamento para metal, (F) se protege el prisma con masilla plástica y (G) se pinta el punto para la ubicación con la estación total.

RED DE MONITOREO DE DEFORMACIÓN

Bajo las consideraciones anteriormente descritas, para el volcán Misti se han construido seis bases, que cubren los diferentes flancos del volcán (cuadro 3.1, figura 3.6). En ese sentido, el proceso de implementación de la red geodésica para el monitoreo periódico de deformación del volcán Misti usando GPS y EDM tiene un avance del 90%, en la figura 3.6 podemos ver la red de monitoreo: en azul los hitos construidos para EDM/GPS y los prismas

instalados, en rojo están las estaciones y reflectores que faltan implementar y en morado el perfil de GPS diferencial. En total se ha previsto la instalación de 25 prismas distribuidos en los flancos sur, oeste, noroeste, noreste y seis bases EDM/GPS y un perfil de GPS diferencial compuesto de ocho puntos de reiteración.

Como parte de la red de monitoreo permanente también se ha previsto la instalación de estaciones inclinométricas y estaciones GPS para la transmisión de datos vía telemetría en tiempo real al Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

Cuadro 3.1
Listado de las estaciones, bases y prismas instalados y los propuestos para el monitoreo de deformación
en el volcán Misti (hasta julio de 2012)

Nombre	Equipo	Código	Longitud	Latitud	Altura
Base Sur 2	EDM	MBS2	-71.420428	-16.34032	3 641
Base Sur 4	EDM	MBS4	-71.43669	-16.34309	3 566
Base Sur 1	EDM/GPS	MBS1	-71.42004	-16.34484	3 498
Base Sur 3	EDM/GPS	MBS3	-71.43771	-16.3483	3 440
Base oeste cultivos	EDM/GPS	MBCU	-71.46061	-16.26369	3 192
Base oeste torre	EDM/GPS	MBTO	-71.46668	-16.27464	3 257
Misti Base Chachani	EDM/GPS	MBCH	-71.436698	-16.244247	3 856
Misti Base Tambo	EDM/GPS	MBTA	-71.36088	-16.30293	4 053
Prisma Sur 1	Prisma	MPS1	-71.412121	-16.303313	5 417
Prisma Sur 2	Prisma	MPS2	-71.40941	-16.30742	5 212
Prisma Sur 3	Prisma	MPS3	-71.41624	-16.31841	4 506
Prisma Sur 4	Prisma	MPS4	-71.41986	-16.30916	4 825
Prisma Sur 5	Prisma	MPS5	-71.42716	-16.32049	4 222
Prisma Cruz	Prisma	MPCR	-71.41274	-16.29398	5 653
Prisma Oeste 1	Prisma	MPW1	-71.41427	-16.2905	5 409
Prisma Oeste 2	Prisma	MPW2	-71.41831	-16.28763	5 083
Prisma Oeste 3	Prisma	MPW3	-71.42373	-16.28228	4 577
Prisma Oeste 5	Prisma	MPW5	-71.42664	-16.29049	4 966
Prisma Oeste 6	Prisma	MPW6	-71.44612	-16.28973	3 934
Prisma Oeste 4	Prisma	MPW4	-71.417702	-16.293582	5 400
Prisma Oeste 7	Prisma	MPW7	-71.437256	-16.282554	4 180
Prisma Norte 4	Prisma	MPN4	-71.422818	-16.272853	4 302
Prisma Norte 1	Prisma	MPN1	-71.41055	-16.29161	5 604
Prisma Norte 2	Prisma	MPN2	-71.41267	-16.28531	5 274
Prisma Norte 3	Prisma	MPN3	-71.41582	-16.28023	4 919
Prisma Este 1	Prisma	MPE1	-71.40205	-16.2988	5 445
Prisma Este 2	Prisma	MPE2	-71.39434	-16.29976	5 163
Prisma Este 3	Prisma	MPE3	-71.38336	-16.30317	4 465
Perfil GPS 1	DGPS	MPG1	-71.407714	-16.299067	5 770
Perfil GPS 2	DGPS	MPG2	-71.409485	-16.303626	5 545
Perfil GPS 3	DGPS	MPG3	-71.413536	-16.310117	5 001
Perfil GPS 4	DGPS	MPG4	-71.416272	-16.318198	4 555
Perfil GPS 5	DGPS	MPG5	-71.415825	-16.329645	3 991
Perfil GPS 6	DGPS	MPG6	-71.420112	-16.34485	3 560
Perfil GPS 7	DGPS	MPG7	-71.429768	-16.358384	3 291
Perfil GPS 8	DGPS	MPG8	-71.438209	-16.379344	3 049
Telemetría	Inclinometro	MST3	-71.419648	-16.307831	4 900
Telemetría	GPS	MST1	-71.398458	-16.299772	5 400

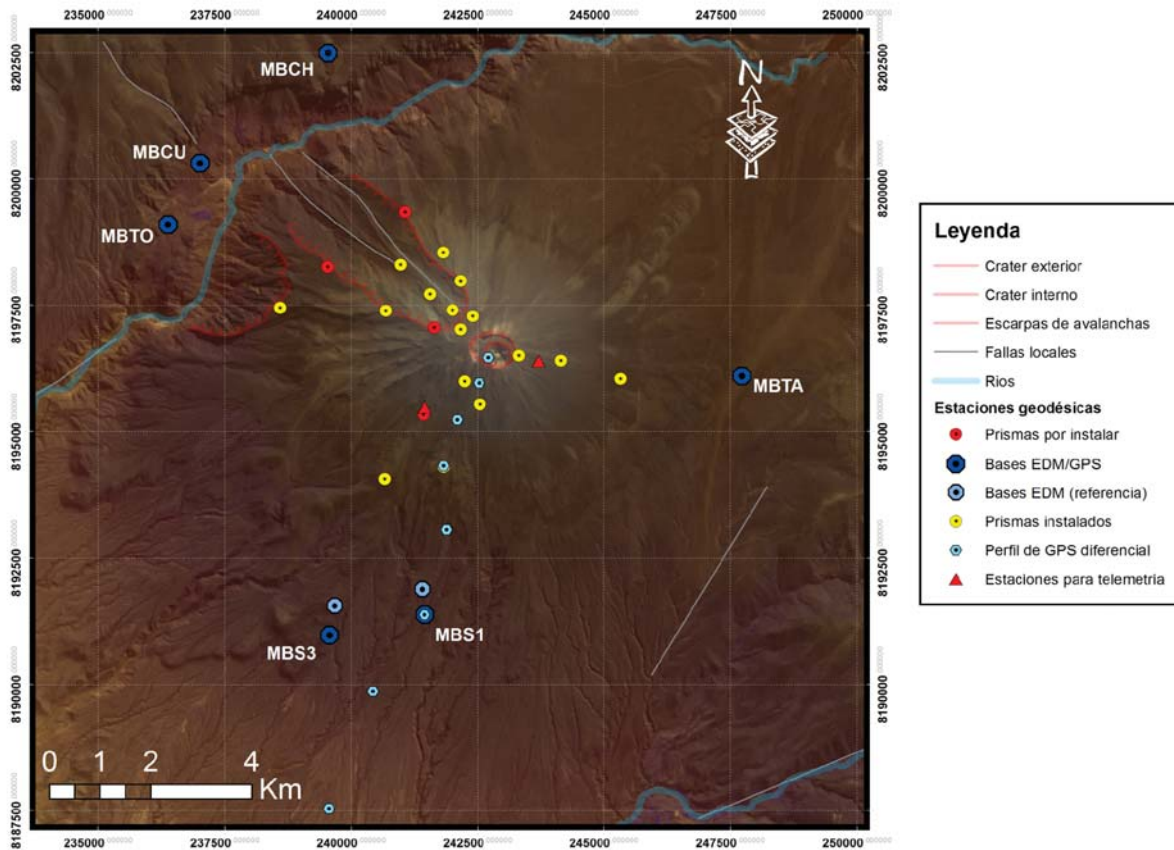


Figura 3.6 Diseño de la red geodésica para el monitoreo de deformación en el volcán Misti.

RESULTADOS DEL MONITOREO CON EDM

Los datos procesados corresponden al periodo de trabajo de los años 2010-2012. Se han preparado gráficos con la variación de las distancias en milímetros entre cada campaña de lectura, es así que se presentan las curvas de tendencia de la variación de distancia para cada uno de los pares Base-Prisma de la red de monitoreo con EDM en el volcán Misti.

En las figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 se muestran los resultados de EDM en el volcán Misti. En términos generales, no se ha presentado una variación sustancial que permita interpretar

una deformación en el volcán, dado que todas las oscilaciones están dentro del rango de error del equipo. Por otro lado, los periodos de registro varían en función del inicio de las medidas, teniendo algunas líneas de distancia con mayor tiempo y otras con menor o de irregular muestreo, esto se debe a que la instalación se realizó de manera progresiva, e incluso se ha planificado instalar más prismas posteriormente, y por otro lado un factor que influye en mayor medida en la toma de datos EDM, es el factor climático, pues la nubosidad y la nieve impiden muchas veces realizar las lecturas.

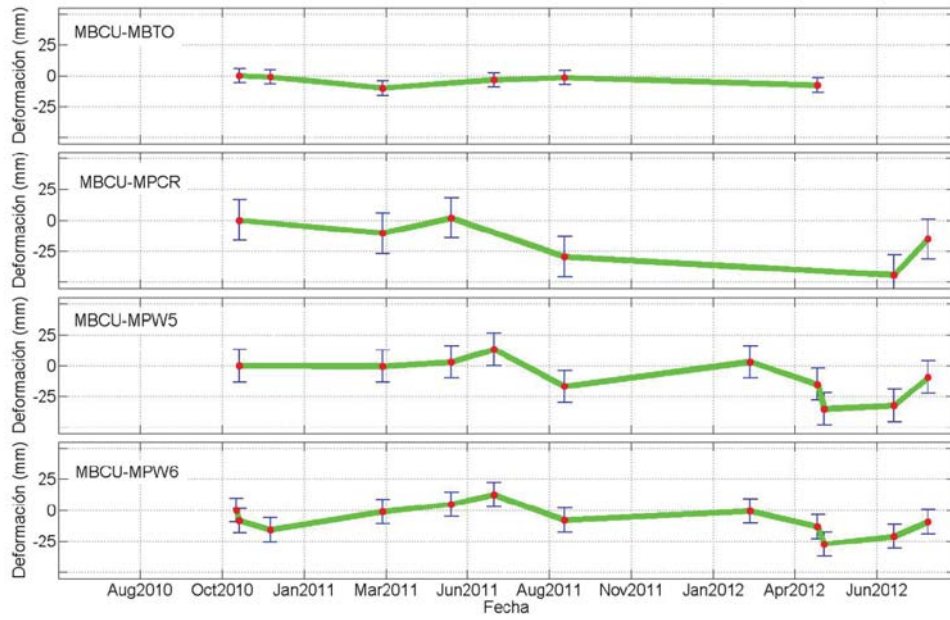


Figura 3.7 Curvas de variación de las distancias de la estación base MBCU respecto de cuatro prismas del flanco oeste.

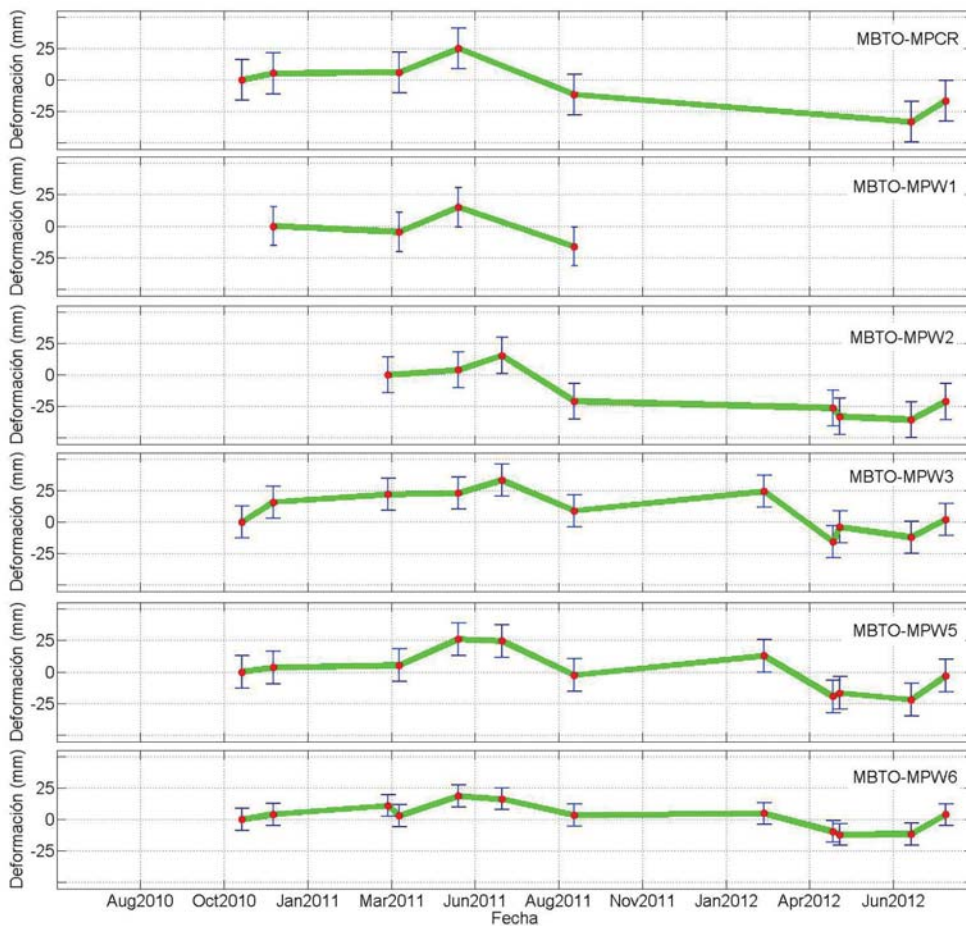


Figura 3.8 Curvas de variación de las distancias de la estación base MBTO respecto de seis prismas del flanco oeste.

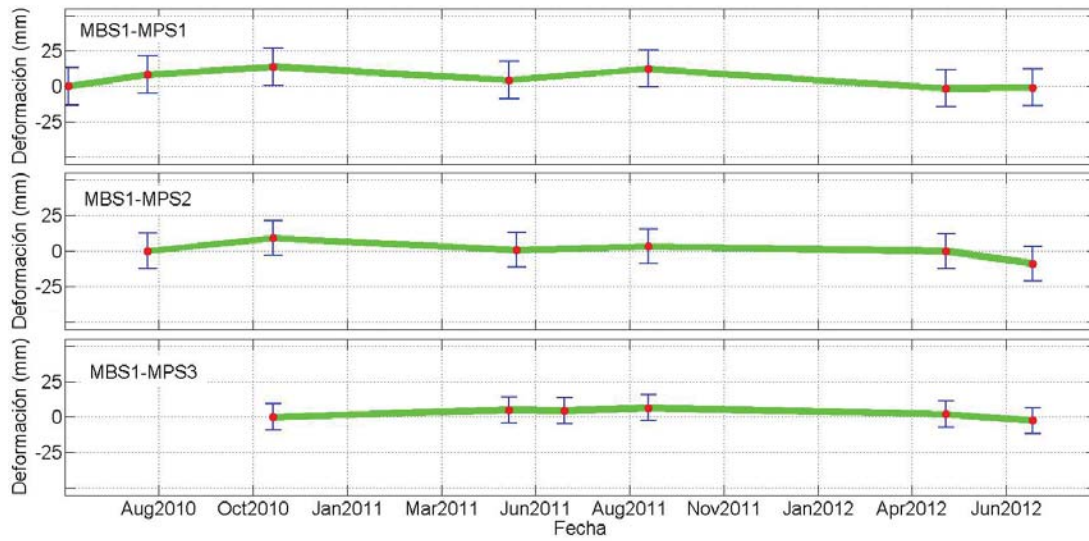


Figura 3.9 Curvas de variación de las distancias de la estación base MBS1 respecto de tres prismas del flanco sur.

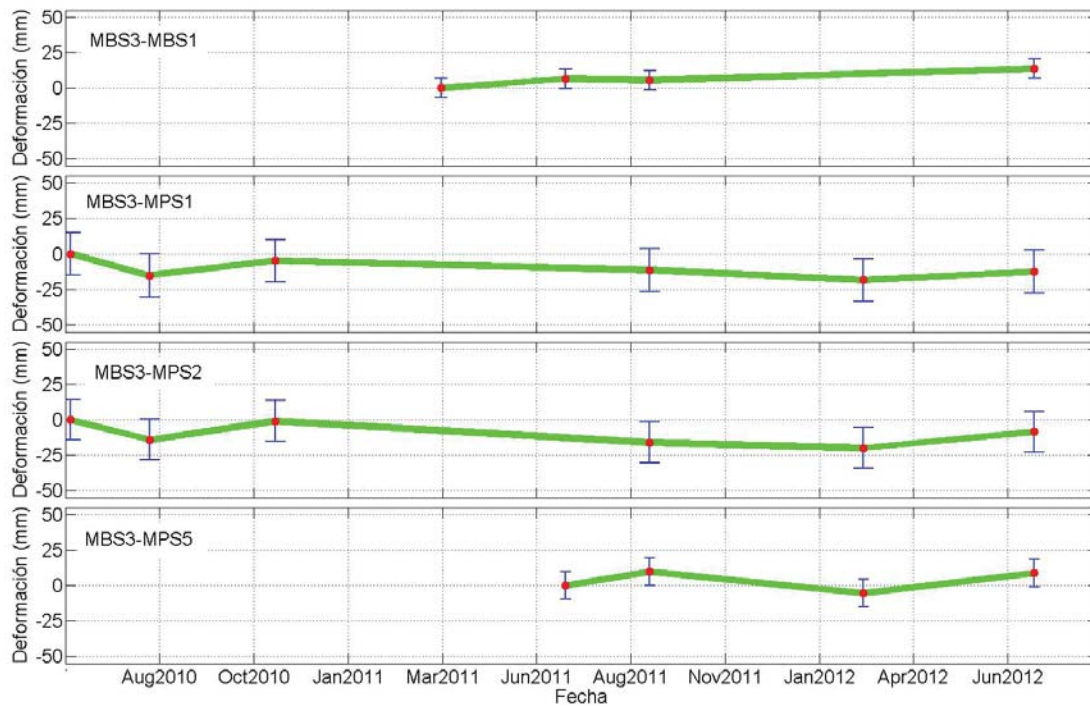


Figura 3.10 Curvas de variación de las distancias de la estación base MBS3 respecto de cuatro prismas del flanco sur.

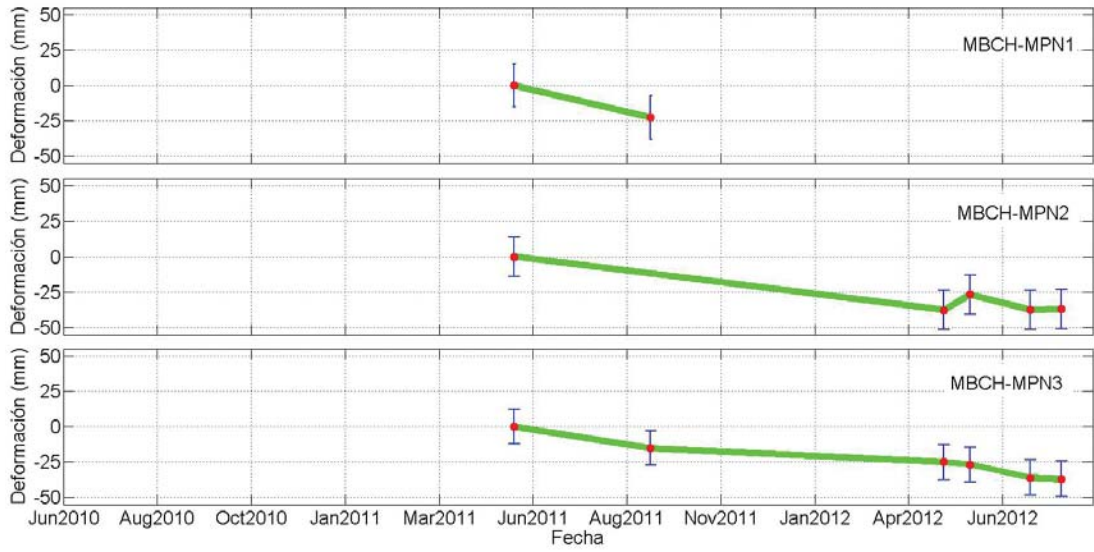


Figura 3.11 Curvas de variación de las distancias de la estación base MBCH respecto de dos prismas del flanco norte.

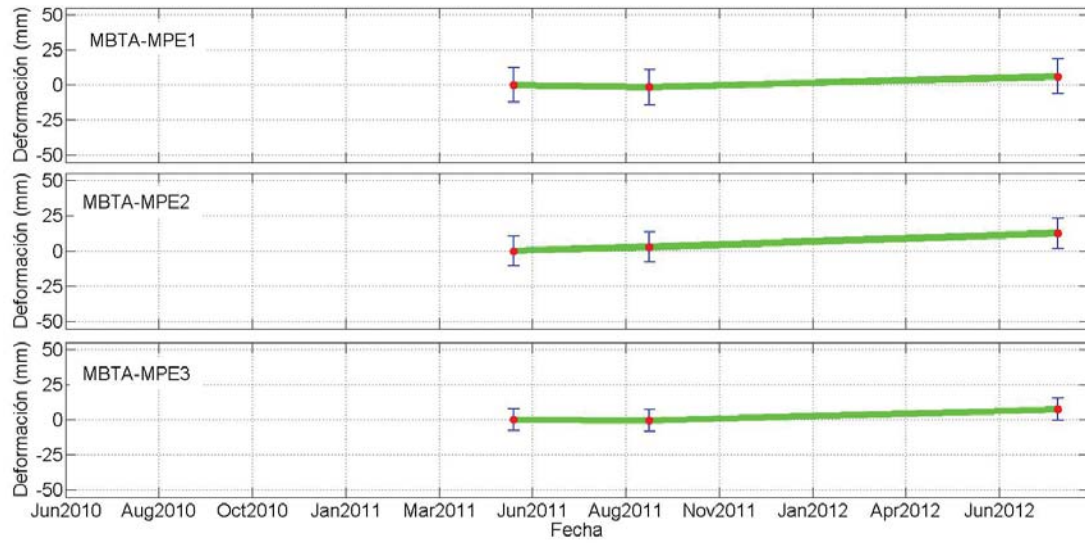


Figura 3.12 Curvas de variación de las distancias de la estación base MBTA respecto de los tres prismas del flanco este.

RESULTADOS PRELIMINARES DEL MONITOREO CON GPS

Se realizó lecturas de GPS en las seis estaciones base (MBS1, MBS2, MBTO, MBCU, MBCH y MBTA) del volcán Misti con el objetivo de verificar el estado deformativo en estas bases. La adquisición de datos se hace mediante receptores GPS de doble frecuencia, y el procesamiento se realiza empleando el método PPP (Posicionamiento de Punto Preciso) para esta etapa preliminar. Los resultados que se presentan en el cuadro 3.2 muestran que el desplazamiento es de este a oeste, con una ligera orientación hacia el sur. Estos vectores representan un

desplazamiento absoluto y se aproximan a la tendencia regional, por lo que una influencia en los vectores de desplazamiento por efecto de una deformación de tipo volcánico es poco probable, dada la metodología empleada para el procesamiento se espera mejorar las aproximaciones con el uso de otros algoritmos.

El análisis de estos resultados muestra que en la base MBCU el error es mayor, lo que se puede atribuir a la ubicación de la base, pues esta se encuentra en el cañón del río Chili lo que dificulta la visibilidad del firmamento. Se propone incrementar el número de horas de registro para mejorar la precisión de los resultados.

Cuadro 3.2
Valores de desplazamiento en cada una de las bases de monitoreo geodésico del volcán Misti

Estación	Desplazamiento (mm)			Error (mm)		
	E-W	N-S	Z	E-W	N-S	Z
MBS1	-30	-7	2	± 6.7	± 24.0	± 47.0
MBS3	-23	3	-3	± 5.0	± 36.7	± 50.2
MBTO	-15	-3	-20	± 6.3	± 22.5	± 47.9
MBCU	-30	-1	-46	± 21.2	± 76.4	± 111.3

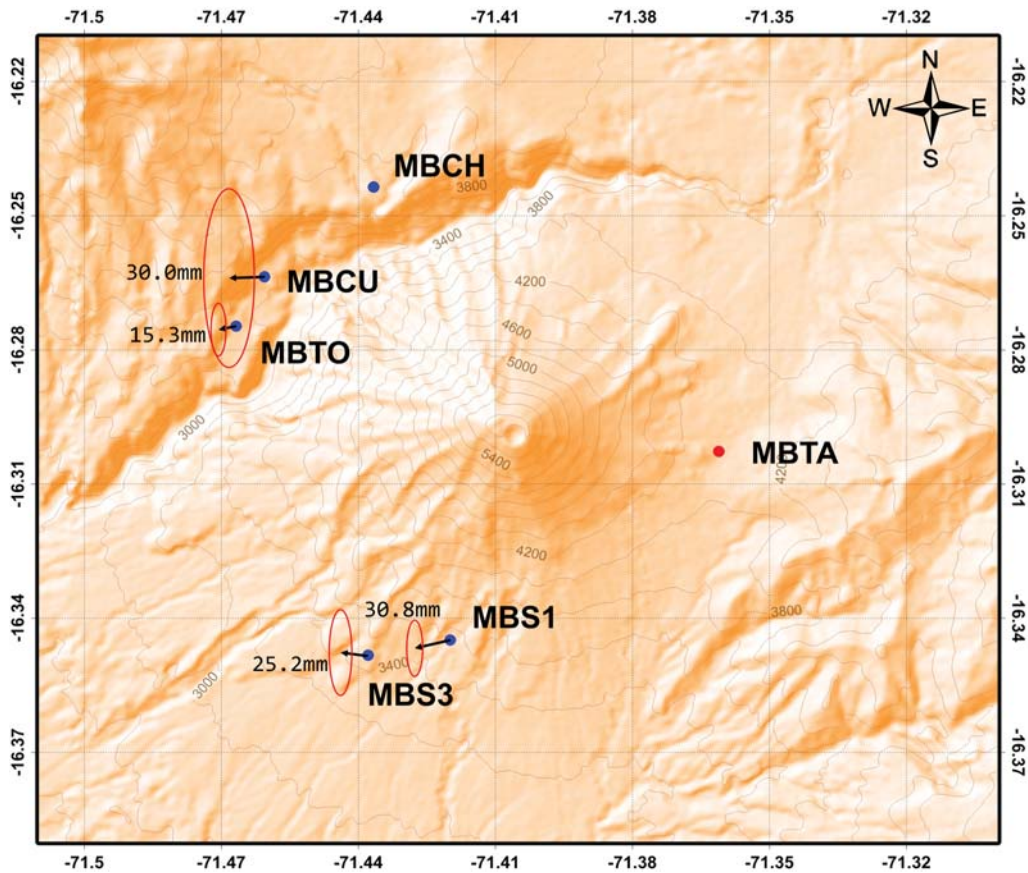


Figura 3.13 Vectores de desplazamiento para un periodo de seis meses en las bases del volcán Misti.

MONITOREO DE DEFORMACIÓN CON INSAR

Por otro lado, se ha empleado también la técnica InSAR, la cual ha venido siendo trabajada por el laboratorio de teledetección del INGEMMET. En la figura 3.14, se muestra el Interferograma obtenido en el volcán Misti (orbitas: 26746-40273, de fechas 12/04/2007 y 12/11/2009 respectivamente), que presenta un componente atmosférico que establece que las condiciones

atmosféricas del ambiente cuando fueron tomadas las imágenes eran diferentes. Este es un efecto que debe ser removido ya que puede indicar deformaciones falsas. Por ejemplo, se muestra una variación de 2π en el edificio volcánico del Misti (González, 2009), pero en general no se observa una anomalía importante que pueda interpretarse como parte de alguna deformación por la actividad volcánica.

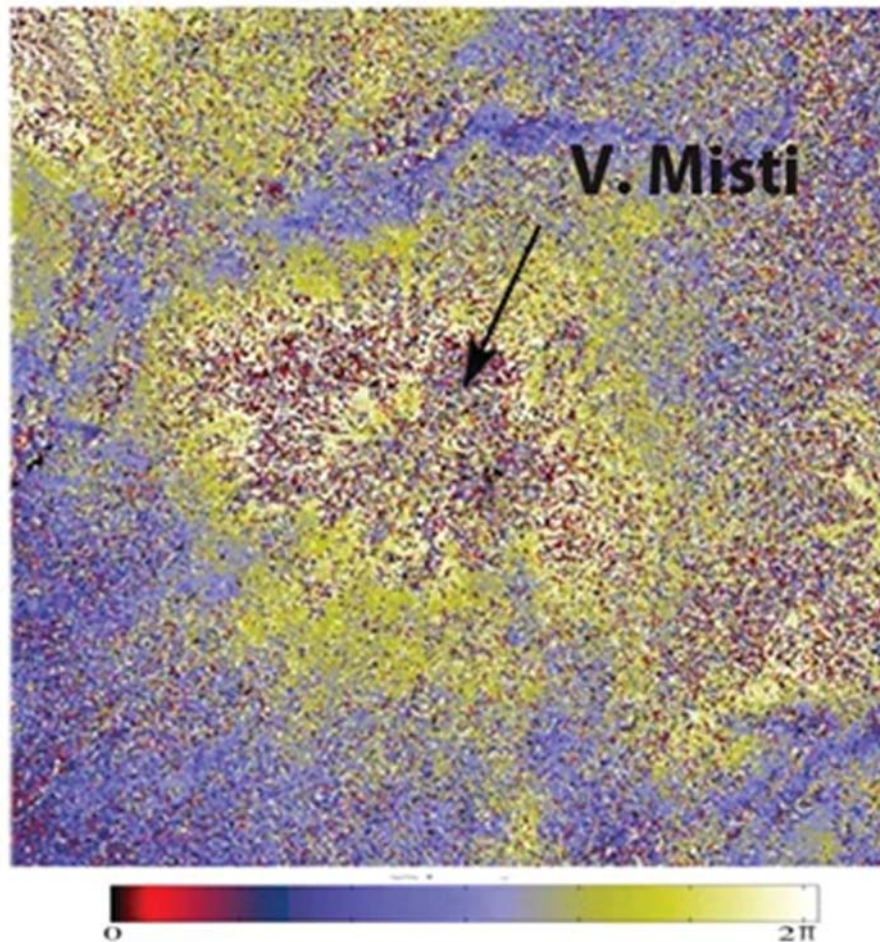


Figura 3.14 Interferograma del volcán Misti, que corresponde a imágenes del 12/04/2007 y 12/11/2009 (González, 2009).

CAPÍTULO IV

MONITOREO VISUAL DEL VOLCÁN MISTI

Las fumarolas del volcán Misti son claramente visibles desde la ciudad de Arequipa y pueden ser observadas principalmente por las mañanas. Desde el año 2008 hasta la actualidad, el INGEMMET viene realizando el registro fotográfico de las emisiones fumarólicas más importantes, *in situ* y desde la oficina de INGEMMET en Arequipa. Asimismo, se efectúa el registro de la visibilidad de las fumarolas y la descripción respectiva.

REGISTRO FOTOGRAFICO DEL DOMO *IN SITU*

Los registros fotográficos presentados en este boletín fueron obtenidos durante los ascensos al cráter del volcán Misti entre los años 2007 y 2012, las imágenes fueron tomadas desde el borde del cráter desde una misma zona para poder realizar la correlación.

En la figura 4.1, se muestra el registro fotográfico, obtenido *in situ*, del domo del volcán Misti durante los ascensos realizados entre noviembre de 2007 y julio de 2012.

En las imágenes se puede observar que la actividad fumarólica de noviembre del 2007, julio y septiembre del 2008 es mínima. En junio del 2009 se observó un leve incremento, para octubre del 2009 las emisiones disminuyeron levemente. En marzo del 2010 se observó un aumento considerable del tamaño de la fumarola, la que sobrepasaba ampliamente el borde del cráter. En junio y agosto del 2010 las emisiones fueron mínimas. A partir de noviembre del 2010 se observó un incremento de la actividad fumarólica, que se mantuvo durante todo el 2011 (marzo, mayo, julio, septiembre y octubre). La actividad fumarólica en julio del 2012 fue menor a la del 2011, pero se mantuvo por encima de los niveles más bajos del 2007, 2008 y 2010.

La evaluación de las fumarolas en el domo de lava del cráter del Misti, entre noviembre del 2007 y julio de 2012, inicialmente ha registrado una actividad mínima con periodos de leve incremento entre el 2007 y mediados del 2010. A partir de fines del 2010 a julio del 2012, la actividad fumarólica muestra un notable incremento.

MONITOREO DE LAS FUMAROLAS DESDE LA OFICINA DE INGEMMET

Entre el 2009 y 2010, el monitoreo de las fumarolas se realiza durante periodos prolongados de observación, en los que se

identifica posibles emisiones y se hace un seguimiento de la secuencia de la emisión de las fumarolas, las mismas que son registradas fotográficamente, tal como se muestra en la figura 4.2. Estos registros corresponden a los obtenidos el 17 de julio de 2009; a las 08:03, 08:04 y 08:05 hora local.

En la figura 4.3, se presenta el registro fotográfico de las fumarolas del volcán Misti, obtenidas desde la oficina de INGEMMET en Arequipa y corresponden a los meses de marzo, agosto, octubre de 2008; enero, febrero, abril, junio, septiembre de 2009 y abril de 2010.

A partir del 2011 se instaló una cámara web en lo que se denominó la estación de monitoreo visual del volcán Misti MST-V1 (figura 4.4). Durante el día registró imágenes de manera continua, en el 2012 este sistema se mejoró con la instalación de una cámara de video la cual registra imágenes las 24 horas. Diariamente se revisan los videos para realizar la identificación de fumarolas, y calcular parámetros como la altura de las fumarolas.

VISIBILIDAD Y CARACTERÍSTICAS DE LAS FUMAROLAS DESDE LA CIUDAD

Desde abril del 2009, se realiza el registro de la visibilidad de las fumarolas del volcán Misti. Estas fumarolas han sido clasificadas cualitativamente en no visibles, poco visibles y visibles, considerando, además, los días nublados donde no fue posible realizar observaciones.

Ejemplos de la clasificación son presentadas en la figura 4.5. En general, la estadística de las emisiones desde abril 2009 hasta diciembre del 2010, 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 de 2009 y en menor cantidad entre los mismos meses de 2010.

En la figura 4.6 se observa el registro de la altura de las fumarolas observadas en el volcán Misti durante el 2012. En general la altura de las fumarolas estuvo por debajo de los 400 m, altura que fue superada solo en enero (< 600 m) y en junio cuando alcanzó 700 m, la más alta de todo el año al momento.

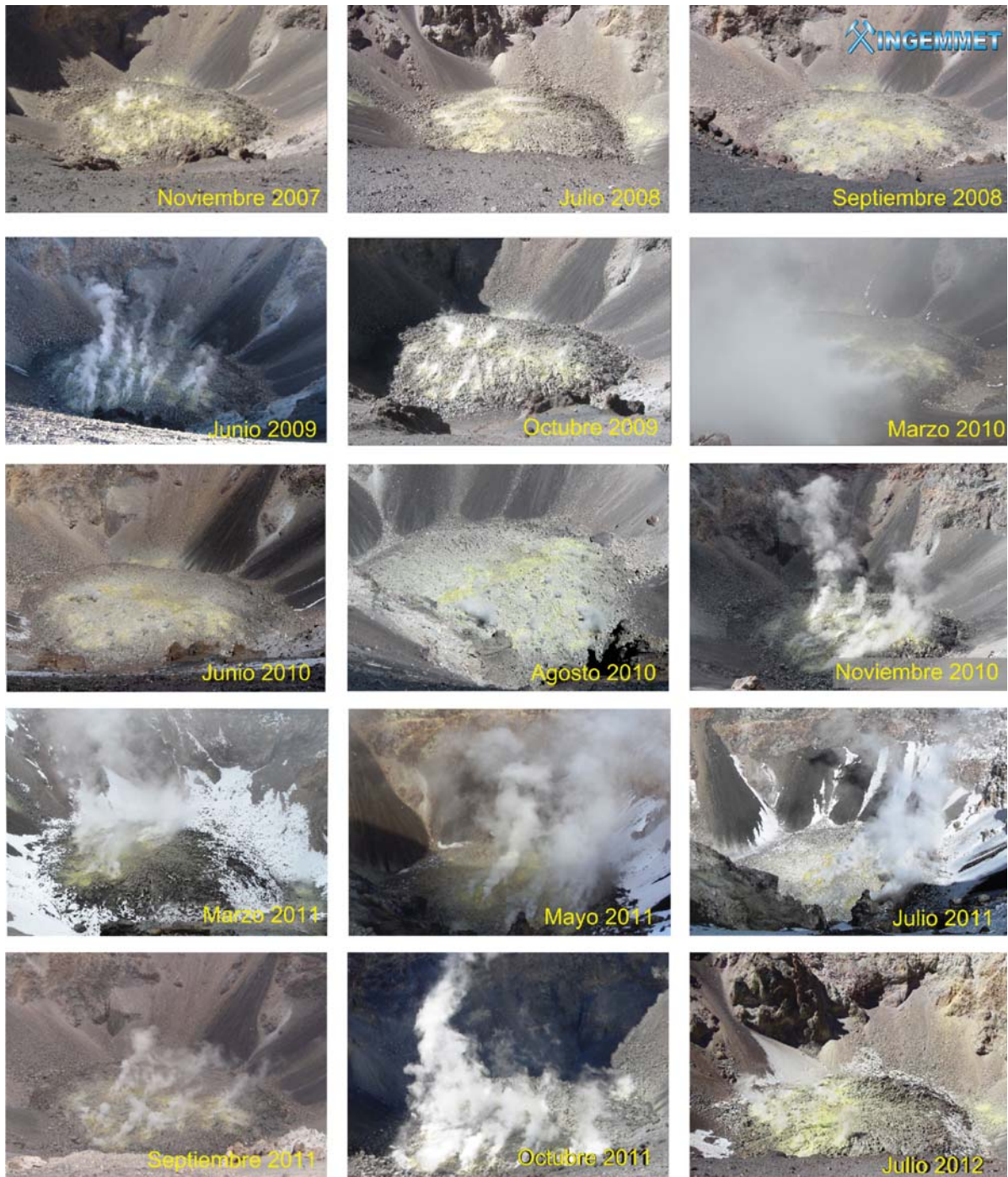


Figura 4.1 Fotos obtenidas entre noviembre del 2007 y noviembre de 2010, donde se aprecia el tamaño de las fumarolas en el domo de lava del cráter del volcán Misti. (La imagen de noviembre 2007 es una cortesía de V. Aguilar).

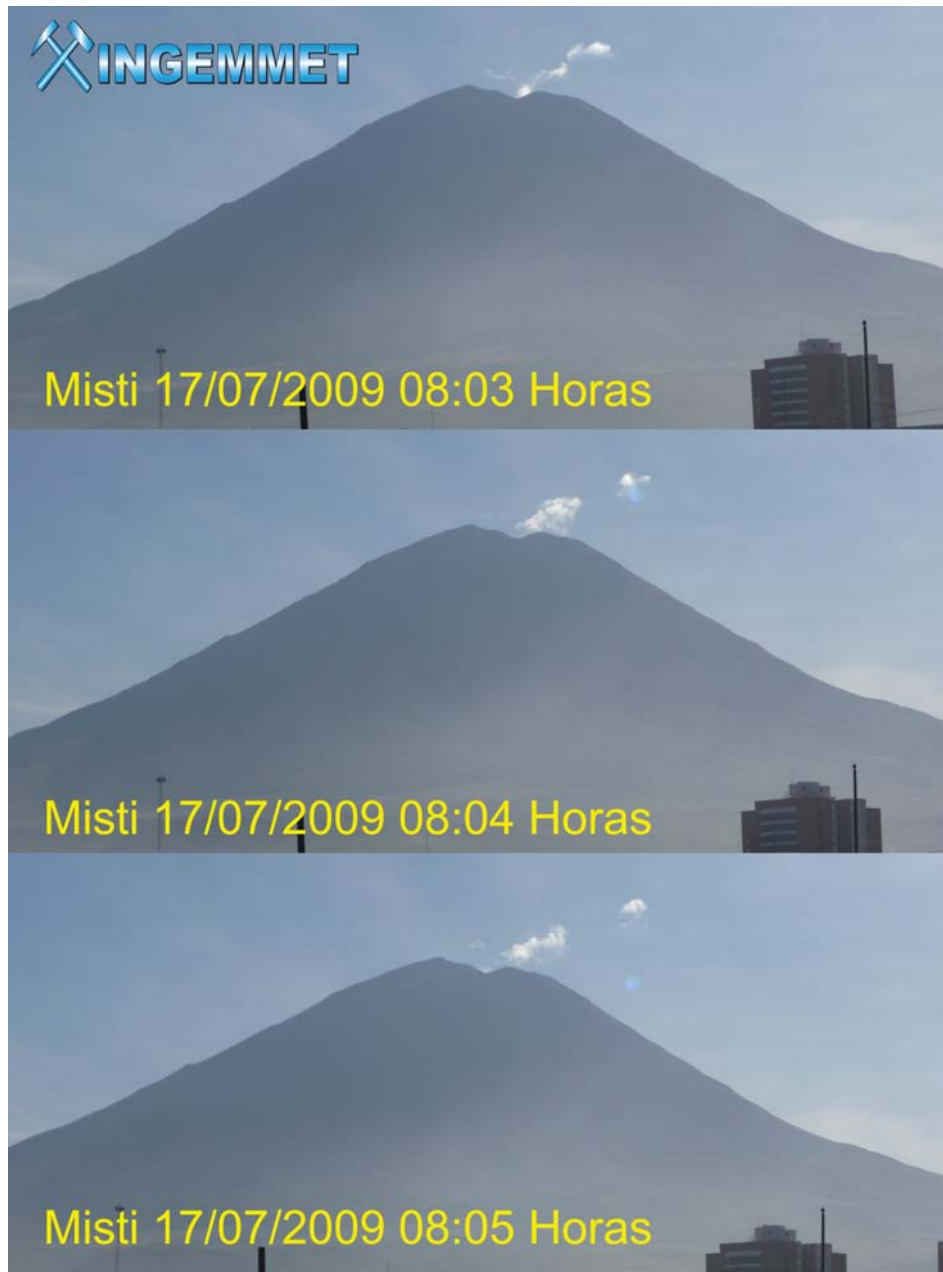


Figura 4.2 Secuencia de fotos de la emisión de gases del volcán Misti.



Figura 4.3 Fotos de las principales emisiones fumarólicas del Misti que se produjeron entre el 2008 y 2010.



Figura 4.4 Estación MST-V1(A) Imagen de la cámara de video que monitoreo el volcán Misti. (B) Imágenes de los registros digitales de la estación de monitoreo visual MST-V1

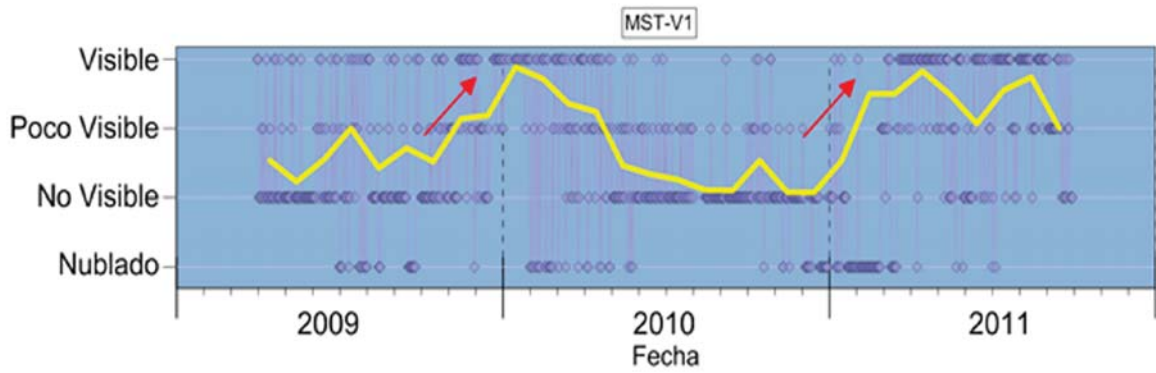


Figura 4.5 Gráfica de las características de las fumarolas registradas entre abril 2009 y octubre del 2011.

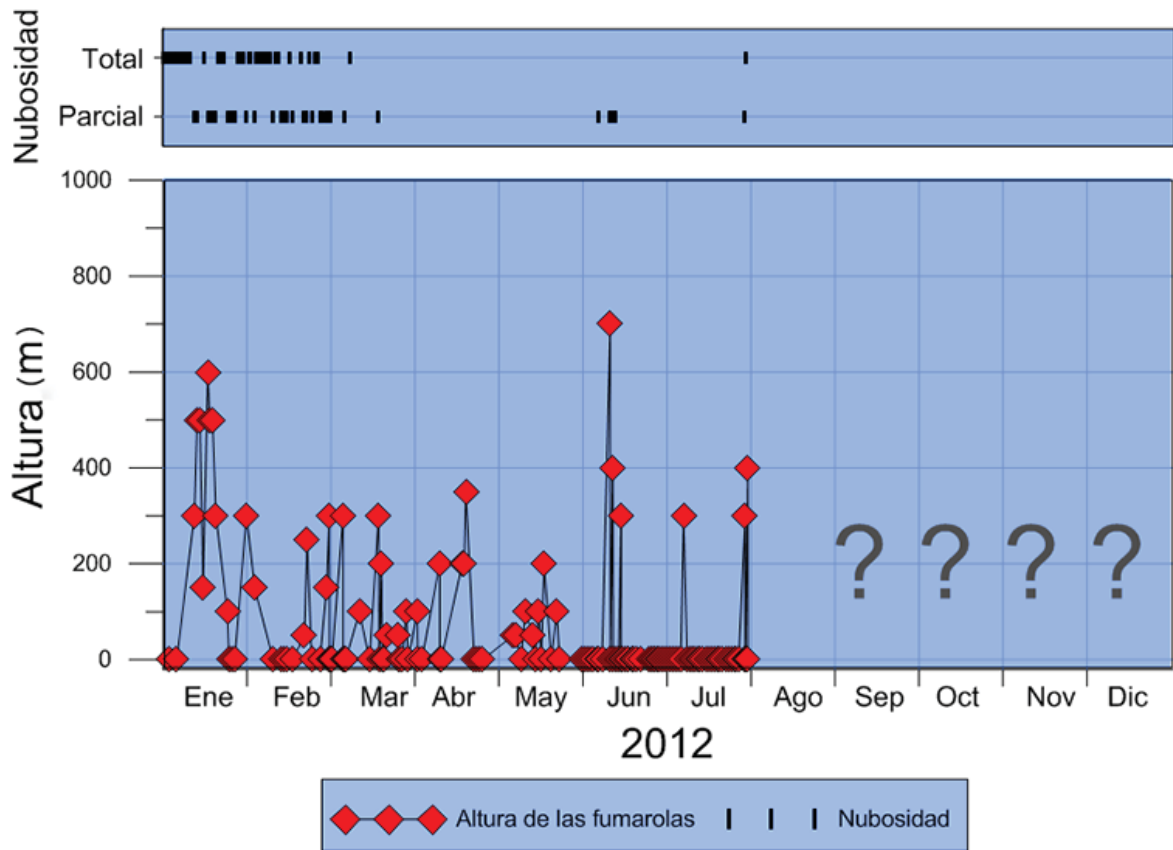


Figura 4.6 Gráfica de la altura de las fumarolas en el volcán Misti entre enero y julio del 2012. Se muestra cuando las fumarolas alcanzaron un máximo de 700 m en junio.

CAPÍTULO V

MONITOREO GEOQUÍMICO DEL VOLCÁN UBINAS

El monitoreo geoquímico de fuentes de aguas y de fumarolas en el volcán Ubinas se inició en septiembre de 2005 en las fuentes Ubinas Termal (UBT) y Ubinas Fría (UBF) ubicadas a 6 km del cráter del volcán, con la medición de la composición química y de los parámetros fisicoquímicos del agua. Debido al inicio de un nuevo proceso eruptivo del volcán Ubinas, en marzo de 2006, los trabajos de muestreo y medición de parámetros fisicoquímicos se intensificaron considerablemente, con lo cual se obtuvo información importante, principalmente durante el año 2006.

Asimismo, se efectuaron mediciones de SO_2 con la colaboración de la Universidad de Hawái (EE.UU.), utilizando para ello el equipo espectrómetro UV «Flyspect».

La descripción y los resultados obtenidos en estos trabajos de monitoreo geoquímico se presentan a continuación:

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS FUENTES

La caracterización de 27 fuentes termales y frías ubicadas alrededor del volcán Ubinas, en un radio de 20 a 25 km, fueron realizadas por Cruz et al. (2009). Los resultados obtenidos muestran que estas fuentes se clasifican en dos tipos (figura 5.1):

- a. CLORURADAS ALCALINAS
- b. SULFATADA CLORURADA ALCALINO TÉRREAS

Asimismo, los resultados obtenidos sugieren que la composición de estos dos tipos de agua resulta de la mezcla: primero, de un reservorio clorurado profundo; segundo, de un reservorio de agua fría y tercero, de un componente de fluidos volcánicos tales como sulfatos (SO_4^{2-}) y cloruros (Cl), producto de la interacción del agua con gases ácidos $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$, HCl.

Según Cruz et al. (2009), las fuentes que presentan estos componentes volcánicos son las siguientes: las fuentes Ubinas Termal (UBT), Chiflón (CHF), Huarina (HUA) y Santa Rosa de Para (SRP), que podrían considerarse para desarrollar un sistema de monitoreo, debido a que las variaciones químicas indicarían el cambio en las condiciones de la actividad profunda del volcán, básicamente, con aumento en el cloruros y sulfatos.

MONITOREO DE FUENTES TERMALES

El monitoreo geoquímico de fuentes termales cercanas al volcán Ubinas se está realizando desde el año 2005. Las variaciones en sus parámetros fisicoquímicos, T° , pH, CE y composición química (aniones y cationes en el agua), podrían evidenciar cambios en la actividad del volcán. En este contexto, desde septiembre de 2005 y considerando los resultados de la caracterización geoquímica realizados por Cruz et al. (2009), se realiza el monitoreo de ocho fuentes de agua asociadas al volcán Ubinas, ubicadas en un radio de 17 km.

En el cuadro 5.1 y la figura 5.1 se presentan las coordenadas y la ubicación de las fuentes consideradas en el monitoreo del volcán Ubinas, proceso que se inició en las fuentes Ubinas Termal (UBT) y Ubinas Fría (UBF) en septiembre de 2005, seguida de Logen (LOG), Huarina (HUA), Matalaque (MAT), Chimpamoya (CHI) en abril de 2006, Ispaypuquio (ISP) en mayo de 2006 y Ñuño (VOL) en agosto de 2006.

Del total de fuentes, la fuente UBT la más cercana al cráter del volcán (6 km) es la más caliente ($\sim 29,5^\circ\text{C}$). En este lugar existe una infraestructura que permite la instalación de equipos y es de donde se obtuvo la mayor cantidad de información de los parámetros fisicoquímicos (T° , pH, CE) y composición química del agua (aniones, cationes, elementos traza).

Cuadro 5.1
Ubicación de las fuentes termales muestreadas durante el periodo de monitoreo 2005-2012, en coordenadas UTM 19K y la altura está en msnm

Fuentes		Coordenadas UTM		Altura (msnm)
Nombre	Código	N	E	
Ubinas Termal	UBT	8188123	301539	3 329
Ubinas Fría	UBF	8188125	301542	3 329
Logen	LOG	8182252	286086	4 475
Volcanmayo	VOL	8182182	286370	4 497
Huarina	HUA	8180203	306202	2 530
Matalaque	MAT	8177217	305545	2 491
Ispaypuquio	ISP	8187975	296448	4 221
Chimin	CHI	8188205	298680	3 855

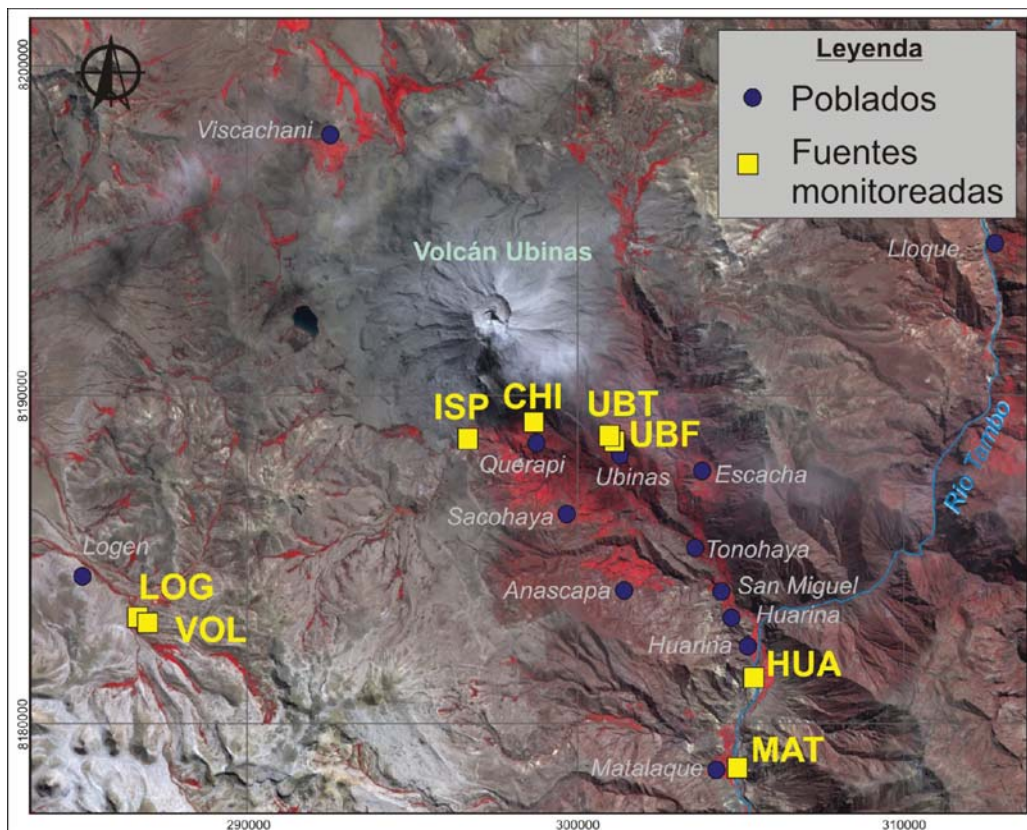


Figura 5.1 Mapa de ubicación de las fuentes de monitoreo geoquímico del volcán Ubinas entre el 2005 y 2012.

Muestreo y Medición de Parámetros Físicoquímicos

En la figura 5.2 se muestra la fecha y la frecuencia de muestreo en cada una de las fuentes. En esta figura se puede observar que la fuente UBT presenta el mayor número de muestras debido a que allí se instaló la estación de monitoreo. En la figura 5.3A se puede ver una fotografía de esta fuente. En la fuente UBF (figura 5.3B), se dejó de muestrear desde el 2008 debido a la poca información que proporcionaba. El muestreo de las fuentes HUA y MAT (figuras 5.3C y 5.3D) fue interrumpida en repetidas ocasiones debido a la crecida del río Tambo, sobre todo en periodo de lluvias; para el 2011, la fuente MAT se encontró seca. En el resto de fuentes ISP, LOG (figura 5.3E y 5.3F), VOL y CHI (figura 5.3G y 5.3H) se ha tratado de mantener una cierta periodicidad de muestreo, lo cual fue más frecuente durante el 2006, debido a la crisis eruptiva del volcán Ubinas iniciada en marzo de ese año.

Resultados del análisis de muestras de fuentes termales

Los resultados del análisis químico de 494 muestras obtenidas de las ocho fuentes de agua monitoreadas, son presentados en el

anexo 2. En este cuadro, se consignan los datos de cada fuente, la fecha de muestreo, los valores de las mediciones de T°, pH, CE, TDS, así como las concentraciones de aniones y cationes.

Con esta información se ha elaborado la gráfica de correlación SO_4/Cl , para conocer cambios asociados a fluidos profundos magmáticos, del mismo modo en el diagrama Ternario $SO_4-Cl-HCO_3$ (Giggenbach, 1988) para conocer las variaciones en el origen de las aguas de las fuentes termales.

a) Relación SO_4/Cl

En la figura 3.4A se presenta la relación SO_4/Cl en función del tiempo, para cada una de las fuentes de monitoreo: UBT, UBF, MAT, CHI, HUA, VOL, LOG e ISP analizadas durante el periodo de muestreo 2005 a julio 2012. En la figura 3.7, se puede observar que en el caso de las fuentes con mayor contenido de sulfato (LOG y VOL), se ha tenido que dividir entre el factor 100 y 10, debido a que no se podían representar en la misma escala.

Entre abril de 2008 y abril de 2009 las variaciones corresponden a ligeros incrementos y disminuciones registrados en UBT, entre 2.4 y 4.5. Otras fuentes como CHI,

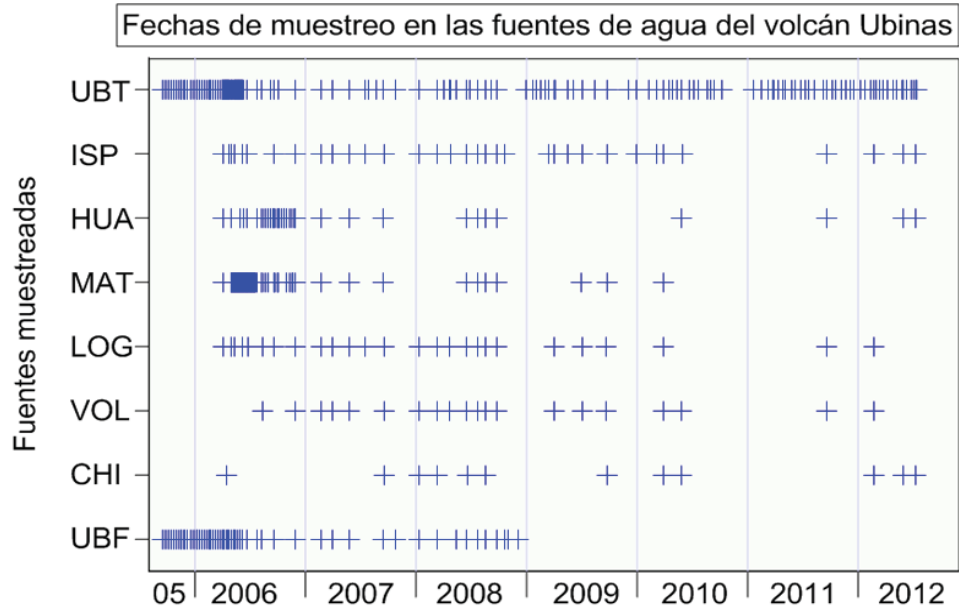


Figura 5.2 Fechas de muestreo en las ocho fuentes de agua donde se realiza el monitoreo del volcán Ubinas entre septiembre 2005 y julio 2012.



Figura 5.3 Imágenes de las fuentes (A) UBT, (B) UBF, (C) HUA, (D) MAT, (E) ISP, (F) LOG, (G) VOL y (H) CHI.

LOG, ISP y HUA, donde hubo menos datos, presentaron un ligero incremento con respecto al 2006; mientras que en el 2010, se observa una relativa estabilidad en los valores en todas las fuentes a excepción de VOL donde se incrementó de 4,3 a 9,9 a fines de marzo de 2010.

En el 2011 en UBT los valores fueron 2,3 a 5,5. La mayor parte del año estuvieron por debajo de 2,5, los más altos se registraron en noviembre y diciembre. Durante el 2012 los valores fueron de 3,1 a 4,1.

A fin de conocer la variación de los valores de los sulfatos, entre septiembre de 2005 y diciembre de 2006 que implica el antes (pre eruptivo) y durante (eruptivo) del proceso eruptivo

del volcán Ubinas, en la figura 5.4B, se muestra una ampliación de la figura 5.4A. En esta figura, se resalta que la variación de los sulfatos, en la fuente UBT, se presentó entre 1,25 y 3,50 durante el periodo pre eruptivo y con una menor amplitud de 2,89 a 3,50 durante el periodo eruptivo. En la fuente MAT se observaron aumentos y disminuciones entre 0,50 a 0,75 en abril; de 1,00 a 1,85 en junio y un aumento significativo de 4,90 el 20 de mayo de 2006. Las variaciones registradas en la fuente UBF estuvieron entre 2,90 y 6,75, los mismos que disminuyeron a partir de junio del 2006, pero también disminuyeron el número de datos. En las demás fuentes no se ha observado variaciones significativas durante el proceso eruptivo.

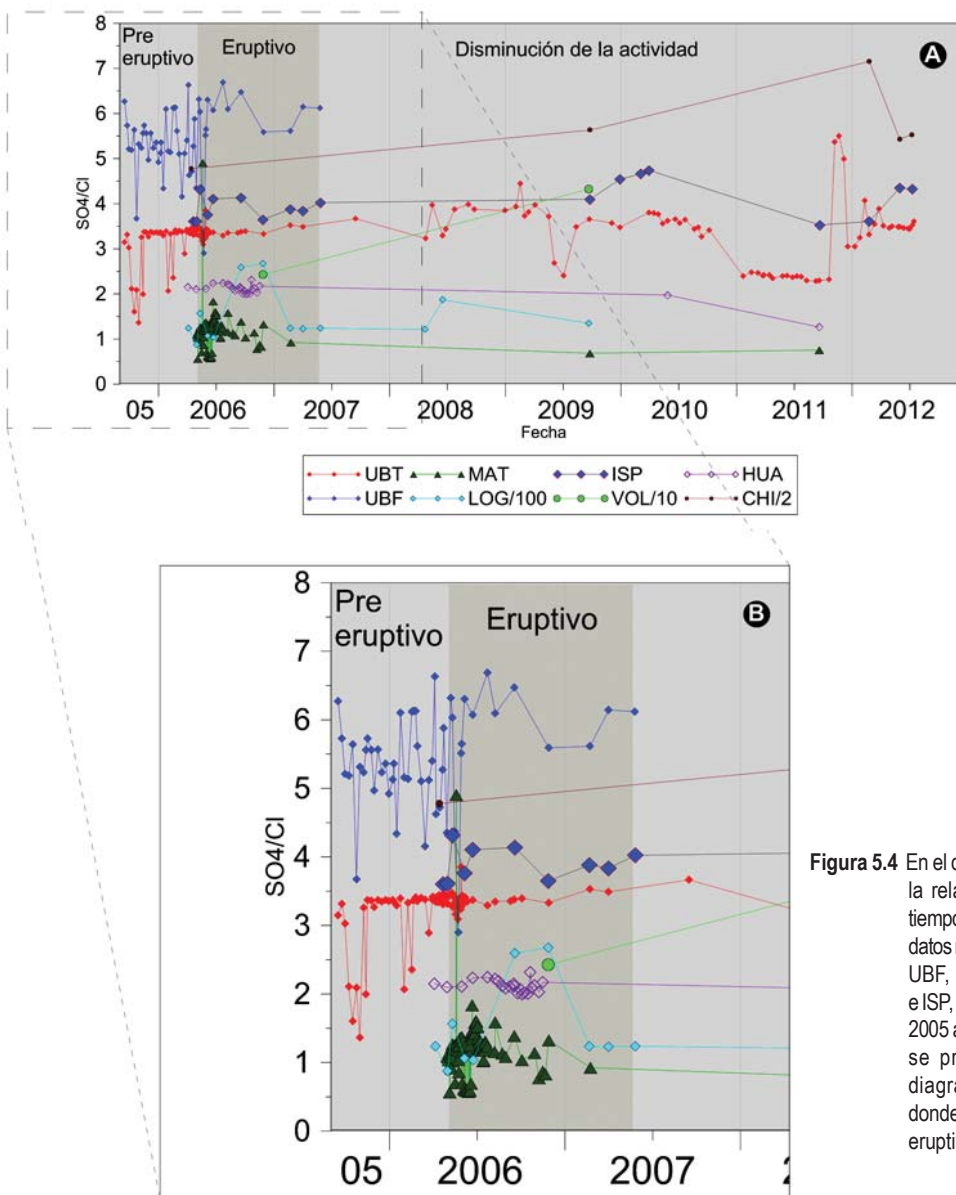


Figura 5.4 En el diagrama superior se muestra la relación SO_4/Cl en función del tiempo, donde podemos observar los datos recopilados en las fuentes UBT, UBF, MAT, CHI, HUA, VOL, LOG e ISP, durante el periodo de muestreo 2005 al 2012. En el diagrama inferior se presenta la ampliación del diagrama de la relación SO_4/Cl donde se muestran los periodos pre eruptivo y eruptivo.

b) Diagrama Ternario de SO₄-Cl-HCO₃

Con los datos de los Aniones mayoritarios (cloruro, sulfato y bicarbonato), se ha realizado el diagrama ternario SO₄-Cl-HCO₃ (Giggenbach, 1988), desde el 2005 hasta el 2012.

En la figura 5.5, se presenta el diagrama Ternario de SO₄-Cl-HCO₃ (aniones mayoritarios sulfato cloruro, y bicarbonato) con la información obtenida de las fuentes: UBT, MAT, HUA, ISP, CHI, VOL y LOG, entre septiembre del 2005 y julio del 2012. Además se ha graficado los resultados del agua del río Tambo, muestreados en el 2012.

El resultado más resaltante es que las fuentes se mantuvieron en la zona de aguas sulfatadas a excepción de MAT que en algunas ocasiones se ubicó en la zona de aguas cloruradas, sobre todo en el 2006. Al graficar los resultados de las aguas del río Tambo se observa que se encuentran en la zona de aguas cloruradas, cerca de las variaciones de MAT, lo que se pudo dar posiblemente por una contaminación de la fuente con el agua del río.

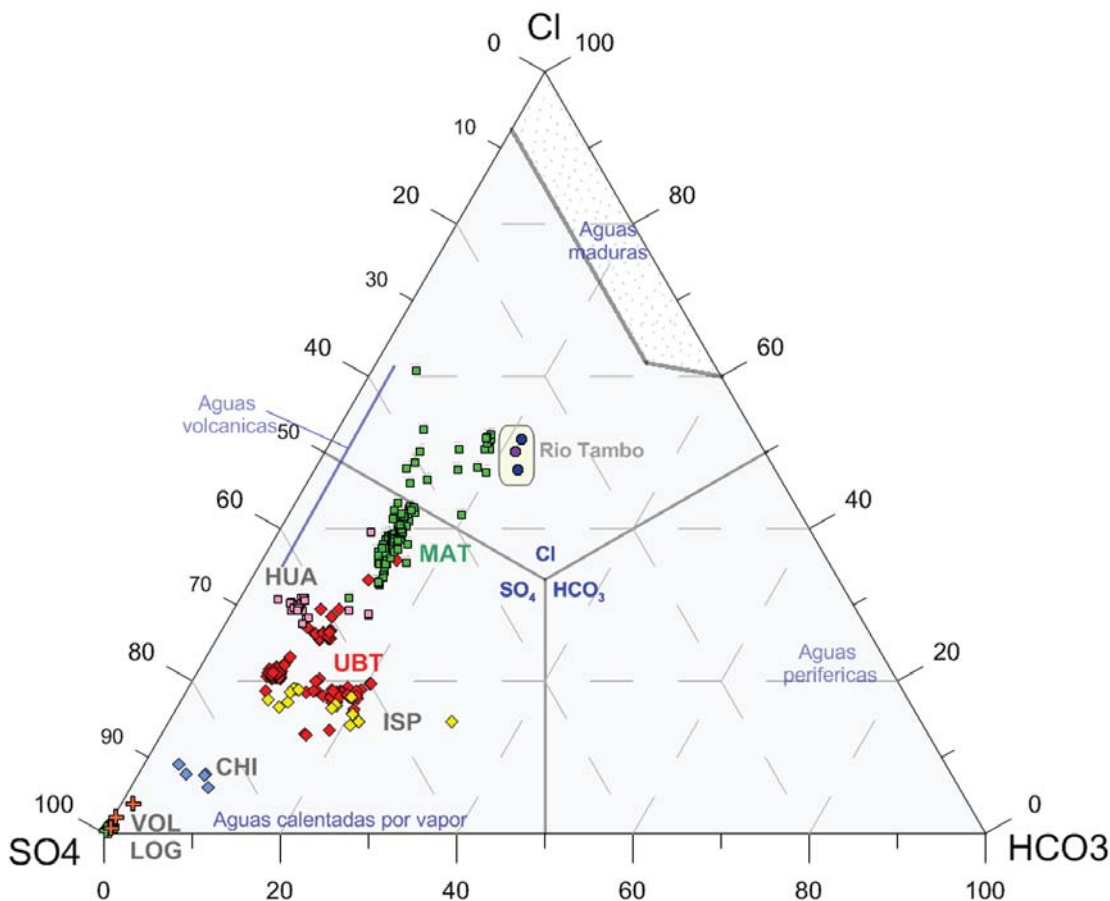


Figura 5.5 Diagrama Ternario SO₄-Cl-HCO₃ (Giggenbach, 1988), donde se observan los datos obtenidos durante el año 2005 en las fuente UBT y UBF.

Resultados obtenidos de la medición de los parámetros fisicoquímicos

Al realizar la gráfica donde se compara la temperatura con el TDS (sólidos totales disueltos) obtenidos entre el 2005 y el 2012 (figura

5.6), se observa que las fuentes UBT, LOG, VOL, CHI e ISP presentan variaciones mínimas. Las fuentes MAT, HUA y UBF presentaron variaciones en ambos parámetros, los que podrían estar relacionados al ingreso de agua superficial.

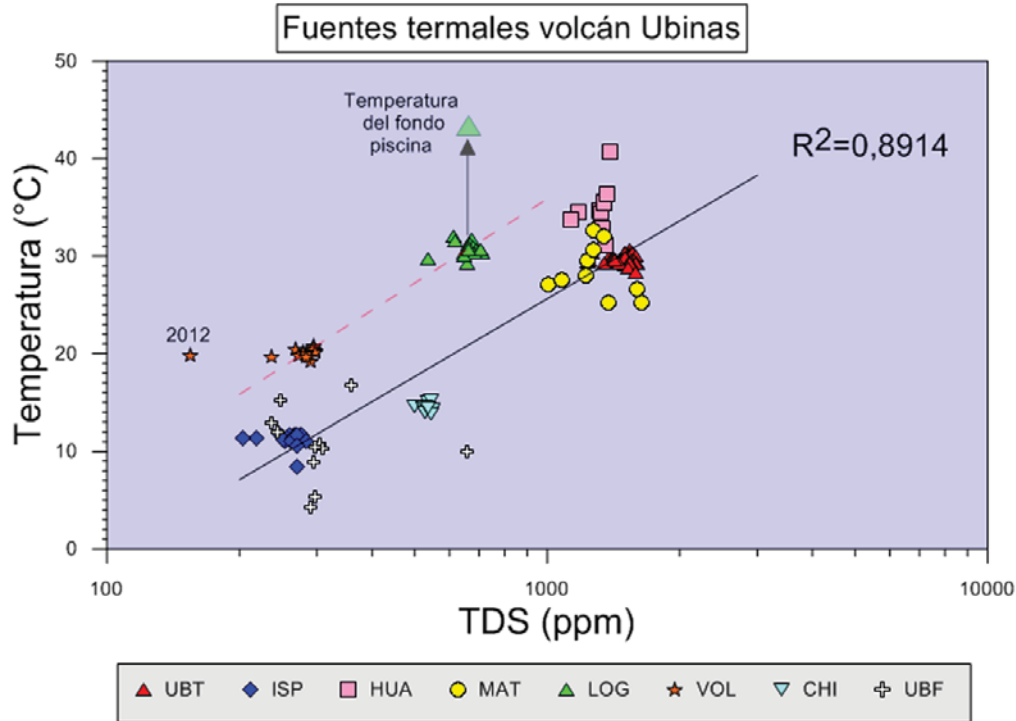


Figura 5.6 Gráfica donde se compara la temperatura con el TDS obtenidos de los resultados del monitoreo en las fuentes UBT, LOG, VOL, HUA, ISP, CHI entre el 2007 y 2012; UBF entre el 2007 y 2008; MAT entre 2007 y 2010.

Composición Química y Parámetros Físicoquímicos en UBT

En la fuente UBT se obtuvo la mayor cantidad de datos en cortos periodos de tiempo, antes, durante y después de la etapa de mayor actividad del volcán Ubinas (2006), donde se observaron variaciones importantes en los parámetros fisicoquímicos, sobre todo en la T° . La figura 5.7 muestra los resultados obtenidos entre septiembre de 2005 a julio de 2012. En dicha figura los parámetros fisicoquímicos: T° registrada cada 15 minutos, pH, CE; además se muestran 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) y Óxido de Silicio (SiO_2). En algunos casos, se han multiplicado las concentraciones por un factor para que sean más representativos.

En la fuente UBT, la temperatura es el parámetro que más se ha medido. Desde febrero del 2007, se han obtenido 21 3108 datos de medición continua.

Las variaciones más resaltantes de la temperatura se observaron en el 2007. Estas variaciones de T° fueron cercanas a 0.6°C (figura 5.7), posiblemente esta medición está asociada a la actividad volcánica o a la sismicidad regional, ya que durante este periodo han ocurrido eventos sísmicos de magnitudes considerables

(Masías et al., 2008a). Desde el 2007 se viene registrando una tendencia a la disminución de la temperatura (cuadro 5.2).

El pH, es un parámetro que durante varios años no presentó un comportamiento anómalo asociado con la actividad volcánica. Sin embargo, en el 2012 se obtuvieron lecturas de $\text{pH}=5.71$ en comparación con el periodo de monitoreo. Mientras que para el 2012 se observaron tendencias hacia el valor neutro ($\text{pH}=7$), lo cual posiblemente se deba a la mezcla con aguas meteóricas o superficiales.

La composición química del agua de esta fuente ha presentado variaciones. Las más resaltantes se manifestaron en los aniones sulfato (SO_4^{-2}) y cloruro (Cl^{-}). Estos cambios se han presentado desde fines del 2005 a principios del 2006. Posteriormente se observan variaciones mínimas hasta el año 2008, que es el periodo de mayor actividad.

A mediados del 2009 se observó nuevamente variación significativa del ión sulfato, se presentó una disminución en su concentración, también en los parámetros de CE, pH y la proporción química SO_4/Cl han registrado ligera disminución, mientras que los cationes Na, K, Ca y Mg presentaron un ligero incremento. Estas anomalías han ocurrido antes de finalizar las explosiones audibles y emisiones de ceniza del volcán Ubinas.

Cuadro 5.2
Promedio anual de la temperatura en la fuente UBT

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
T° prom. °C	29,81	29,53	29,48	29,15	29,05	28,94

(*) Promedio hasta el mes de julio

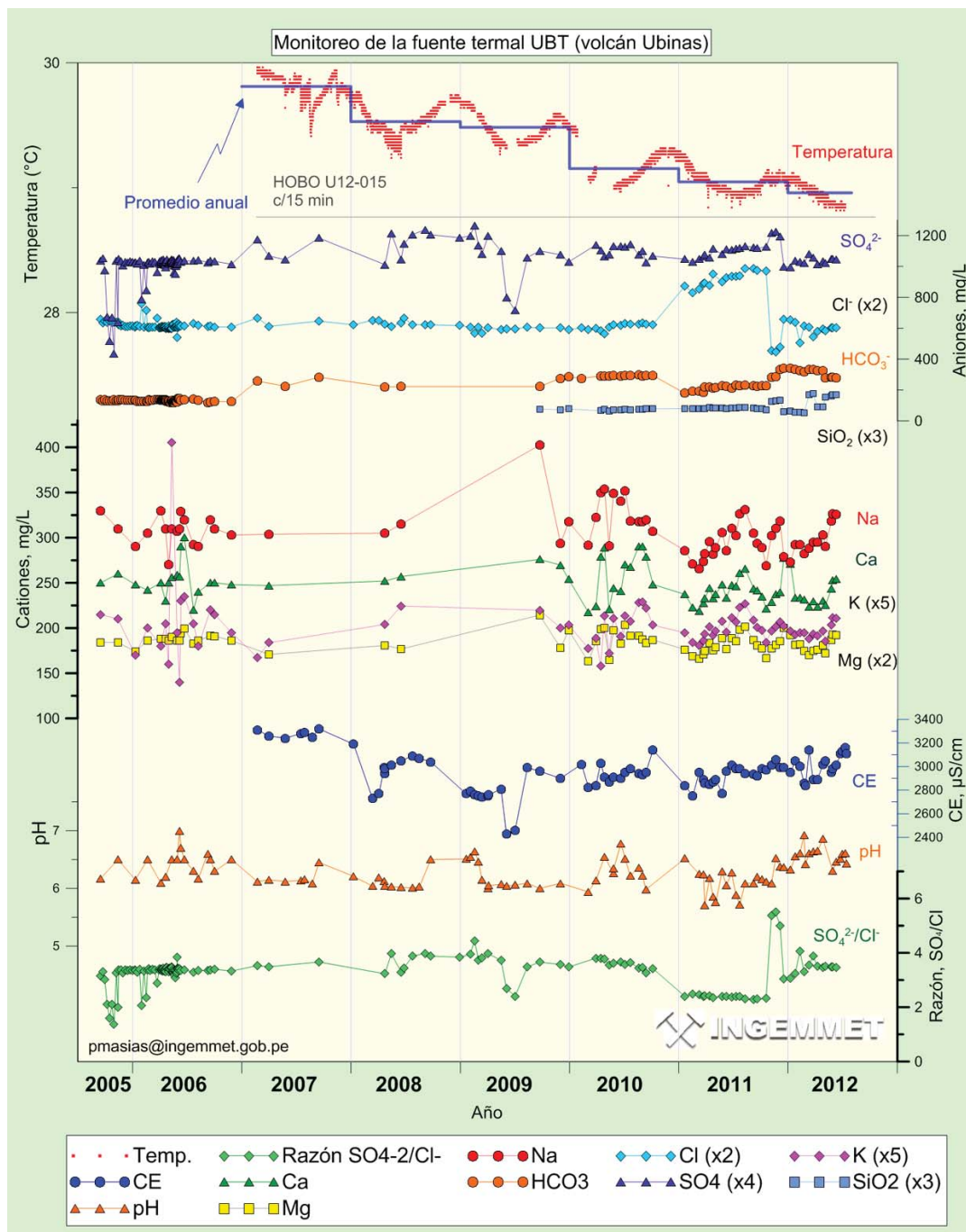


Figura 5.7 Resultados de los parámetros fisicoquímicos (T°, pH, CE), Aniones: HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ y Cationes: Ca, Mg, Na, K y Óxido de Silicio (SiO₂) obtenidos en la fuente UBT entre septiembre de 2005 a julio de 2012.

MONITOREO DE LAS FUMAROLAS DEL VOLCÁN UBINAS

En los trabajos reportados por Gonzales (2001), se determinó que las fumarolas del volcán Ubinas se encontraban focalizadas en el fondo del cráter, con temperaturas de hasta 444 °C. Debido al difícil acceso y al inicio de la actividad volcánica en el 2006 resultó muy peligroso realizar muestreos directos de gases en el interior del cráter, por lo que se recurrió a técnicas alternas como mediciones espectrométricas en el rango del UV para SO₂ en la pluma volcánica.

Medición de dióxido de azufre (SO₂)

Para la medición del gas dióxido de azufre (SO₂) se utilizó el espectrómetro de correlación Ultra violeta (UV) «FLYSPEC» (figura 5.8). Estas mediciones se realizaron con el apoyo del PhD Clegg de la Universidad de Hawai (Hilo, EE.UU.) el 10 de enero y 11 de mayo de 2006. Las mediciones se realizaron cruzando la pluma fumarólica por debajo, en el interior de la caldera del Ubinas (figura 5.9), adicionalmente se tomaron datos de dirección de velocidad y dirección del viento.



Figura 5.8 Calibración del equipo «FLYSPEC» para realizar las mediciones de SO₂ en la caldera del volcán Ubinas (tomado de Clegg, 2006).



Figura 5.9 Imagen de la caldera del volcán Ubinas.

Resultados de la medición de dióxido de azufre en la pluma

Los resultados que se obtuvieron de esas dos campañas se presentan en el cuadro 5.3 (Cruz et al., 2006; Clegg, 2006). En este cuadro se puede observar que el aumento de la concentración y el flujo de SO₂ es casi el doble en un periodo de cuatro meses.

Cuadro 5.3
Resultado de las mediciones realizadas con el espectrómetro de correlación Ultravioleta «FLYSPEC» durante el 2006 (Clegg, 2006)

Fecha	Concentración máxima SO ₂	Flujo SO ₂
10/01/2006	1 500 ppm-m	640 Tn/día
11/05/2006	2 800ppm-m	1 200 Tn/día

CAPÍTULO VI

MONITOREO GEODÉSICO DEL VOLCÁN UBINAS

El monitoreo de deformación del volcán Ubinas tiene un mayor tiempo de funcionamiento, básicamente, usando la técnica de EDM. Este método se implementó desde el año 2008 y en el 2009 se realizaron las primeras lecturas de distancias desde dos bases hacia tres prismas instalados en el flanco sur del volcán. En el 2010, la red geodésica se ha venido complementando con el diseño de perfiles de control con GPS Diferencial en el flanco oeste del edificio volcánico y dos perfiles de EDM en los flancos oeste y norte del volcán, además se han realizado lecturas de GPS.

RED DE MONITOREO DE DEFORMACIÓN

Al igual que en el volcán Misti se consideraron diferentes aspectos para diseñar y desarrollar un sistema de monitoreo de deformación en el volcán Ubinas es así que en la figura 6.1, se muestra la red

de monitoreo de deformación en el volcán Ubinas, que está compuesta por hitos y prismas en funcionamiento y aquellos que se tiene proyectado implementar. Esta red está compuesta de cuatro bases para EDM, quince prismas (faltando instalar tres), y por implementar una red de monitoreo con GPS diferencial. El desarrollo de este trabajo está casi terminado, sin embargo, la implementación y/o mejoramiento de la red geodésica, está sujeto a variaciones o modificaciones por factores circunstanciales como la disponibilidad de equipos, logística y el aporte de nuevos estudios. Por otro lado, se ha contemplado también instalar inclinómetros y estaciones GPS permanentes para transmisión vía telemetría, así como realizar análisis de imágenes satelitales empleando el método InSAR.

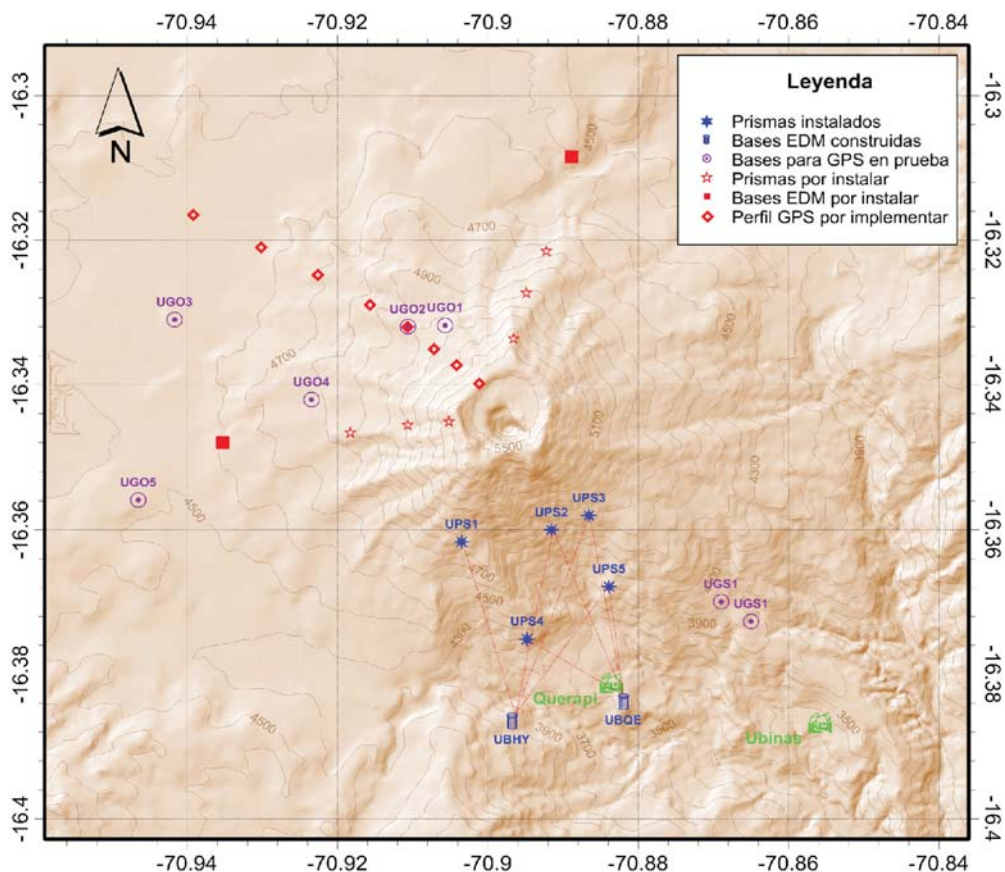


Figura 6.1 Diseño de la red geodésica para el monitoreo de deformación en el volcán Ubinas.

Implementación de Bases para EDM/GPS

Como parte del trabajo de implementación de la red geodésica del volcán Ubinas, se construyeron monumentos para las mediciones de EDM y GPS, asimismo se instalaron reflectores a diferentes alturas y flancos del volcán, los cuales fueron identificados previamente en el estudio de gabinete.

Los planos empleados en la construcción de las bases para la técnica de EDM y GPS son los mismos empleados en la implementación de los monumentos en el volcán Misti (ver figura

3.4), se han construido dos tipos de bases, la primera consiste en una base construida sobre terreno suelto, para lo cual, fue necesario implementar un cemento de 0.5 m de profundidad. El segundo tipo consiste en una construcción sobre afloramiento de roca en la cual se ancló la canastilla de fierro corrugado en el afloramiento rocoso. En ambos casos, el presupuesto para la construcción fue muy similar y los costos más altos fueron la mano de obra y el alquiler de herramientas y equipos. En la figura 6.2 A y B, se muestra un ejemplo de un monumento terminado y en uso.



Figura 6.2 Fotos de los pilares de concreto construidos para el monitoreo geodésico en el volcán Ubinas. A) UBCH, es un pilar cilíndrico construido sobre afloramiento rocoso, B) UBQE, pilar cuadrado construido sobre suelo blando poco profundo.

Instalación de Prismas

Para implementar la red de monitoreo con EDM se planificó la instalación de reflectores en diferentes flancos del volcán, en una primera etapa se instalaron prismas de uso temporal (desmontables), luego se instalaron permanentemente. Inicialmente la instalación de los reflectores se realizaba anclando estos accesorios sobre roca sólida usando concreto lo que conllevaba a

tomar mayor tiempo y personal, sin embargo nuestro sistema de instalación actual es más eficiente en cuanto a tiempo y personal, básicamente la instalación consiste en anclar pernos de expansión en rocas estables (coladas de lava), usando una broca diamantada. En la figura 6.3, se muestra una secuencia de la instalación de un prisma en el volcán Ubinas.

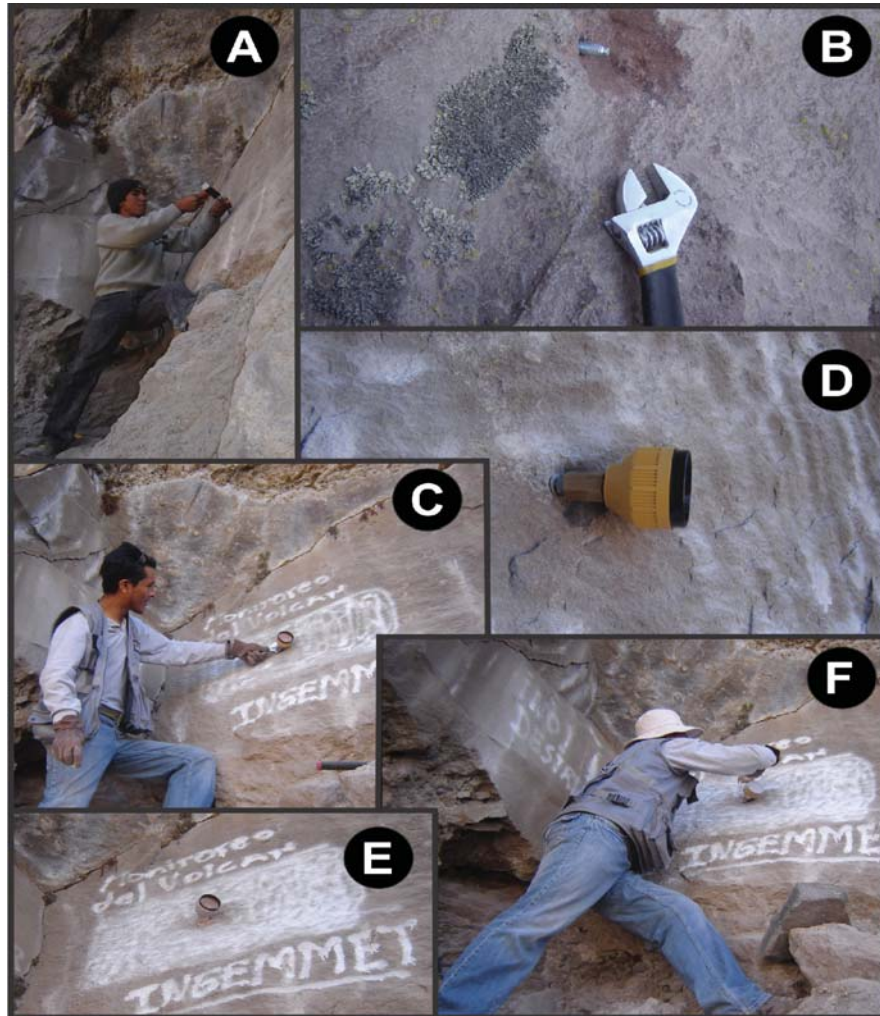


Figura 6.3 Secuencia de la instalación de un prisma con perno de expansión. A) Se perfora manualmente, B) se ancla y sella el perno de expansión, C) y D) mediante un adaptador de bronce se acopla el prisma al perno y se ajusta untando pegamento para metal, E) se protege el prisma con masilla plástica y F) se pinta el punto para la ubicación con la estación total.

RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE EDM

Las medidas electrónicas de distancias se han venido realizando desde el año 2009. En total se tienen nueve campañas de lecturas hasta el año 2012; en las figura 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 se muestran los resultados de estas nueve mediciones en los diferentes pares base-prisma, las cuales se han tomado con valores de temperatura y presión para las correcciones por factores atmosféricos. En estas gráficas podemos ver que no se ha producido mayor variación y las pequeñas variaciones que se aprecian pueden ser atribuidas a factores atmosféricos que no se consideraron con la exactitud requerida, en todo caso estas variaciones están dentro del rango de error del instrumento. Con estos resultados podemos definir a este periodo del volcán como un periodo de baja actividad o que que la actividad presente no tiene repercusión en la deformación

del edificio volcánico, aunque esperamos obtener más datos para describir la tendencia de las líneas de distancias en cada uno de los prismas del volcán.

Las mediciones efectuadas han permitido obtener distancias promedio y comparar los valores correspondientes a las campañas realizadas hasta el año 2012. En las estaciones de las que se tiene mayor número de datos (UBHY y UBQE) se puede ver que las variaciones de distancias oscilan entre ± 20 mm, los mismos que a pesar de no estar dentro del rango de precisión del equipo (~ 10 mm), son oscilaciones que se aproximan a la línea cero, y al no ser una variación con tendencia constante, se interpreta como un estado no deformativo del volcán. Por otro lado, para las estaciones que presentan escasos datos de lectura (UBPI y UBCH) de EDM no se puede realizar una interpretación objetiva de sus resultados.

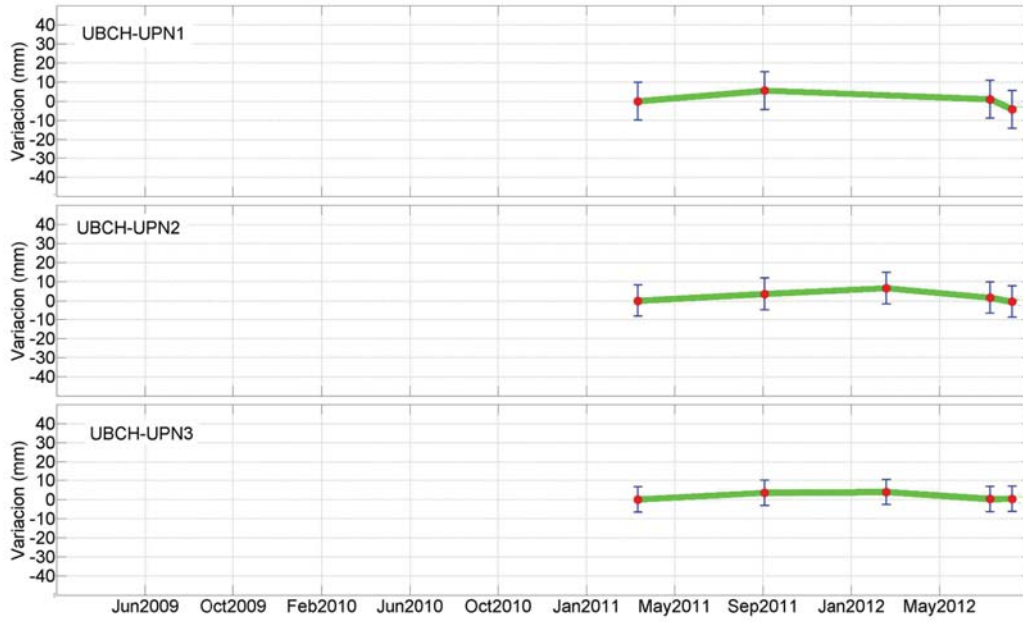


Figura 6.4 Resultados de las medidas electrónicas de distancia para la estación UBCH, en el flanco norte del volcán, en el cerro Chimin.

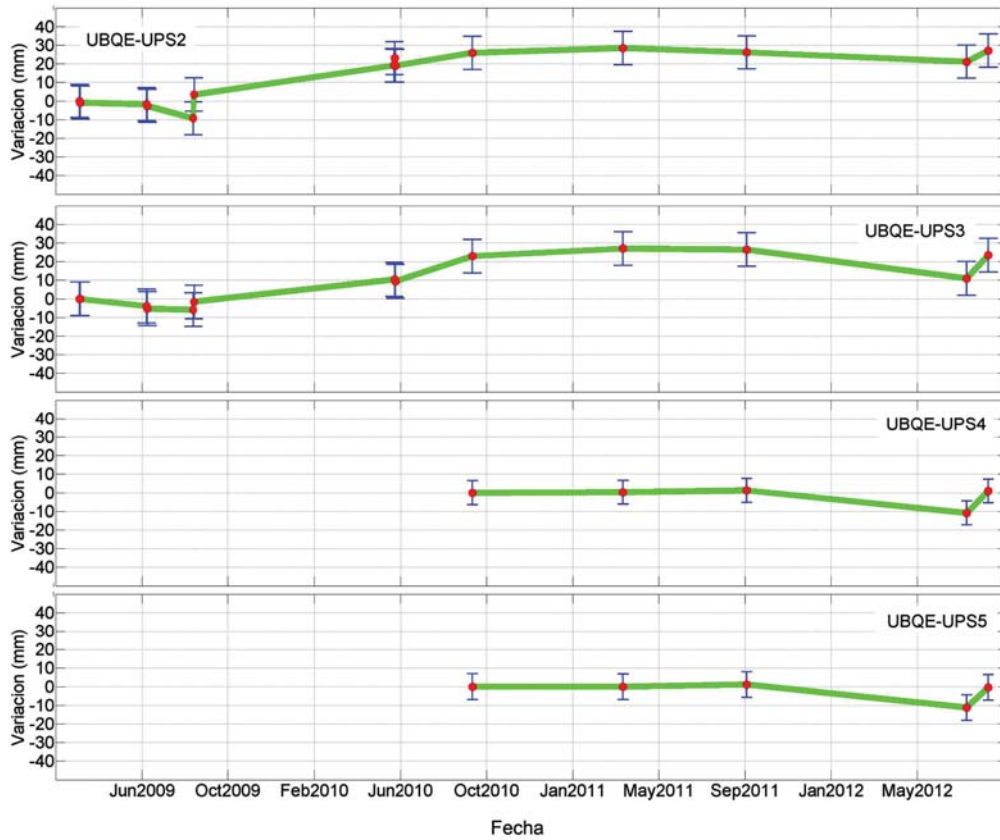


Figura 6.5 Resultados de las medidas electrónicas de distancia. Para la estación UBQE, ubicada en el flanco sur del volcán, cerca del poblado de Querapi.

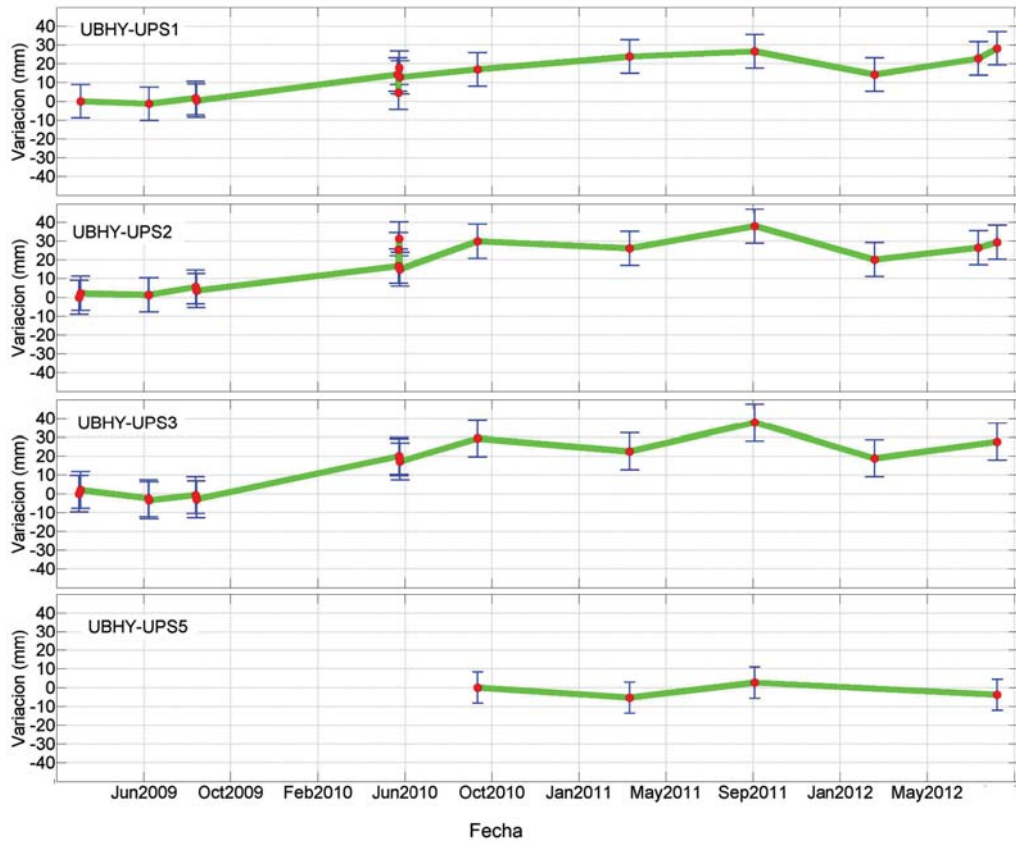


Figura 6.6 Resultados de las medidas electrónicas de distancia para la estación UBHY, En el flanco suroeste del volcán, por el cerro Huayrapata.

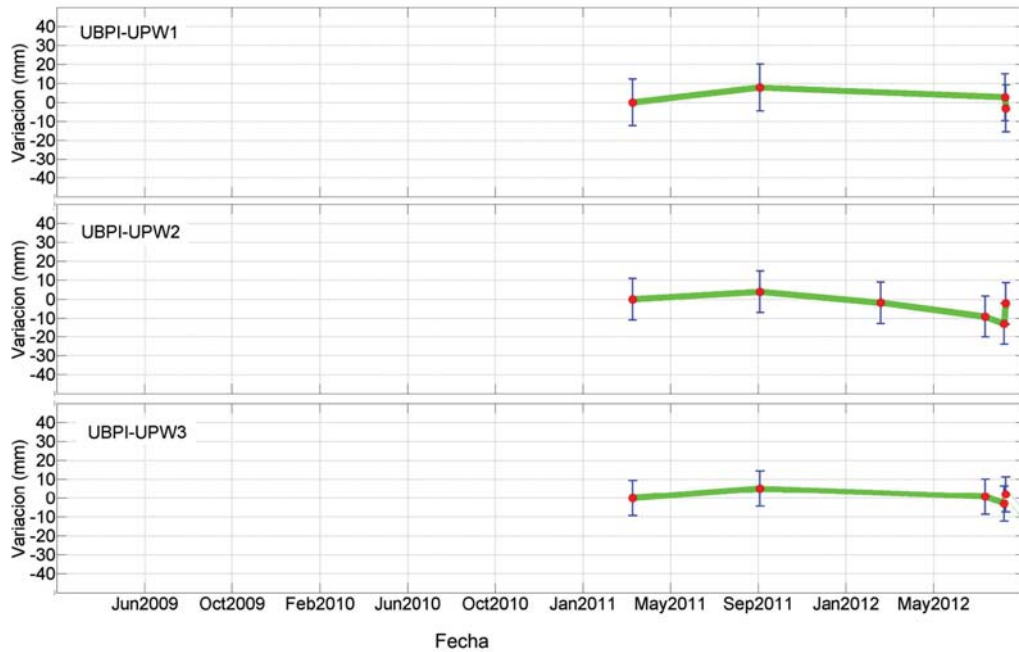


Figura 6.7 Resultados de las medidas electrónicas de distancia para la estación UBPI, ubicada en el flanco oeste del volcán, a orillas de la laguna Piscococha.

RESULTADOS DE GPS

Se realizaron lecturas de GPS durante el año 2011 en las cuatro estaciones base (UBQE, UBHY, UBPI y UBCH), se cuenta con un par de lecturas por cada base con lo cual se realizó el procesamiento absoluto mediante la técnica PPP (Precise Point Positioning), técnica de post-procesamiento que no requiere de estaciones de referencia. Este método utiliza las observables; código C/A y la fase portadora junto con archivos de efemérides precisas y correcciones de los relojes de los satélites, información puesta a libre disposición de los usuarios por los Centros de Análisis del IGS (International GNSS Service).

Los resultados se presentan en el cuadro 1, en donde se consigna la magnitud y precisión de los resultados para cada estación, en la

figura 6.8 se puede observar de manera gráfica la dirección y magnitud del desplazamiento calculados a partir de datos GPS. Estos resultados muestran vectores con orientaciones opuestas al edificio volcánico, lo que podría significar una deformación ascendente del volcán, sin embargo, es claro también que estos vectores presentan direcciones opuestas respecto de un plano imaginario que separa las estaciones UBPI y UBCH de las estaciones UBHY y UBQE, como si se tratara de una falla de rumbo. No se tiene evidencia de tal estructura en los estudios geológicos que se realizaron en este volcán, por lo que la recomendación sería densificar los puntos de GPS para verificar la tendencia más detallada de los vectores de deformación alrededor del volcán Ubinas.

Cuadro 6.1
Magnitud y error de la variación de posición en cada una de las estaciones, cálculos efectuados mediante post-procesamiento de datos GPS

Estación	Desplazamiento (mm)			Error (mm)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	δX	δY	δZ
UBQE	26	-9	17	± 32.2	± 5.8	± 44.3
UBPI	-47	-10	-9	± 23.8	± 7.3	± 55.8
UBHY	9	-6	12	± 29.1	± 5.8	± 42.5
UBCH	-9	3	-58	± 15.7	± 7.3	± 47.5

MONITOREO DE DEFORMACIÓN CON INSAR

También se han hecho análisis de imágenes con la técnica InSAR, los interferogramas obtenidos en el volcán Ubinas corresponden al periodo de tiempo 04/12/2004-13/05/2006 (figura 6.9A) y 26/

07/2008-24/10/2009 (figura 6.9B), respectivamente. En ambos interferogramas no se observa franjas de deformación sobre el edificio volcánico, lo que corrobora los datos de EDM.

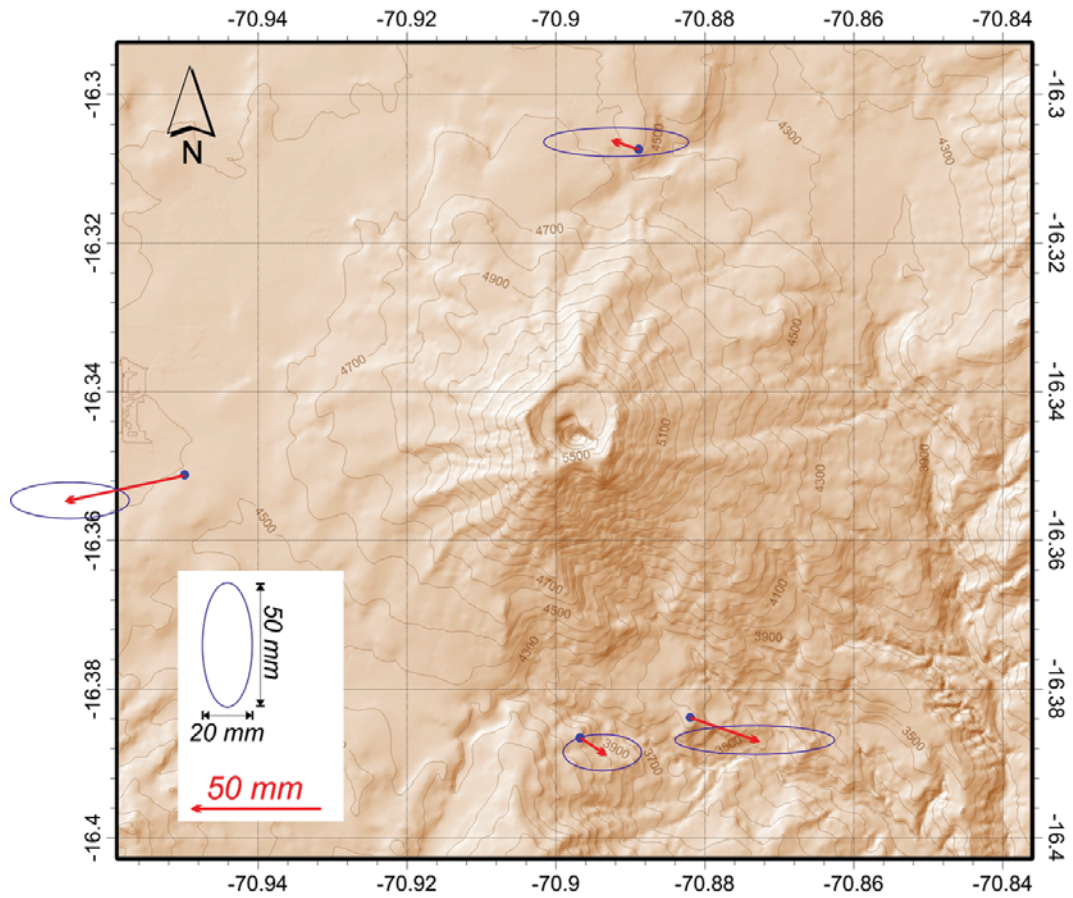


Figura 6.8 Resultados del procesamiento de datos GPS, para las cuatro estaciones base del volcán Ubinas. Las flechas rojas representan la dirección y magnitud del desplazamiento, y las elipses azules el rango de error de los cálculos para cada uno de los vectores.

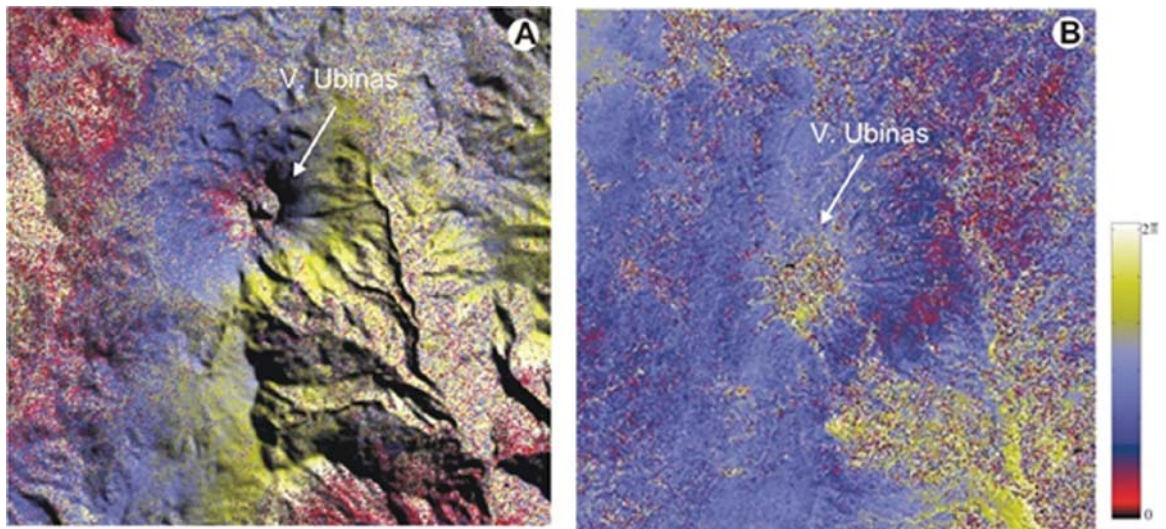


Figura 6.9 Interferogramas del volcán Ubinas, que corresponden a imágenes obtenidas: A) el 04/12/2004 y 13/05/2006 (Mariño et al., 2006). B) el 26/07/2008 y 24/10/2009 (González, 2009). No se observan franjas de deformación volcánica.

CAPÍTULO VII

MONITOREO VISUAL DEL VOLCÁN UBINAS

INSTALACIÓN DEL CAMPAMENTO BASE

El inicio de un nuevo proceso eruptivo del volcán Ubinas, evidenciada en marzo de 2006, incentivó a instituciones científicas como INGEMMET y la Municipalidad de Ubinas, a instalar el primer campamento base de monitoreo visual del volcán Ubinas, un mes después de iniciado el proceso eruptivo (figura 7.1A).

Este campamento base, se ubicó a 9 km en dirección SO del cráter del volcán y desde allí se podía observar y/o sentir los principales eventos

que ocurrían en el volcán (figura 7.1B). La observación y descripción de dichos eventos estuvo a cargo del Observador, quien fue capacitado adecuadamente para realizar los reportes inmediatos y diarios a la oficina de INGEMMET en Arequipa. Debido a las difíciles condiciones climáticas, en diciembre de 2006, el campamento se trasladó a la localidad de Sacohaya, ubicada a 7 km en dirección sur del cráter del volcán. Posteriormente, en enero de 2008, el campamento fue reubicado a la localidad de Ubinas.

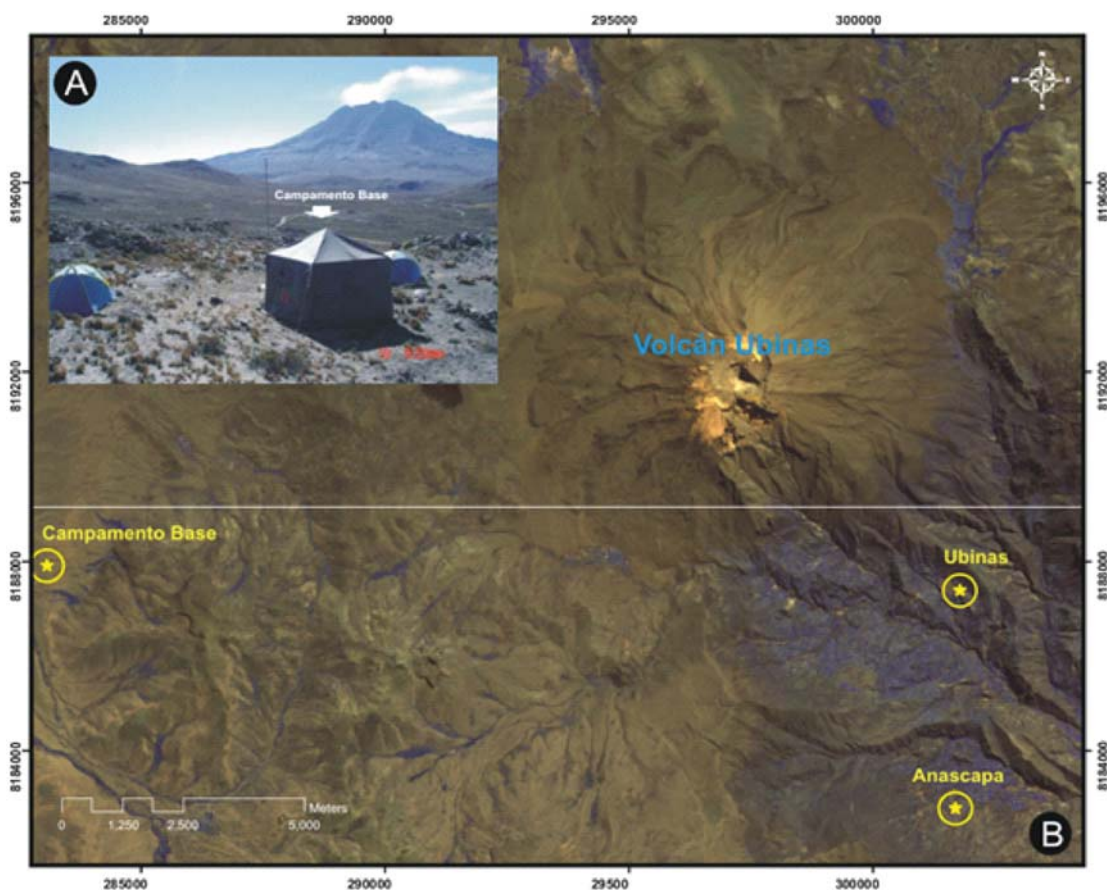


Figura 7.1 A). Foto del primer campamento base de INGEMMET desde donde se efectuó el monitoreo visual. B) Mapa de ubicación del campamento base y localidades donde fueron reubicadas.

PARÁMETROS REFERENCIALES EMPLEADOS

Los parámetros referenciales considerados en el monitoreo visual del volcán Ubinas han sido elaborados de acuerdo a las

características observadas durante los primeros tres meses del proceso eruptivo del volcán (marzo-mayo 2006). Estos parámetros son presentados en la figura 7.2 y son los siguientes:



Figura 7.2 Parámetros referenciales consideradas para el reporte del monitoreo visual del volcán

- **Fecha y hora de inicio de las emisiones fumarólicas y/o otros eventos.** Se consigna, claramente, la hora de inicio de cada evento (hora local). Para mayor precisión en la hora, el reloj utilizado fue calibrado con un GPS.
- **Altura de la columna eruptiva.** Para conocer la altura que alcanzan las columnas eruptivas se utilizó, como referencia, el ancho de la caldera del volcán (1 000 m). Esta medida se trasladó como patrón de medición vertical y con ello se obtuvo alturas aproximadas de la columna eruptiva.
- **Dirección preferente de la columna eruptiva.** Cuando las columnas eruptivas de ceniza y gases se elevan por encima del cráter del volcán Ubinas, estas son arrastradas por el viento, en determinada dirección, con relación a los puntos cardinales. En la figura 3.23, se presenta estas direcciones predominantes, tomando como punto central el cráter del volcán.

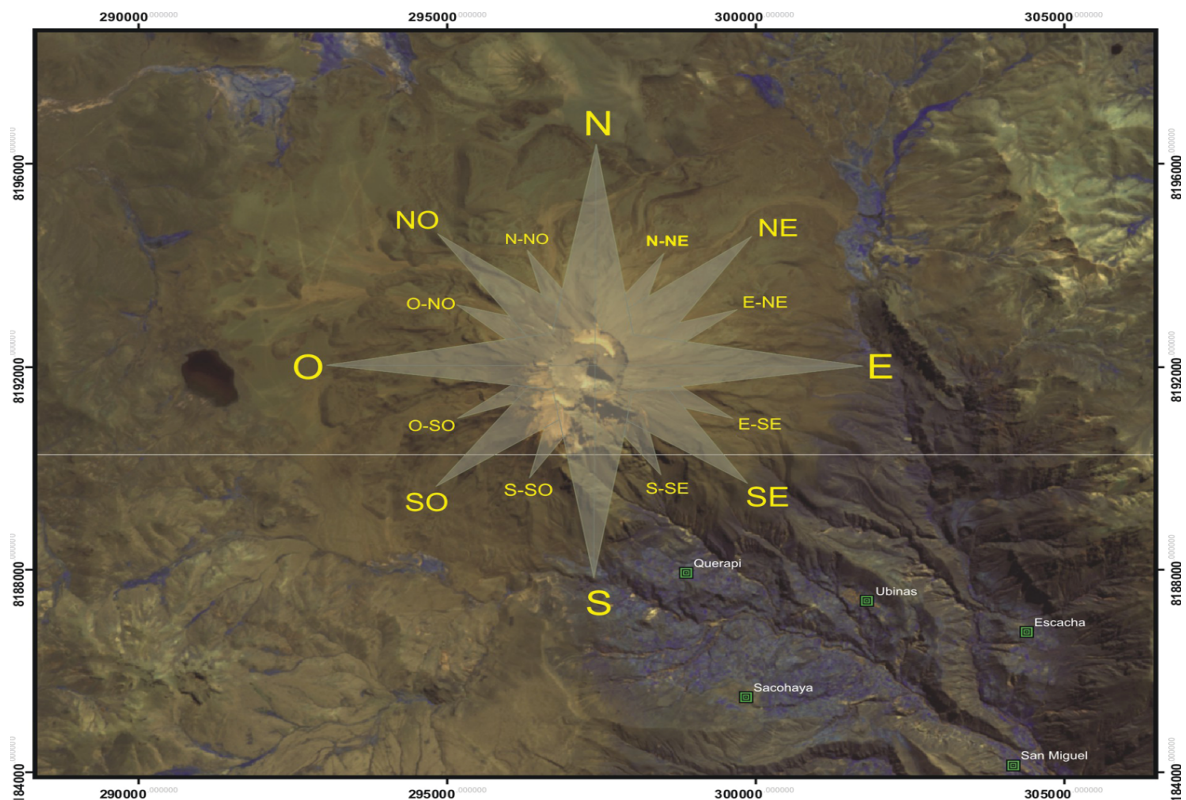


Figura 7.3 Direcciones de desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas, considerando los puntos cardinales.

- **Color, composición y densidad de la columna eruptiva.** El color, la composición y la densidad de la columna eruptiva están dominados, básicamente, por la cantidad de ceniza y gases emitidos.
- **Ocurrencia de las explosiones.** Siempre y cuando estas explosiones hayan sido sentidas, son clasificadas en fuertes, moderadas y débiles.
- **Emisiones volcánicas.** Se han clasificado en continuas, cuando las emisiones son prolongadas; a pulsos, cuando son cortas y constantes, inclusive, se puede tomar la hora de ocurrencia entre una y otra emisión; cuando estas emisiones son como bolas de gases, se les considera como bocanadas. Además estas emisiones suelen ser muy leves, leves, moderadas y considerables, dependiendo de la cantidad de material emitido.
- **Forma de la columna.** La forma está supeditada a la fuerza con que sale la columna eruptiva y la velocidad del viento. Si la velocidad del viento es débil, la columna eruptiva puede mantenerse vertical por un tiempo prolongado; pero si es fuerte,

la columna es arrastrada y se observará en forma inclinada. Cuando las emisiones no ascienden verticalmente, estas se muestran dispersadas en todas direcciones. Las columnas eruptivas también han sido correlacionadas con las características propias de plantas, como, formas de coliflor, hongo y algodón.

- **El tiempo meteorológico.** Este parámetro hace referencia a la presencia de nebulosidad en el volcán; por ello, se ha clasificado en nublado, por tanto, con visibilidad nula; parcialmente nublado, cuando aún puede observarse el volcán.

BASE DE DATOS

Con la información enviada por el observador de Ubinas, en la oficina de INGEMMET-Arequipa, se actualiza la base de datos. Esta base de datos, elaborada en Excel, contiene los parámetros referenciales propuestos para el volcán Ubinas y la descripción respectiva. En la figura 7.4, se presenta un ejemplo de la base de datos correspondiente a los días 1 al 6 de enero de 2009.

Reporte de la Monitoreo Visual - Periodo 2009													INGEMMET	
Fecha - Hora	Altura de columna		Dirección	Color				Densidad	Explosión			Desplazamiento Alporot. (m/h)	Tiempo Nublado	Descripción
	de (m)	a (m)		Amarillento	Azulino	Bianco	Gris claro		Gris oscuro	Débil: 1	Modorada: 2			
01/01/2009 04:48														Volcán cubierto de nubes, sin visibilidad durante todo el día.
01/01/2009 11:34														Rajada de Huayco del río Volcán Mayo de tamaño regular. El evento duró aproximadamente dos horas.
03/01/2009														Volcán cubierto de nubes, sin visibilidad durante todo el día.
03/01/2009 04:48														Cielo nublado, volcán sin visibilidad.
03/01/2009 06:38	100	200	NE					1						Pulsos constantes de gases (vapor de agua), en columna dispersa e inclinada.
03/01/2009 07:08														Volcán cubierto de nubes, sin visibilidad durante todo el día.
04/01/2009 04:50														Volcán cubierto de nubes, sin visibilidad.
04/01/2009 05:20														Se observan emisiones muy suaves, sin poder observar con claridad su altura.
04/01/2009 06:58	100	200	S					1						Emisiones muy leves de gases (vapor de agua), en columna dispersa.
04/01/2009 07:18														Emisiones muy leves, no se observa con claridad la altura.
04/01/2009 07:27														Volcán cubierto de nubes, sin visibilidad durante todo el día.
05/01/2009 05:17		80	NE					1						Emisiones tenues a pulsos de gases y poca ceniza en columna dispersa.
05/01/2009 07:06														Desprendimiento de rocas en el flanco Sur.
05/01/2009 08:46	200	300	NE					1						Emisiones tenues de gases azules constantes en columna dispersa.
05/01/2009 09:36	400	600	U					1						Pulsos constantes de gases (vapor de agua) y gases azules en forma de algodón.
05/01/2009 10:40	400	500	U					1						Emisiones tenues de gases azules constantes en columna dispersa.
05/01/2009 10:57	300	400	NE					1						Pulsos constantes de gases (vapor de agua) en columna dispersa inclinada y en forma de algodón.
05/01/2009 14:53	300	400	NE					1						Emisiones leves de gases (vapor de agua), en columna dispersa y continua.
05/01/2009 15:13														Volcán cubierto de nubes, sin visibilidad.
05/01/2009 04:55														Vientos fuertes en el volcán, sin visibilidad.
05/01/2009 05:45	300	400	S					1						Emisiones tenues de gases azules constantes en columna dispersa e inclinada.
05/01/2009 07:52	300	400	S					1						Pulsos constantes de gases (vapor de agua) en forma de algodón.
05/01/2009 10:43	300	400	S					1						Pulsos constantes de vapor de agua y gases azules en forma de algodón.

Figura 7.4 Ejemplo de la base de datos de monitoreo visual del volcán Ubinas. Esta información corresponde a los días 1 al 6 de enero de 2009.

DIVULGACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En la oficina de INGEMMET, una vez recopilada la información y actualizada la base de datos, se procedió a la divulgación en la página web de nuestra institución (<http://volcanes.ingemmet.gob.pe:86/>

portal_volcan/index.php?option=com_content&view=article&id=125&Itemid=181). La figura 7.5, muestra un ejemplo de la información publicada en la página y corresponde a los primeros doce días del mes de marzo de 2010.

Fecha - Hora	Altura de columna		Dirección	Color				Densidad	Explosión	Aprox. Desplazamiento (m)	Tiempo	Descripción
	da (m)	a (m)		Amarillento	Azulino	Blanco	Gris claro					
01/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
01/07/2010 08:11	300	400	SO					1				Pulsos constantes de vapor de agua y gases, sin columna
01/07/2010 08:50		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
01/07/2010 11:36		0										Vientos en la caldera, sin visibilidad durante el día.
02/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
02/07/2010 11:23		0										Presencia de nubes en la parte alta del volcán, sin visibilidad.
02/07/2010 15:15		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas, durante la tarde.
03/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
03/07/2010 12:31		0										Presencia de nubes en la parte alta del volcán, sin visibilidad.
03/07/2010 14:28		0										Cielo nublado, nubes en la parte alta del volcán, sin visibilidad durante la tarde.
04/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas, durante el día.
05/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas, durante el día.
06/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
06/07/2010 11:15		0										Vientos fuertes dentro de la caldera y borde del volcán, sin visibilidad.
06/07/2010 15:00		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas, durante la tarde.
07/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas, durante el día.
08/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
08/07/2010 12:00		0										Vientos en el borde y caldera del volcán, sin visibilidad durante el día.
09/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
09/07/2010 09:35		0										Vientos dentro de la caldera del volcán, sin visibilidad durante el día.
10/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
10/07/2010 11:25		0										Vientos fuertes en el borde y caldera del volcán, sin visibilidad durante el día.
11/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
11/07/2010 10:10		0										Vientos en la caldera, sin visibilidad durante el día.
12/07/2010 05:30		0										Actividad imperceptible en el volcán Ubinas.
12/07/2010 10:20		0										Vientos en las laderas y caldera del volcán, sin visibilidad durante el día.

Figura 7.5 Ejemplo de la base de datos del monitoreo visual y su respectiva publicación en la página web de INGEMMET, correspondiente a los primeros 12 días del mes de marzo de 2010.

RESULTADOS DEL MONITOREO VISUAL Y ANOMALÍAS TÉRMICAS

En la figura 7.6, se presentan los resultados del monitoreo visual del volcán Ubinas correspondiente al periodo septiembre 2005 a julio de 2012. En esta figura, se muestra la altura de las emisiones y/o columna eruptiva representada por el color de las emisiones (gases, ceniza, vapor de agua), el número de explosiones oídas durante este periodo y las principales anomalías térmicas observadas durante el año 2006, obtenidas de las imágenes GOES (http://goes.higp.hawaii.edu/cgi-bin/imag_e_view64?zoom=1&x_offset=150&yoffset=150&xcenter=310&ycenter=435&pix_r_e_p=2&frametype1=1&frametype2=0&siteidx=33&dayidx=1089&frameidx=06)

Septiembre 2005 a febrero 2006

Los reportes del monitoreo visual durante los meses antes del inicio del proceso eruptivo del volcán Ubinas (septiembre 2005 a febrero 2006), muestran que las emisiones fumarólicas fueron de color gris claro, y que alcanzaban alturas de hasta 200 m (Cruz, 2006); durante estos meses, las fumarolas del volcán Ubinas se desplazaron, en mayor porcentaje, en dirección norte (figura 7.7).

Desde el volcán Misti (~50 km de distancia), Mariño et al. (2006) observaron que las fumarolas de color blanquecino del volcán Ubinas se elevaban entre 200 m y 400 m por encima del borde de la caldera (figura 7.8).

Año 2006

En marzo del 2006, la actividad volcánica se incrementó paulatinamente; así, el 25 de marzo del 2006, pobladores de la localidad de Querapi situado a 4 km del cráter del volcán informaron la caída de ceniza sobre sus cultivos y viviendas.

Debido al incremento de la actividad volcánica, personal del INGEMMET se trasladó a la zona para efectuar estudios geológico-vulcanológicos, intensificar el monitoreo geoquímico e implementar el monitoreo geodésico y visual; este último, con la colaboración de la Municipalidad de Ubinas. Asimismo, el Instituto Nacional de Defensa de Defensa Civil (INDECI), mediante Oficio Múltiple Nro. 3768 del 2006, conformó el Comité Científico del Volcán Ubinas, integrado por el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), Instituto Geofísico del Perú (IGP) y el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín (IGUNSA), a fin de que este comité informe mediante comunicados la evolución de la actividad del volcán Ubinas.

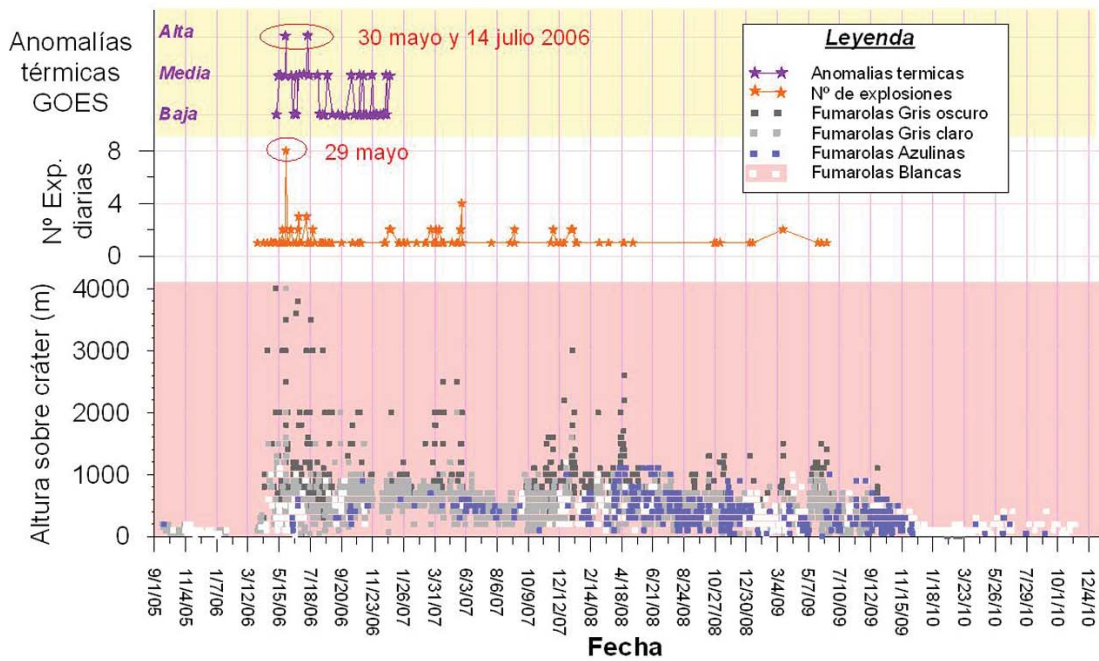


Figura 7.6 Monitoreo visual del volcán Ubinas durante el periodo septiembre 2005 a marzo de 2010. Altura y coloración de la columna eruptiva y número de explosiones por día.

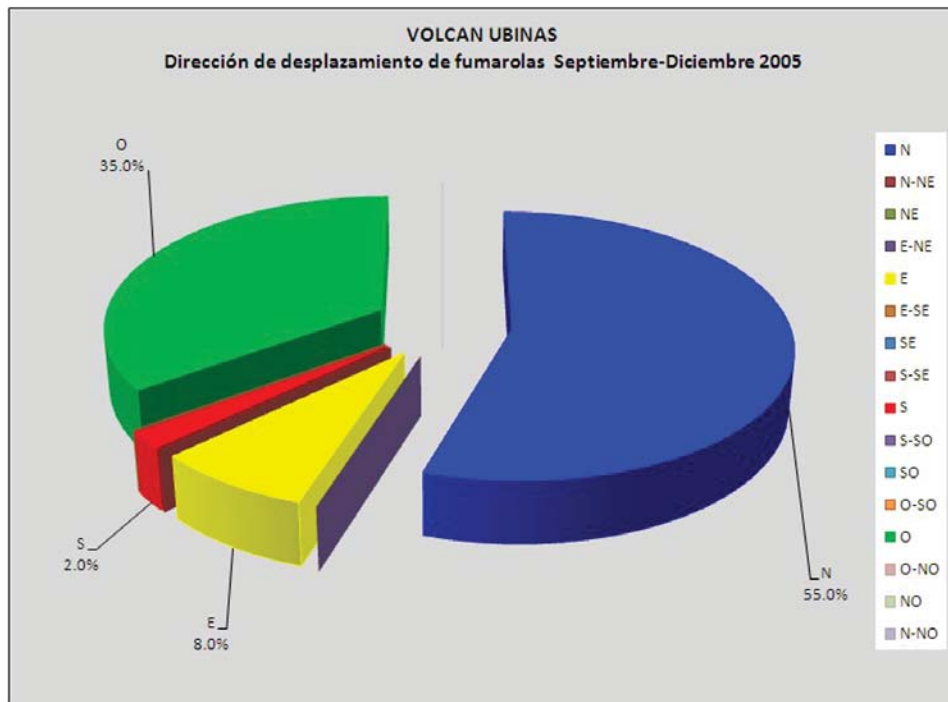


Figura 7.7 Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección norte, de septiembre a diciembre de 2005.



Figura 7.8 Foto del volcán Ubinas obtenida desde una distancia de 50 km en noviembre de 2005. (Tomado de Mariño et al., 2006).

La actividad volcánica más importante se presentó durante los meses de abril a agosto de 2006, con columnas eruptivas de ceniza de color gris oscuro que alcanzaron alturas de hasta 4000 m sobre el nivel del cráter (siempre se debe especificar el nivel de referencia), además de expulsión de bloques incandescentes y la ocurrencia de numerosas explosiones, entre las que destacaron las ocho explosiones ocurridas el 29 de mayo de 2006, además de las explosiones audibles del 27 de abril a las 18:30 horas (TL, tiempo local) y el 7 de mayo a las 20:55 horas TL (figura 7.9). El desplazamiento preferencial de las fumarolas fueron, principalmente, en dirección SE (figura 7.10), donde además, se ubican localidades más afectadas por la caída de ceniza (Querapi, Ubinas).

En este mismo periodo (junio a agosto de 2006), el Instituto de Geofísica y Planetología de Hawai, identificó y reportó en las imágenes GOES dos anomalías térmicas en el volcán Ubinas, el 30 de mayo a las 22:31 horas (Figura 7.11A) y el 14 de julio a las 01:01 horas (Figura 7.11B). Según Mariño et al. (2006), las anomalías identificadas hasta el 31 de mayo estuvieron relacionadas con el arribo de magma hacia la superficie y la formación de un domo o tapón de magma en el conducto, y por ende, con el incremento de la actividad del volcán entre el 29 de mayo y 3 de junio.

Durante el año 2006, el Comité Científico del Volcán Ubinas, emitió los comunicados 1 al 17 (Mariño et al., 2012), en las siguientes fechas: 5, 18, 20, 24 y 27 de abril; 17 y 30 de mayo; 13 de julio; 19 y 25 de agosto; 1, 8, 22 y 29 de septiembre; 14 y 30 de octubre. En el cuadro 7.1, se muestra los niveles de alerta volcánica publicados en cada uno de los comunicados.

Año 2007

Durante el año 2007, la actividad del volcán Ubinas continuó con la emisión de ceniza, gases de color azulino y vapor de agua. La ocurrencia de explosiones y la altura de la columna eruptiva fue disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar los 600 a 800 m en promedio y algunos picos de 2 000 m a 2500 m observados entre abril a junio del 2007. La figura 7.12 muestra la explosión del 16 abril, 15:10 horas, la columna de ceniza y gases alcanzó una altura de 2 500 m y se desplazó en dirección SE hasta 20 km de distancia. Similar al año 2006, el desplazamiento preferencial de las columnas eruptivas fueron en dirección SE (figura 7.13).

Durante el año 2007, el Comité Científico del Volcán Ubinas emitió los comunicados 18, 19 y 20 con fechas 19 de enero, 31 de marzo y 3 de junio, respectivamente (Mariño et al., 2012). En dichos comunicados, se recomienda al Sistema Regional de Defensa Civil de Moquegua (SIDERECEI-Moquegua) mantener el nivel de alerta en Amarilla.



Figura 7.9 Foto de la explosión del 7 de mayo de 2006, a las 20:55 horas (Clegg, 2006).

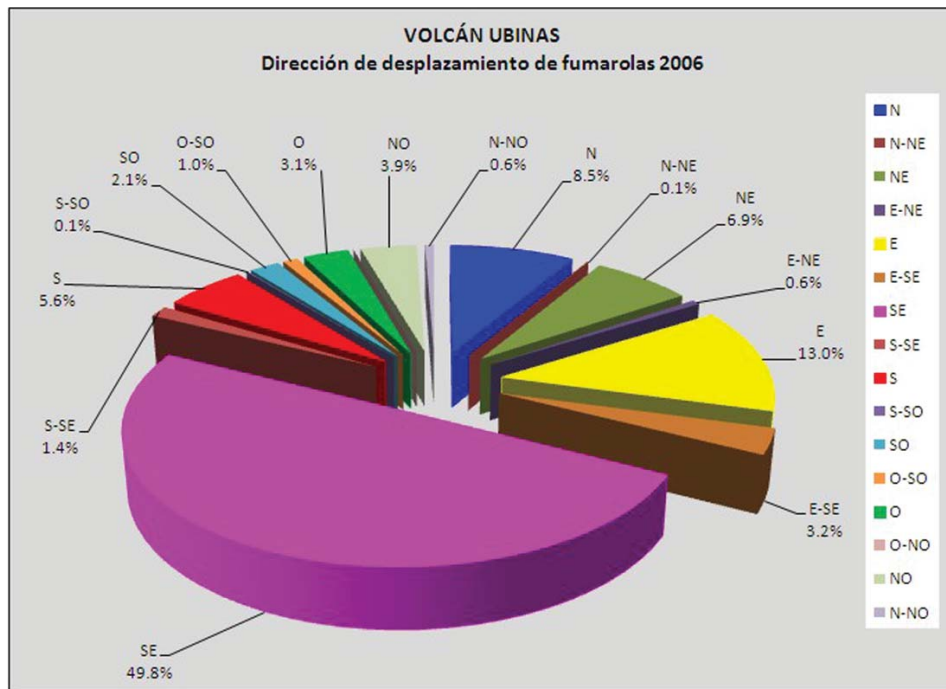


Figura 7.10 Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección SE, durante el año 2006.

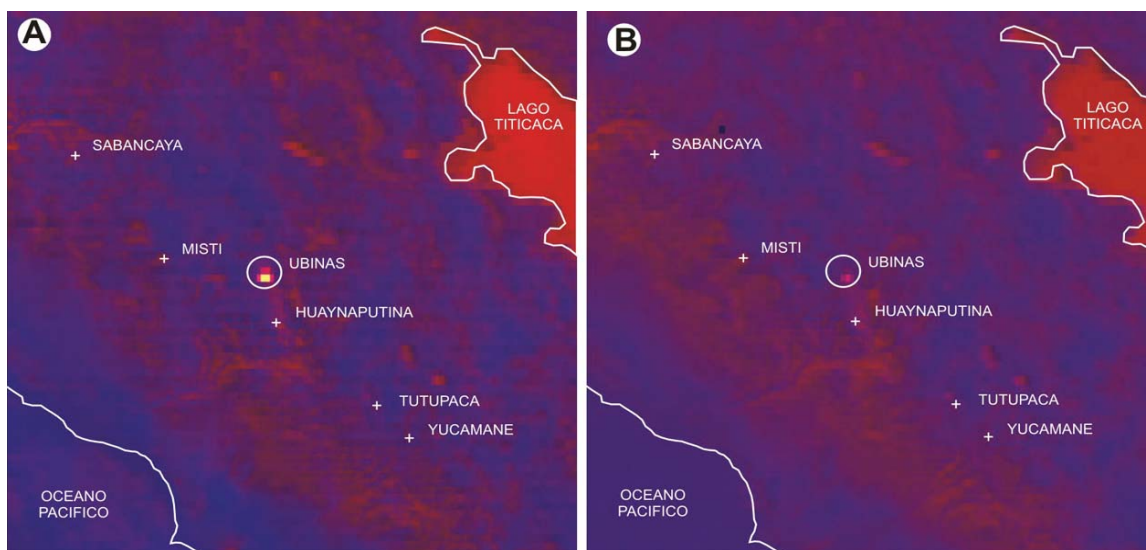


Figura 7.11 A) Anomalia térmica alta registrada por el satélite GOES: A) el 30 de mayo a las 22:31 horas, B) el 14 de octubre a las 01:01 horas. El pixel rojo (dentro del círculo blanco) es la anomalía.

Cuadro 7.1
Niveles de alerta del volcán Ubinas, publicados en los 17 comunicados del Comité Científico durante el año 2006

Meses	N° Comunicado	Nivel de alerta
Abril	1, 2, 5	Amarilla
	3, 4	Naranja
Mayo	6, 7	Amarilla
Junio	8	Naranja
Julio	9	Amarilla
Agosto	10, 11	
Septiembre	12, 13, 14, 15	
Octubre	16, 17	



Figura 7.12 Foto de la columna eruptiva formada después de la explosión del 16 de abril de 2007 (15:10 horas).

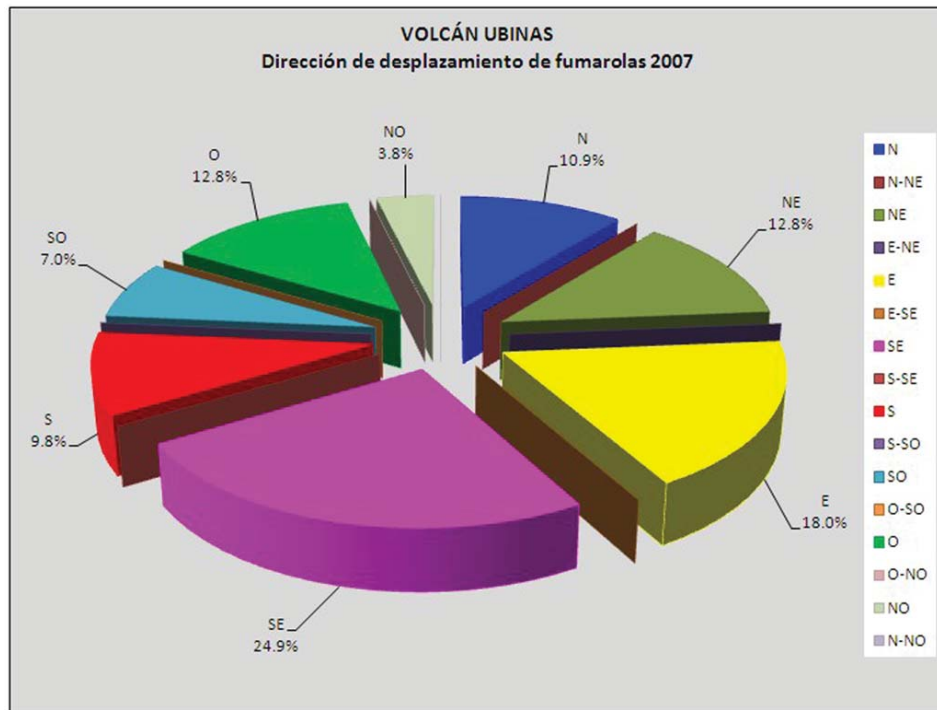


Figura 7.13 Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección SE, durante el año 2007.

Año 2008

La actividad volcánica del Ubinas durante el periodo enero-diciembre del 2008, fue similar a lo observado en el 2007; sin embargo, la actividad más importante se presentó entre los meses de enero y abril, con columnas eruptivas de ceniza, gases, vapor de agua y la ocurrencia de sucesivas explosiones audibles, dentro de las cuales destacan las ocurridas el 8 de enero a las 06:01 horas y 23 de abril a las 07:07 horas (figura 7.14). La altura de las

columnas eruptivas de ambas explosiones alcanzaron los 3 000 y 2 200 m sobre el cráter del volcán. En este año, el desplazamiento predominante de las columnas de erupción fue en dirección NE (figura 7.15).

Durante este año, el Comité Científico del Volcán Ubinas emitió los comunicados 21 y 22 con fechas 24 de enero y 2 de abril de 2008, en ambos comunicados se recomienda al SIDERECI-Moquegua mantener la alerta en Amarillo (Mariño et al., 2011).



Figura 7.14 Foto de la columna eruptiva formada después de la explosión del 23 de abril de 2008 (07:09 horas).

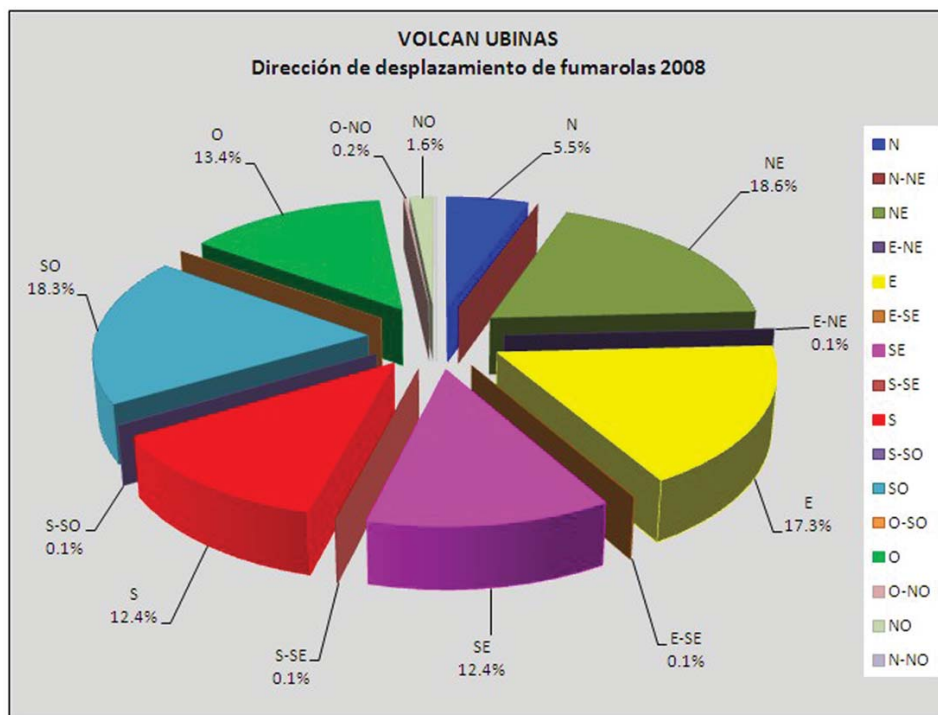


Figura 7.15 Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección NE, durante el año 2008.

Año 2009

Después de un periodo de actividad volcánica baja entre septiembre 2008 a enero de 2009, nuevamente la ocurrencia de cinco explosiones entre enero y junio de 2009 alarmó a los pobladores del valle de Ubinas. Las explosiones más representativas son las ocurridas el 12 de enero, 15 de marzo, 25 de mayo y 2 de junio, posterior a ello, se reportó la caída considerable de ceniza en las localidades de Querapi, Ubinas, Sacohaya, San Miguel y Tonohaya. La explosión del 2 de junio (figura 7.16) fue la más representativa ya que la columna eruptiva se desplazó en dirección NE hasta una distancia de 180 km (figura 7.17), la mayor distancia evidenciada desde el inicio del proceso eruptivo en marzo de 2006. Similar al año anterior, el desplazamiento preferencial de las columnas eruptivas fueron en dirección NE (figura 7.18). Debido a este nuevo incremento de la actividad volcánica, el Comité Científico del Volcán Ubinas emitió el Comunicado N°23, con fecha 27 de mayo de 2009, y recomendando al SIDERECI-Moquegua continuar en alerta Amarilla (Mariño et al., 2012).

Desde julio a diciembre del 2009, la actividad volcánica disminuyó considerablemente, no se registraron explosiones, la altura de la columna eruptiva, de color gris claro y gases azulinos, estuvo por debajo de los 800 m y solo se presentó un leve incremento en octubre donde la columna de emisión fue de color gris oscuro y alcanzó una altura de 1 200 m.

Año 2010

Entre enero y diciembre del 2010, la tendencia de disminución de la actividad volcánica se acentuó debido a que durante estos meses la altura máxima de las fumarolas de color blanco en forma de algodón fue de 400 m, por debajo de los registrados anteriormente, además de la ausencia de explosiones. En este contexto, el 5 de octubre del 2010, el Comité Científico del volcán Ubinas emitió el Comunicado N° 24 (Mariño et al., 2012), sugiriendo al SIDERECI-Moquegua bajar el nivel de alerta a Verde.

En este año, el desplazamiento preferencial de las fumarolas fue en dirección SO (figura 7.19).



Figura 7.16 Foto de la explosión del 2 de junio obtenidas a las 08:34 horas desde la localidad de Ubinas (cortesía J. Acosta).

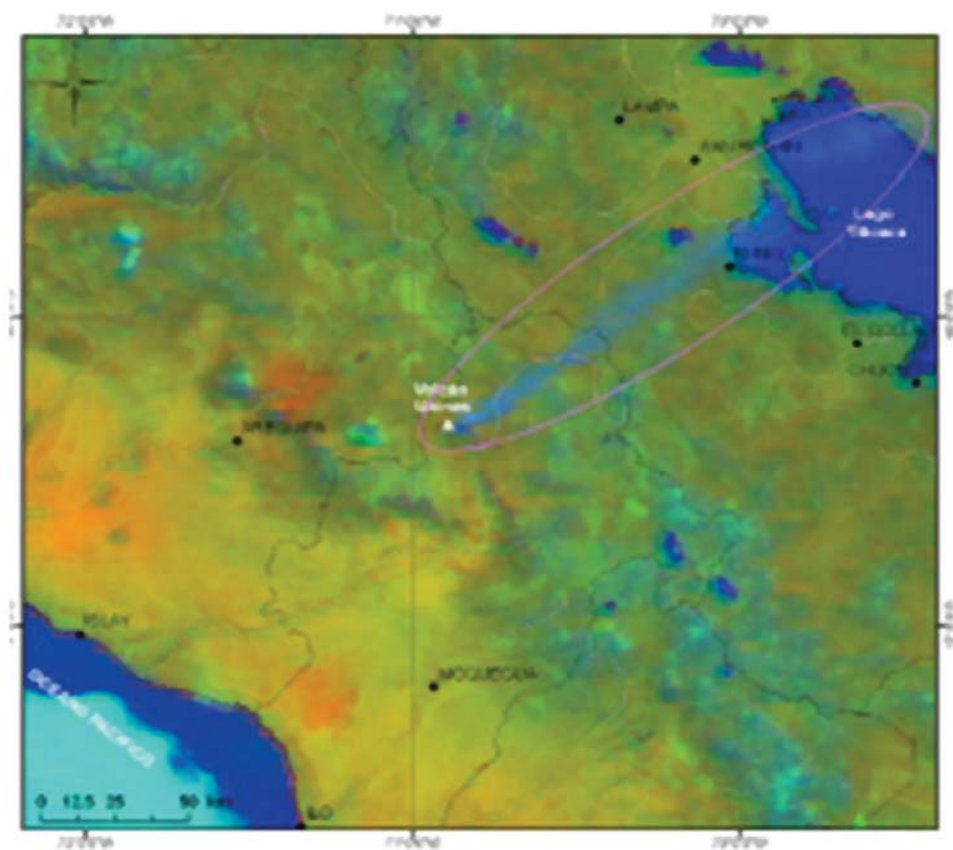


Figura 7.17 Imagen GOES obtenida después de la explosión del 2 de junio de 2009. El desplazamiento máximo es de 180 km, en dirección NE (imagen de las 10:31 horas).

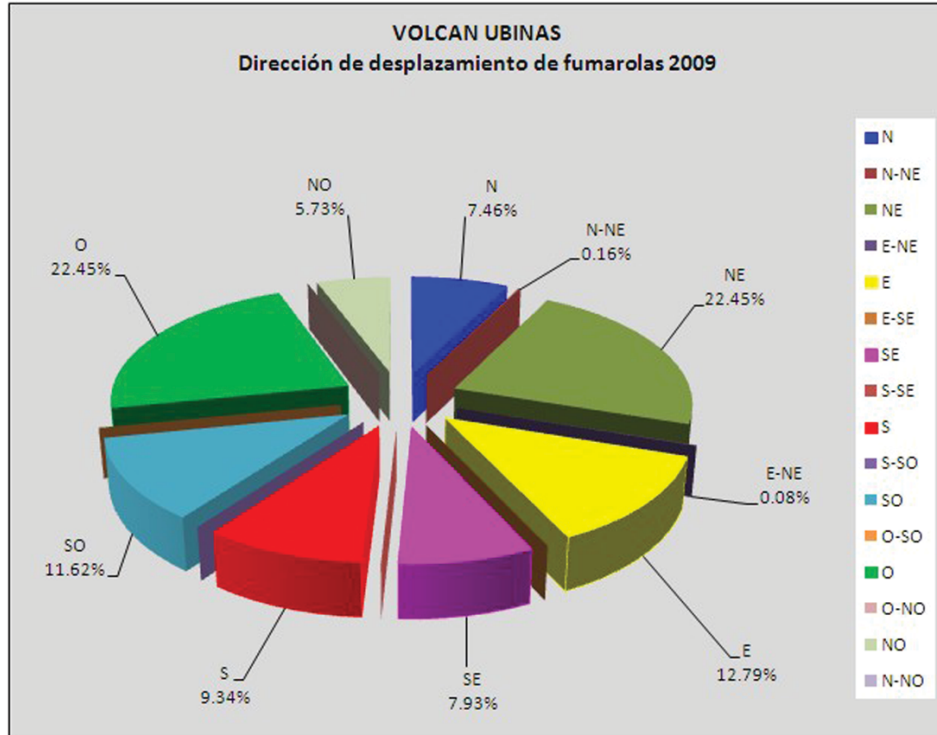


Figura 7.18 Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección NE, durante el año 2009.

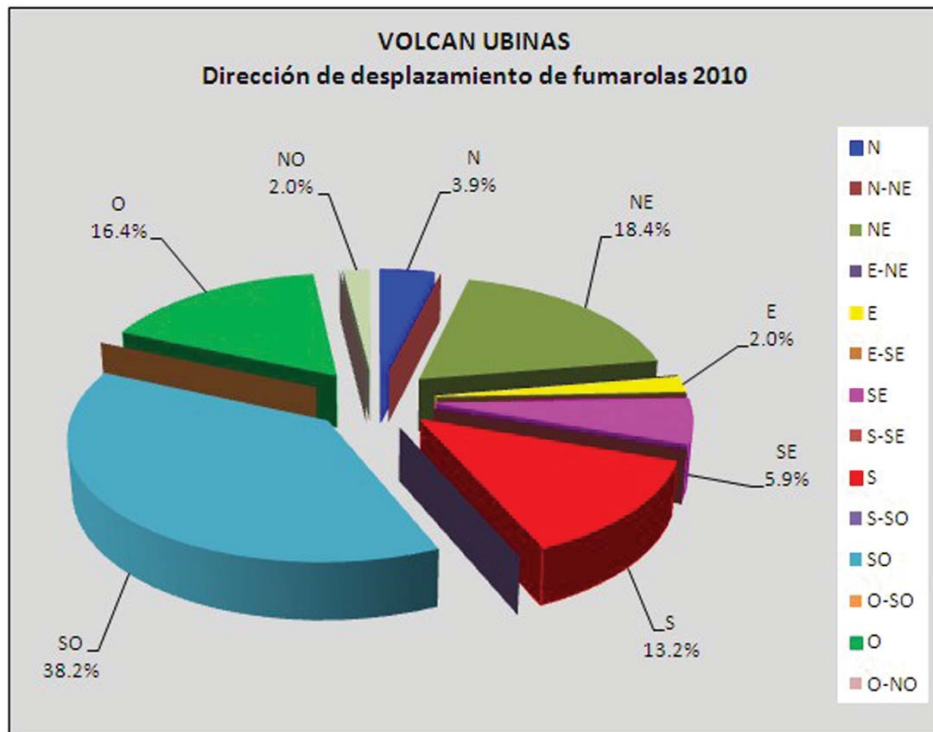


Figura 7.19 Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección SO, durante el año 2010.

DESPLAZAMIENTO DE LAS FUMAROLAS

En general, el desplazamiento de las columnas de emisión del volcán Ubinas, entre septiembre del 2005 y diciembre de 2010, fueron en dirección SE (22.1 %); es decir, en dirección del valle

de Ubinas donde se localizan las localidades de Querapi, Ubinas, Huatahua, Tonohaya, San Miguel, y Sacohaya. Estas localidades fueron afectadas considerablemente por la caída de cenizas.

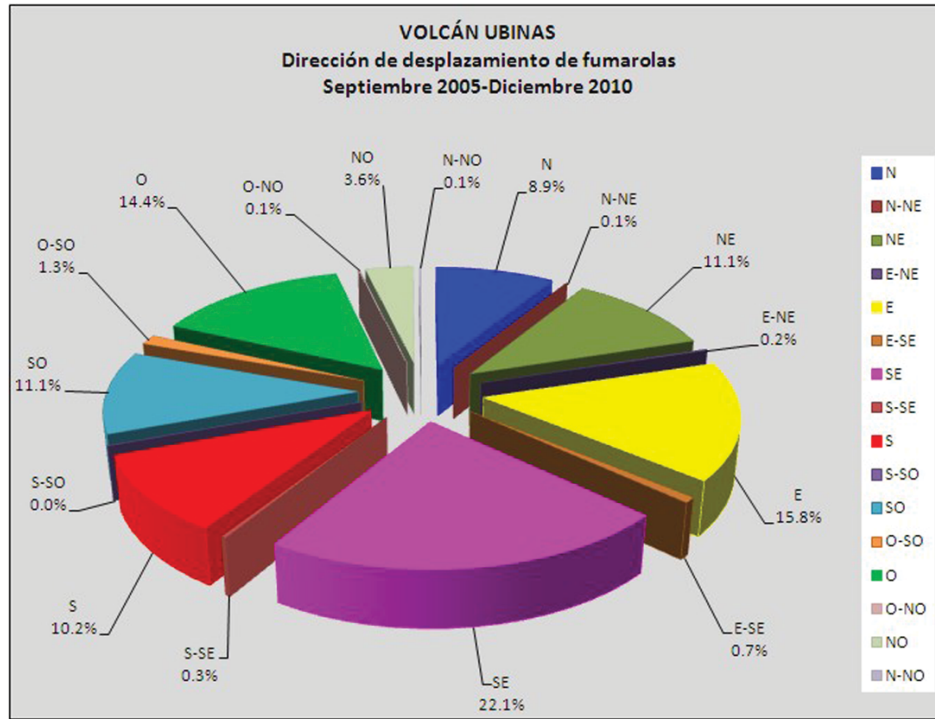


Figura 7.20 Desplazamiento preferencial de las columnas eruptivas del volcán Ubinas durante el periodo septiembre 2005 a diciembre 2010. El mayor porcentaje (22.1 %) corresponde a la dirección SE.

CONCLUSIONES

- Se caracterizó el sistema hidrotermal del volcán Misti, encontrando que este se encuentra en la parte alta del volcán alimentado por los gases magmáticos que ascienden por la chimenea, una parte de estos gases escapan por los intersticios del domo y bordes del cráter, con temperaturas sobre los 310 °C. Además, estas temperaturas son afectadas por el efecto de la estacionalidad. Otra parte de los gases reacciona con el agua freática infiltrada, parte de esta, desciende aflorando en los alrededores del Misti, sobre todo hacia el sur, como aguas termales diluidas con temperaturas menores a los 40 °C.
- Entre el 2005 y el 2012 se ha encontrado variaciones de temperatura, las más notables fueron en la fuente CHV, por efecto de la sismicidad regional, la más importante es la que ocurrió por efecto del terremoto de Pisco, que produjo una variación en la Temperatura del agua de alrededor de 6 °C.
- El monitoreo visual cualitativo del volcán Misti mostro que en los meses de verano (temporada de lluvias) son más visibles las fumarolas, mientras que en el monitoreo cuantitativo se observó que en las observaciones del 2012, las emisiones alcanzaron una altura máxima de 700 m sobre el cráter.
- El monitoreo geodésico del volcán Misti se ha iniciado con el diseño y la implementación de una red geodésica para el monitoreo de la deformación en el edificio volcánico, se están empleando las técnicas de EDM, GPS e InSAR. Los primeros resultados muestran que no hay variación en la forma del volcán, sin embargo, estos valores son importantes como línea base para compararlos con valores de deformación del volcán en etapas pre-eruptivas.
- En el volcán Ubinas las variaciones más significativas en la composición de las aguas termales se dieron antes de iniciarse la crisis eruptiva (marzo del 2006), las más resaltantes fueron en la razón de SO₄/Cl en la mayoría de fuentes termales.
- En la fuente UBT (Ubinas Termal), donde el monitoreo fue más continuo, se encontraron cambios relacionados estrechamente con la actividad volcánica. Variaciones en SO₄ y Cl antes de iniciarse la crisis eruptiva (final 2005- principios 2006), comportamiento anómalo de la temperatura durante el 2007 con variaciones de 0,6 °C, descenso de la temperatura desde el 2008 al 2012, de un promedio de 29,52 °C a 28,94 °C respectivamente; variaciones en SO₄ y CE, antes de terminar la crisis eruptiva (2009), aumento de Cl durante el periodo con la menor cantidad de fumarolas (2011), variación de los aniones al incrementarse nuevamente las fumarolas (finales del 2011), lo que demuestra una estrecha relación entre la actividad volcánica y el equilibrio físico químico de la fuente UBT.
- El incremento de la concentración de SO₂ en las fumarolas del volcán Ubinas medido en febrero y mayo del 2006 de 1500 ppm-m a 2800 ppm-m respectivamente, respondió a un incremento de la actividad volcánica.
- El monitoreo visual del volcán Ubinas entre el 2005 y el 2010, un incremento dramático en la altura máxima de las emisiones, de 200 m sobre el cráter en el 2005 a 4000 m entre abril y mayo del 2006, acompañada de gran cantidad de ceniza, posteriormente la altura de las misiones fue disminuyendo con periodos en los que aumentaba la actividad. En noviembre del 2009 se registró la última emisión de ceniza, después de este periodo las emisiones fueron principalmente de color blanco y con alturas menores a los 500 m.
- Al igual que el volcán Misti, en el volcán Ubinas se han culminado la primera etapa de diseño e implementación de la red geodésica de monitoreo de deformación del edificio volcánico empleando las técnicas de EDM, GPS e InSAR. A pesar de haber registrado datos al final del periodo eruptivo del Ubinas, no se han encontrado valores claros que indiquen una inflación o deflación del volcán, sin embargo estos datos son importantes para continuar generando la línea base con la cual se pueda comparar los futuros valores de deformación de este volcán.

BIBLIOGRAFÍA

- Banks, N.G.; Tilling, R.I.; Harlow, D.H. & Ewert, J.W. (1989) - Volcano monitoring and short-term forecasts. En: Tilling, R.I., ed. *Volcanic hazards*. Washington D.C: American Geophysical Union, Short Course in geology, vol. 1, p. 51-80.
- Birnie, R.W. & Hall, J.H. (1974) - Geochemistry of the Misti Volcano, Peru fumaroles. *Bulletin Volcanologique*, 38(1): 1-15. DOI: 10.1007/BF02597797.
- Brantley, S.R., ed. (1990) - The eruption of Redoubt Volcano, Alaska, December 14, 1989-August 31, 1990. *U.S. Geological Survey Circular* 1061, 41 p.
- Chaffaut, I.; Coudrain-Ribstein, A.; Michelot, J.L. & Pouyau, B. (1998) - Précipitations d'altitude du nord-Chili, origine des sources de vapeur et données isotopiques. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 27(3): 367-384.
- Clegg, S. (2006) - *Volcanic SO₂ measurements at Ubinas volcano, Perú, Field report*, informe inédito. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 3 p. (disponible DGAR INGEMMET).
- Cruz, J.V. & Franca, Z. (2006) - Hydrogeochemistry of thermal and mineral water springs of the Azores archipelago (Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 151(4): 382-398.
- 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.
- Cruz, V.; Gonzales, K.; Macedo, O. & Fournier, N. (2009) - Caracterización Geoquímica de las Fuentes Termales y Frías Asociadas al Volcán Ubinas en el Sur del Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú* 103: p. 265-281.
- De Silva, S.L., Francis, P.W. (1991) - *Volcanoes of the Central Andes*. Berlin: Springer-Verlag, 216 p.
- De Silva, S.L. & Zielinski, G.A. (1998) - Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru. *Nature*, 393(6684): 455-458.
- De Silva, S.L.; Adams, N.A.; Arbesman, K.; Permenter, J.L.; Salas, G. & Self, S. (1998a) - Vent character and eruption stratigraphy of the 1600 A.D. eruption of Huaynaputina, Peru. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 30(7): 44.
- De Silva, S.L.; Alzueta, J. & Salas, G. (2000) - The socioeconomic consequences of the A.D. 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. En: McCoy, F.W. & Heiken, G., eds., *Volcanic hazards and disasters in human antiquity*. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Paper 345, p. 15-24.
- Dzurisin, D. (2007) - *Volcano deformation: geodetic monitoring techniques*. Berlin: Springer, Praxis, 441 p.
- Ewert, J.W.; Miller, C.D.; Hendley, J.W. & Stauffer, P.H. (1997) - Mobile response Team saves lives in volcanic crises. *U.S. Geological Survey Fact Sheet* 064-97, 2 p.
- Fidel, L.; Morche, W. & Núñez, S. (1997) - Riesgo volcánico en el Sur del Perú. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 16, 72 p.
- Giggenbach, W.F. (1988) - Geothermal solute equilibria; derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749-2765.
- Giggenbach, W.F. (1992) - Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth and Planetary Science Letters* 113(4): 495-510.
- Gonfiantini, R. (1978) - Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature (London)*, 271(5645): 534-536.
- Gonzales, K. (2009) - *Informe: Monitoreo InSAR de los volcanes Misti, Ubinas y Ticsani - 2009* (en línea). Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. 8 p. Disponible en: <<http://volcanes.ingemmet.gob.pe:86/ingemmet/docu/publicaciones/ticsani/informes/3/untitled44/files/monitoreo%20insar%20volcanes%20misti%20ubinas%20ticsani%202009.pdf>>

- Harlow, D.H.; Power, J.A.; Laguerta, E.P.; Ambubuyog, G.; White, R.A. & Hoblitt, R.P. (1996) - Precursory seismicity and forecasting of the June 15, 1991, eruption of Mount Pinatubo. En: Newhall, C.G. and Punongbayan, R.S., eds. *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Quezon City: Philippine Institute of Volcanology and Seismology; Seattle: University of Washington Press, p. 285-305. También disponible en: <<http://pubs.usgs.gov/pinatubo/harlow/index.html>>
- Hochstein, M.P. & Browne, P.R.L. (2000) - Surface manifestations of geothermal systems with volcanic heat sources. En: Sigurdsson, H., ed., *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 835-855.
- Instituto Geofísico del Perú (2010) - *Últimos sismos sentidos* (en línea). Lima: IGP. (consulta: 25 mayo 2010). Disponible en: <http://www.igp.gob.pe/sismologia/sismo/IGPSIS/sis_sens.htm>
- Lahr, J.C.; Chouet, B.A.; Stephens, C.D.; Power, J.A. & Page, R.A. (1994) - Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment; implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1-4): 137-151.
- Lavallée, Y.; De Silva, S.L.; Salas, G. & Byrnes, J.M. (2006) - Explosive volcanism (VEI 6) without caldera formation: insight from Huaynaputina volcano, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 68(4): 333-348.
- Mariño, J. (2002) - *Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur de Perú)*. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. 160 p.
- Mariño, J.; Rivera, M.; Cruz, V.; Cacya, L. & Thouret, J.C. (2006) - *Informe de trabajos efectuados por el INGEMMET durante la crisis volcánica del volcán Ubina, periodo marzo a julio del 2006*, informe técnico inédito. Arequipa: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 77 p.
- Mariño, J.; Rivera, M.; Macedo, O.; Masías, P.; Antayhua, Y. & Thouret, J.C. (2011) - Gestión de la crisis eruptiva del volcán Ubina 2006-2008. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 45, 199 p.
- Martin Del Pozzo, A.L.; Aceves, F.; Espinasa, R.; Aguayo, A.; Inguaggiato, S., et al. (2002) - Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Chemical Geology*, 190(1-4): 207-229.
- Masías, P. (2007) - *Estudios geoquímicos de las fuentes termales y frías asociadas al volcán Misti*. Tesis Lic. Química, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 85 p.
- Masías, P. (2008) - Estudios geoquímicos de las fuentes de aguas termales y frías asociadas al volcán Misti (póster). En: Congreso Iberoamericano de Química, Cusco, 2008. Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad.
- Masías, P.; Antayhua, Y.; Cruz, V.; Mariño, J. & Rivera, M. (2008a) - Variations of the temperature in the hot springs waters «Ubina Termal» related to the eruptive activity of the volcano Ubina during the year 2007 and 2008 (poster). En: Field Workshop on Volcanic Gases, 10, México, 2008. México: International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), Commission of the Chemistry of Volcanic Gases.
- Masías, P.; Antayhua, Y.; Cruz, V.; Rivera, M. & Mariño, J. (2008b) - Vigilancia geoquímica y visual del volcán Ubina período 2005-2008 (CD ROM). En: Congreso Peruano de Geología, 14; Congreso Latinoamericano de Geología, 13, Lima, 2008. *Resúmenes*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 6 p.
- Masías, P.; Taipe, E.; Antayhua, Y.; Ramos, D.; Apaza, F. & Lazarte, I. (2012) - *Monitoreo del volcán Ubina, periodo 2011*, informe inédito. Arequipa: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 12 p.
- Mogi, K. (1958) - Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bulletin of The Earthquakes Research Institute*, 36: 99-134.
- Murray, T.L.; Ewert, J.W.; Lockhart, A.B. & Lahusen, R.G. (1996) - The Integrated mobile volcano-monitoring system used by the Volcano Disaster Assistance Program (VDAP). En: Scarpa, R.; Tilling, R.I., eds. *Monitoring and mitigation of volcano hazards*. Berlin: Springer-Verlag, p. 315-362.
- Nicholson, K. (1993) - *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Berlin: Springer-Verlag, 278 p.
- Rivera, M. (1998) - *El volcán Ubina (sur del Perú): geología, historia eruptiva y evaluación de las amenazas volcánicas actuales*. Tesis Ing. Geólogo., Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 129 p.
- Rivera, M. (2010) - *Genèse et évolution des magmas andésitiques à rhyodacitiques récents des volcans Misti et Ubina (Sud du Pérou)*. Thèse Docteur, Université Blaise Pascal-Clermont Ferrand II, 407 p.

- Shevenell, L. & Goff, F. (2000) - Temporal geochemical variations in volatile emissions from Mount St. Helens, USA, 1980-1994. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 99(1-4): 123-138.
- Simkin, T. & Siebert, L. (1994) - *Volcanoes of the world: a regional directory, gazetteer, and chronology of volcanism during the last 10,000 years*. 2a. ed. Tucson, AR: Geoscience Press, 349 p.
- Sulca, P. (2012) - *Caracterización hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica de los acuíferos de la sub cuenca del río Chili*. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 176 p.
- Taran, Y.A.; Pokrovsky, B.G. & Esikov, A.D. (1988) - Deuterium and oxygen- 18 in fumarolic steam and amphiboles from some Kamchatka volcanoes: «andesitic» waters. *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), Commission on the Chemistry of Volcanic Gases Newsletter*, (1): 15-18.
- Taran, Y.A.; Pokrovsky, B.G. & Dubik, Y.M. (1989) - Isotopic composition and origin of waters in andesitic magmas. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 304(2):440-443.
- Tavera, H. (2006) - *Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua)*. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 77 p.
- Tavera, H. & Villegas, J. (2010) - *Sismo de Tacna del 5 de mayo del 2010 (6.5 ML) región sur del Perú*, informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 14 p. Informe Técnico N° 03-2010.
- Thouret, J.C.; Dávila, J. & Eissen, J.P. (1999) - Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru. *Geology*, 27(5): 435-438.
- Thouret, J.C.; Finizola, A.; Fornari, M.; Legeley-Padovani, A.; Suni, J. & Frechen, M. (2001) - Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12):1593-1610.
- Thouret, J.C.; Rivera, M.; Wörner, G.; Gerbe, M.C.; Finizola, A., et al. (2005) - Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67(6): 557-589.
- Tilling, R.I. (1989) - Volcanic hazards and their mitigation: progress and problems. *Reviews of Geophysics*, 27(2):237-269.
- Villar, M. (2008) - *Establecimiento de una red geodésica de nivelación precisa en el volcán Irazú, Costa Rica, a partir de observaciones GPS*. Informe final Ing. Geofísico, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, 59p.
- Vinciguerra, S.; Elsworth, D. & Malone, S. (2005) - The 1980 pressure response and flank failure of Mount St. Helens (USA) inferred from seismic scaling exponents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144(1-4):155-168.
- White, R.A. (1996) - Precursory deep long-period earthquakes at Mount Pinatubo: spatio-temporal link to a basalt trigger. En: Newhall, C.G. and Punongbayan, R.S., eds. *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Quezon City: Philippine Institute of Volcanology and Seismology; Seattle: University of Washington Press, p. 307-327. También disponible en: <http://pubs.usgs.gov/pinatubo/white/index.html>

ANEXOS

Fuente	Fecha	T°	pH	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	Al	Sr	LI	Ba	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	B	SiO ₂	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn	Co	Cd	Ni	Cr	As	Hg	
AGS	18/01/2008	17.8	6.38	698	403																											
AGS	14/03/2008	17.0	6.20	749	366																											
AGS	27/04/2008	17.8	6.22	817	399																											
AGS	18/06/2008	17.0	6.12	820	401																											
AGS	17/08/2008	16.2	6.24	820	419																											
AGS	31/10/2008	17.4	6.19	752																												
AGS	25/09/2009	17.3	6.16	784	382	82.28	44.77	41.25	9.59	0.003	0.667	0.03	0.062	ND	380.4	19.10	56.00	0.460	0.0034	0.0034	0.0074	ND	0.0005	ND	0.0005	ND	0.0032	0.0085	0.0198	0.0001		
AGS	23/10/2009	17.3	6.21	705	337	83.60	48.28	47.62	11.12	ND	0.789	0.03	0.06	ND	ND	18.20	32.30	0.269	0.0006	0.0103	ND	0.0004	ND	0.0004	ND	0.003	0.0254	0.0234	ND	ND		
AGS	28/12/2009	17.9	6.21	785	383	86.29	39.13	38.50	10.31	ND	0.688	0.03	0.058	1.3	419.1	18	54.8	3784.000	0.0014	0.0087	ND	0.0004	ND	0.0004	0.000	ND	0.0036	0.022	0.0231	ND	ND	
AGS	31/03/2010	17.9	6.33	763	374																											
AGS	01/06/2010	17.0	6.30	784	383																											
AGS	25/02/2011	17.4		848	415	85.59	40.89	46.38	9.95	0.038	0.752	0.03	0.052	N.D.	386.3	19.2	54.9	48.7	ND	0.03	ND	0.144	0.2631	ND	0.144	0.2631	ND	ND	ND	ND	ND	
AGS	29/11/2011	18.3	6.37	858	488	90.90	44.40	52.70	13.00	ND	0.820	0.02	0.054	N.D.	487.8	15.2	64.2	93.3	ND	0.02	0.008	0.100	0.0150	ND	0.100	0.0150	ND	0.02	ND	ND	ND	
TIN	17/02/2006	20.1	6.43			61.00	42.00	105.00	14.50	0.015	0.610	0.16	0.113		103.4	129.80	178.00		ND		0.013	0.005				ND					ND	
TIN	23/09/2006	19.0	6.50	1136	568																											
TIN	20/09/2007	20.8	6.35	1016	550																											
TIN	18/12/2007	21.0	6.55	991	536																											
TIN	28/01/2008	21.0	6.37	935	505																											
TIN	07/02/2008	21.0	6.36	943	510																											
TIN	29/02/2008	20.9	6.41	951	515																											
TIN	15/03/2008	20.8	6.40	1035	539																											
TIN	27/04/2008	20.1	6.74	1133	558																											
TIN	19/06/2008	20.8	6.47	1149	566																											
TIN	22/08/2008	20.0	6.38	1112	547																											
TIN	29/05/2009	19.9	6.44	1212	499																											
TIN	29/12/2009	20.3	6.72	1119	550	64.04	43.07	97.78	14.42	ND	0.542	0.17	0.057	2.7	246.6	125.90	204.4	1.552	0.0018	0.0078	ND	0.0088	ND	0.0088	0.000	ND	0.0028	0.0119	0.0455	ND		
TIN	24/03/2010	20.3	6.78	1100	541	56.60	41.56	107.20	14.32	0.005	0.562	0.15	0.056			126.80	208.80	1.472	0.0039	0.0056	ND	0.0012	ND	0.0012	0.000	ND	0.0051	0.0006	0.0373	ND		
TIN	25/02/2011	21.6		1110	547	63.29	41.63	99.23	13.99	ND	0.568	0.15	0.055	N.D.	196.8	164.5	170.4		ND	ND	ND	0.088	0.0043	ND	0.088	ND	0.011	ND	0.03	0.03		
TIN	26/10/2011	20.1	7.53		510	63.40	43.40	109.80	14.60	ND	0.570	0.15	0.055	N.D.	242.3	148.5	288		ND	ND	ND	0.018	0.088	ND	0.018	ND	0.016	ND	0.06	0.06		
TIN	04/12/2011	20.5	6.55	1136	560	67.70	46.20	118.50	15.70	ND	0.630	0.16	0.061	N.D.	293.1	155.1	287.8		ND	ND	ND	0.03	0.088	ND	0.03	ND	0.023	ND	0.04	0.04		
TIN	22/03/2012	22.2	6.78	1027	518	64.20	41.70	107.20	15.50	ND	0.590	0.17	0.021	N.D.	290.5	118.3	189.5		0.006	0.011	ND	0.080	0.3230	ND	0.080	0.002	ND	0.021	ND	0.06	0.06	

RELACIÓN DE ILUSTRACIONES Y CUADROS

Figuras

- Figura 1.1** Distribución del volcanismo en el sur peruano.
- Figura 1.2** Modelo de un sistema hidrotermal y su interacción con los gases volcánicos (modificado de Hochstein & Browne, 2000)
- Figura 1.3** Equipos utilizados en el monitoreo geoquímico: (A) Termómetro (B) pH-metro (C) Conductímetro.
- Figura 1.4** A) La superficie volcánica al inicio de un incremento de magma, véase la posición inicial de las estaciones geodésicas. B) El magma asciende y genera inflación y por ende deformación en la superficie del volcán y cambio en la posición de los hitos geodésicos.
- Figura 1.5** Foto del receptor GPS Trimble R6.
- Figura 1.6** GPS de frecuencia simple marca THALES modelo ProMark3.
- Figura 1.7** Estación Total marca: Topcon, modelo GPT 8002A
- Figura 2.1** Ubicación de las 17 fuentes muestreadas para la caracterización del volcán Misti.
- Figura 2.2** Diagrama de Piper Hill Langgeliier, donde se identificaron los tres tipos de agua a las cuales pertenecen las fuentes circunscritas al volcán Misti.
- Figura 2.3** Diagrama ternario $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ (Nicholson, 1990).
- Figura 2.4** Diagrama del Geotermómetro Na-K-Mg de Giggenbach (1988).
- Figura 2.5** Adquisición de datos en las cinco fuentes termales donde se realiza el monitoreo del volcán Misti, entre septiembre 2005 y julio 2012.
- Figura 2.6** Fotos de muestreo de agua realizada en las fuentes: (A) Charcani V, CHV, (B) Umaluso, UMA; (C) Jesús, JES; (D) Agua Salada, AGS y (E) Tingo, TIN.
- Figura 2.7** Resultados expresados en SO_4/Cl , para las seis fuentes de monitoreo del volcán Misti.
- Figura 2.8** Resultados del monitoreo en las fuentes JES, UMA, TIN, AGS y CHV entre el 2005 y 2012, graficados en el diagrama Ternario $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ (Giggenbach, 1988).
- Figura 2.9** Gráfica donde se compara la temperatura con el TDS obtenido de los resultados del monitoreo en las fuentes JES, UMA, TIN, AGS y CHV entre el 2005 y 2012. Las flechas indican las fuentes que no tienen relación directa entre la temperatura y la cantidad de sales disueltas.
- Figura 2.10** Variaciones de la composición química y parámetros fisicoquímicos de la fuente CHV.
- Figura 2.11** Vista de las fumarolas del domo de lava sobrepasando el borde de la caldera del Misti en julio del 2011.
- Figura 2.12** Ubicación de las zonas de emisión de fumarolas en el cráter del volcán Misti.
- Figura 2.13** Vista del cráter del volcán Misti, donde se observa las zonas de emisión de fumarolas del fondo del cráter y paredes del interior Este.
- Figura 2.14** A) Ensayos cualitativos del gas ácido sulfhídrico (H_2S), realizados en las fumarolas en el cráter del Misti. A) En la estación MST-F1. B) En la estación MST-F3.
- Figura 2.15** Disposición de los registradores de temperatura, estación MST-F1.

- Figura 2.16** Registro de la temperatura en las tres zonas de la estación MST-F1, entre agosto 2006 y noviembre 2010, además se detalla el intervalo de registro y el equipo utilizado.
- Figura 2.17** Comparación de la temperatura tratada del periodo septiembre 2006 a agosto 2007 de los tres registradores de la estación MST-F1.
- Figura 2.18** Gráfica de la temperatura de MST-F1 por años, del 2006 al 2011.
- Figura 2.19** Resultados de los isótopos estables del Agua (Hidrógeno y Oxígeno) muestreados en el 2011 en las fumarolas del cráter del Misti y en la fuente CHV, además se incluyeron resultados de isótopos de las fumarolas del cráter del Misti tomadas en 1967 (Birnie & Hall, 1974), de fuentes de agua muestreadas en el 2009 (Sulca, 2012), la línea de aguas meteóricas para el desierto de Atacama (Chaffaut et al., 1998) y la zona de las aguas andesíticas (Taran et al., 1989b; Giggenbach 1992).
- Figura 3.1** Parámetros físicos que se consideraron en el cálculo teórico de deformación para el volcán Misti, usando el modelo de Mogi.
- Figura 3.2** Resultados de los cálculos de deformación a partir del modelo teórico de Mogi (1958)
- Figura 3.3** Mapa geológico del volcán Misti en donde se han delimitado las zonas inestables en los flancos oeste y sur (tomado de Thouret et al., 2001).
- Figura 3.4** Planos estructurales de los monumentos que son usados como bases para EDM y GSP. Además se acompaña una foto donde muestra el monumento terminado y en uso.
- Figura 3.5** Secuencia de la instalación de un prisma con perno de expansión. (a) se perfora manualmente, (B) se ancla el perno de expansión, (B) (D) y (E) mediante un adaptador de bronce se acopla el prisma al perno y se ajusta untando pegamento para metal, (F) se protege el prisma con masilla plástica y (G) se pinta el punto para la ubicación con la estación total.
- Figura 3.6** Diseño de la red geodésica para el monitoreo de deformación en el volcán Misti.
- Figura 3.7** Curvas de variación de las distancias de la estación base MBCU respecto de cuatro prismas del flanco oeste.
- Figura 3.8** Curvas de variación de las distancias de la estación base MBTO respecto de seis prismas del flanco oeste.
- Figura 3.9** Curvas de variación de las distancias de la estación base MBS1 respecto de tres prismas del flanco sur.
- Figura 3.10** Curvas de variación de las distancias de la estación base MBS3 respecto de cuatro prismas del flanco sur.
- Figura 3.11** Curvas de variación de las distancias de la estación base MBCH respecto de dos prismas del flanco norte.
- Figura 3.12** Curvas de variación de las distancias de la estación base MBTA respecto de los tres prismas del flanco este.
- Figura 3.13** Vectores de desplazamiento para un periodo de seis meses en las bases del volcán Misti.
- Figura 3.14** Interferograma del volcán Misti, que corresponde a imágenes del 12/04/2007 y 12/11/2009 (González, 2009).
- Figura 4.1** Fotos obtenidas entre noviembre del 2007 y noviembre de 2010, donde se aprecia el tamaño de las fumarolas en el domo de lava del cráter del volcán Misti. (La imagen de noviembre 2007 es una cortesía de V. Aguilar).
- Figura 4.2** Secuencia de fotos de la emisión de gases del volcán Misti.
- Figura 4.3** Fotos de las principales emisiones fumarólicas del Misti que se produjeron entre el 2008 y 2010.
- Figura 4.4** Estación MST-V1(A) Imagen de la cámara de video que monitoreo el volcán Misti. (B) Imágenes de los registros digitales de la estación de monitoreo visual MST-V1.
- Figura 4.5** Gráfica de las características de las fumarolas registradas entre abril 2009 y octubre del 2011.
- Figura 4.6** Gráfica de la altura de las fumarolas en el volcán Misti entre enero y julio del 2012. Se muestra cuando las fumarolas alcanzaron un máximo de 700 m en junio.
- Figura 5.1** Mapa de ubicación de las fuentes de monitoreo geoquímico del volcán Ubinas entre el 2005 y 2012.

- Figura 5.2** Fechas de muestreo en las ocho fuentes de agua donde se realiza el monitoreo del volcán Ubinas entre septiembre 2005 y julio 2012.
- Figura 5.3** Imágenes de las fuentes (A) UBT, (B) UBF, (C) HUA, (D) MAT, (E) ISP, (F) LOG, (G) VOL y (H) CHI.
- Figura 5.4** En el diagrama superior se muestra la relación SO_4/Cl en función del tiempo, donde podemos observar los datos recopilados en las fuentes UBT, UBF, MAT, CHI, HUA, VOL, LOG e ISP, durante el periodo de muestreo 2005 al 2012. En el diagrama inferior se presenta la ampliación del diagrama de la relación SO_4/Cl donde se muestran los periodos pre eruptivo y eruptivo.
- Figura 5.5** Diagrama Ternario $SO_4-Cl-HCO_3$ (Giggenbach, 1988), donde se observan los datos obtenidos durante el año 2005 en las fuente UBT y UBF.
- Figura 5.6** Gráfica donde se compara la temperatura con el TDS obtenidos de los resultados del monitoreo en las fuentes UBT, LOG, VOL, HUA, ISP, CHI entre el 2007 y 2012; UBF entre el 2007 y 2008; MAT entre 2007 y 2010.
- Figura 5.7** Resultados de los parámetros fisicoquímicos (T° , pH, CE), Aniones: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl y Cationes: Ca, Mg, Na, K y Óxido de Silicio (SiO_2) obtenidos en la fuente UBT entre septiembre de 2005 a julio de 2012.
- Figura 5.8** Calibración del equipo «FLYSPEC» para realizar las mediciones de SO_2 en la caldera del volcán Ubinas (tomado de Clegg, 2006).
- Figura 5.9** Imagen de la caldera del volcán Ubinas.
- Figura 6.1** Diseño de la red geodésica para el monitoreo de deformación en el volcán Ubinas.
- Figura 6.2** Fotos de los pilares de concreto construidos para el monitoreo geodésico en el volcán Ubinas. A) UBCH, es un pilar cilíndrico construido sobre afloramiento rocoso, B) UBQE, pilar cuadrado construido sobre suelo blando poco profundo.
- Figura 6.3** Secuencia de la instalación de un prisma con perno de expansión. A) Se perfora manualmente, B) se ancla y sella el perno de expansión, C) y D) mediante un adaptador de bronce se acopla el prisma al perno y se ajusta untando pegamento para metal, E) se protege el prisma con masilla plástica y F) se pinta el punto para la ubicación con la estación total.
- Figura 6.4** Resultados de las medidas electrónicas de distancia para la estación UBCH, en el flanco norte del volcán, en el cerro Chimin.
- Figura 6.5** Resultados de las medidas electrónicas de distancia. Para la estación UBQE, ubicada en el flanco sur del volcán, cerca del poblado de Querapi.
- Figura 6.6** Resultados de las medidas electrónicas de distancia para la estación UBHY, En el flanco suroeste del volcán, por el cerro Huayrapata.
- Figura 6.7** Resultados de las medidas electrónicas de distancia para la estación UBPI, ubicada en el flanco oeste del volcán, a orillas de la laguna Piscococha.
- Figura 6.8** Resultados del procesamiento de datos GPS, para las cuatro estaciones base del volcán Ubinas. Las flechas rojas representan la dirección y magnitud del desplazamiento, y las elipses azules el rango de error de los cálculos para cada uno de los vectores.
- Figura 6.9** Interferogramas del volcán Ubinas, que corresponden a imágenes obtenidas: A) el 04/12/2004 y 13/05/2006 (Mariño et al., 2006). B) el 26/07/2008 y 24/10/2009 (González, 2009). No se observan franjas de deformación volcánica.
- Figura 7.1** A). Foto del primer campamento base de INGEMMET desde donde se efectuó el monitoreo visual. B) Mapa de ubicación del campamento base y localidades donde fueron reubicadas.
- Figura 7.2** Parámetros referenciales consideradas para el reporte del monitoreo visual del volcán.
- Figura 7.3** Direcciones de desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas, considerando los puntos cardinales.
- Figura 7.4** Ejemplo de la base de datos de monitoreo visual del volcán Ubinas. Esta información corresponde a los días 1 al 6 de enero de 2009.

- Figura 7.5** Ejemplo de la base de datos del monitoreo visual y su respectiva publicación en la página web de INGEMMET, correspondiente a los primeros 12 días del mes de marzo de 2010.
- Figura 7.6** Monitoreo visual del volcán Ubinas durante el periodo septiembre 2005 a marzo de 2010. Altura y coloración de la columna eruptiva y número de explosiones por día.
- Figura 7.7** Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección norte, de septiembre a diciembre de 2005.
- Figura 7.8** Foto del volcán Ubinas obtenida desde una distancia de 50 km en noviembre de 2005. (Tomado de Mariño et al., 2006).
- Figura 7.9** Foto de la explosión del 7 de mayo de 2006, a las 20:55 horas (Clegg, 2006).
- Figura 7.10** Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección SE, durante el año 2006.
- Figura 7.11** A) Anomalía térmica alta registrada por el satélite GOES: A) el 30 de mayo a las 22:31 horas, B) el 14 de octubre a las 01:01 horas. El pixel rojo (dentro del círculo blanco) es la anomalías.
- Figura 7.12** Foto de la columna eruptiva formada después de la explosión del 16 de abril de 2007 (15:10 horas).
- Figura 7.13** Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección SE, durante el año 2007.
- Figura 7.14** Foto de la columna eruptiva formada después de la explosión del 23 de abril de 2008 (07:09 horas).
- Figura 7.15** Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección NE, durante el año 2008.
- Figura 7.16** Foto de la explosión del 2 de junio obtenidas a las 08:34 horas desde la localidad de Ubinas (cortesía J. Acosta).
- Figura 7.17** Imagen GOES obtenida después de la explosión del 2 de junio de 2009. El desplazamiento máximo es de 180 km, en dirección NE (imagen de las 10:31 horas).
- Figura 7.18** Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección NE, durante el año 2009.
- Figura 7.19** Desplazamiento de las columnas eruptivas del volcán Ubinas en dirección SO, durante el año 2010.
- Figura 7.20** Desplazamiento preferencial de las columnas eruptivas del volcán Ubinas durante el periodo septiembre 2005 a diciembre 2010. El mayor porcentaje (22.1 %) corresponde a la dirección SE.

Cuadros

- Cuadro 1.1** Erupciones volcánicas con registro histórico.
- Cuadro 1.2** Equipos de medición de los parámetros fisicoquímicos.
- Cuadro 1.3** Características de los registradores de datos de temperatura.
- Cuadro 1.4** Laboratorios químicos donde se realizaron los análisis de aguas.
- Cuadro 1.5** Métodos de análisis de aguas y sus respectivas normas de regulación, efectuados en los laboratorios: (1) INGEMMET A, (2) CIMM-Perú (3), SERVLAB-UNSA, (4) INSPECTORATE, (5) INGEMMET B.
- Cuadro 1.6** Técnicas de monitoreo de deformación en volcanes (Villar, 2008)
- Cuadro 2.1** Ubicación de las fuentes termales muestreadas para la caracterización del volcán Misti. Las coordenadas están en UTM (Datum: WGS84).
- Cuadro 2.2** Fechas de inicio del muestreo de las cinco fuentes termales que se monitorearon en el volcán Misti.
- Cuadro 2.3** Estaciones de monitoreo de las fumarolas en el cráter del volcán Misti.
- Cuadro 2.4** Resultados de los ensayos cualitativos y del análisis de las fumarolas en las estaciones MST-F1, MST-F2, MST-F3 y MST-F5.
- Cuadro 3.1** Listado de las estaciones, bases y prismas instalados y los propuestos para el monitoreo de deformación en el volcán Misti (hasta julio de 2012).
- Cuadro 3.2** Valores de desplazamiento en cada una de la bases de monitoreo geodésico del volcán Misti

- Cuadro 5.1** Ubicación de las fuentes termales muestreadas durante el periodo de monitoreo 2005-2012, en coordenadas UTM 19K y la altura está en msnm.
- Cuadro 5.2** Promedio anual de la temperatura en la fuente UBT.
- Cuadro 5.3** Resultado de las mediciones realizadas con el espectrómetro de correlación Ultravioleta «FLYSPEC» durante el 2006 (Clegg, 2006).
- Cuadro 6.2** Magnitud y error de la variación de posición en cada una de las estaciones, cálculos efectuados mediante post-procesamiento de datos GPS.
- Cuadro 7.1** Niveles de alerta del volcán Ubinas, publicados en los 17 comunicados del Comité Científico durante el año 2006.