

RESPUESTA DEL IGP ANTE LA CRISIS DEL VOLCAN UBINAS EN EL AÑO 2006

Orlando Macedo ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Geofísico del Perú, Calle Badajoz 169, Mayorazgo, IV Etapa, Ate Vitarte, Lima-Perú. E-mail: orlando.macedo@igp.gob.pe

ANTES DE LA CRISIS 2006: INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOFÍSICAS Y GEOQUÍMICAS DEL VOLCAN UBINAS

Antes de la crisis que se inició en marzo 2006, se hicieron diversos estudios de investigación geofísica y geoquímica a fin de conocer mejor la estructura interna del volcán, así como el estado de su actividad. En base a los mencionados estudios, a continuación se hace un resumen de los avances científicos y del estado general del volcán antes de crisis eruptiva.

Entre 1997-1999 el Instituto Geofísico del Perú desplego un gran esfuerzo de investigación, donde se aplicaron diferentes métodos geológicos (Rivera et al, 1997), geofísicos (Macedo, 1998; Metaxian et al, 1998, Gonzales, 2001) y geoquímicos (Macedo et al., 2002), se realizaron mediciones de temperatura del suelo, y observaciones detalladas del interior del cráter activo. Tales resultados permitieron de proponer un modelo de estructura y de circulación de fluidos (Macedo et al, 2002) propio a este volcán.

Para llegar a conocer la estructura del volcán, así como las principales características en la circulación de fluidos en y a proximidad del cono volcánico, se efectuaron: (a) Mediciones de potencial espontaneo o PE, y de la temperatura sobre el piso de la caldera, (b) Mediciones de PE a escala de todo el edificio volcánico; (c) Monitoreo de la actividad sísmica sobre el cono volcánico; (d) Análisis de la concentración de CO₂ en los gases del suelo tanto sobre el edificio como al interior de la caldera; y (e) Análisis geoquímico de aguas termales y frías próximas a la zona del volcán.

Cabe indicar, asimismo, que el IGP había ya emprendido antes de 1997 diversos estudios geológicos en este y otros volcanes activos. Es así que los estudios de Rivera (1997) señalan los principales rasgos geológicos y tectónicos del área y hace notar la presencia de sistema de fallas y/o fracturas que cruzan al volcán. Una de estas fallas es aquella de dirección N30°W dentro del cráter y caldera y que aparece incluso prolongada al exterior de la caldera, hacia el SE, en dirección del valle de Ubinas.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- El mapa del Potencial Espontáneo delinea una anomalía negativa muy notoria, que tiene forma casi circular. Por sus dimensiones (6 x 7 km) y su posición esta anomalía es interpretada en términos estructurales como debidos a la presencia de una cicatriz de una antigua gran caldera. Anomalías de características similares han sido anteriormente

encontradas en edificios volcánicos andesíticos (Ramos, 2000). Por otra parte, la confección de un mapa de Zoneación de Ce muestra que el alargamiento de las curvas coincide con la prolongación de la falla local N30°W inferida por Rivera (1997) y que cruzaría la caldera y cráter del volcán. El origen de la manifestación de esta anomalía PE en superficie puede ser debido a la discontinuidad lateral de la litología por el desplazamiento de la falla, y la anomalía puede ser incrementada por la existencia de una infiltración preferencial de las aguas meteóricas a través de esta zona.

- Los mapas detallados del PE y de temperatura del piso de la caldera no presentan anomalías, mientras que el gas del suelo muestra valores de concentración de CO₂ pequeños a excepción de una zona que está alineada con la prolongación de la falla N30°W. Es decir que prácticamente no se observa manifestaciones del sistema hidrotermal sobre la superficie al nivel de la caldera, lo que indicaría que el sistema hidrotermal del Ubinas es un sistema cerrado. Los gases que salen a gran presión en el fondo del cráter constituyen el único lugar de relajamiento de presiones.
- Una actividad sísmica permanente ha sido registrada, y ha revelado señales relacionadas a movimiento de fluidos. En efecto, eventos de tipo LP y TO se producen bajo la zona sumital del volcán, dentro de la probable zona del sistema hidrotermal, y sus focos más superficiales se encuentran desplazados de unos 400-500 metros al NW respecto del centro del cráter. Este hecho es compatible con la idea que los gases de fumarolas observadas en el fondo del cráter llegan allí gracias a conductos facilitados por la presencia de la falla N30°W.

Los estudios sismo-volcánicos determinaron la existencia de una importante sismicidad caracterizada por diverso tipo de sismos asociados a fracturas (VT) y paso de fluidos (LP, tremores y tornillos) en las inmediaciones del cono.

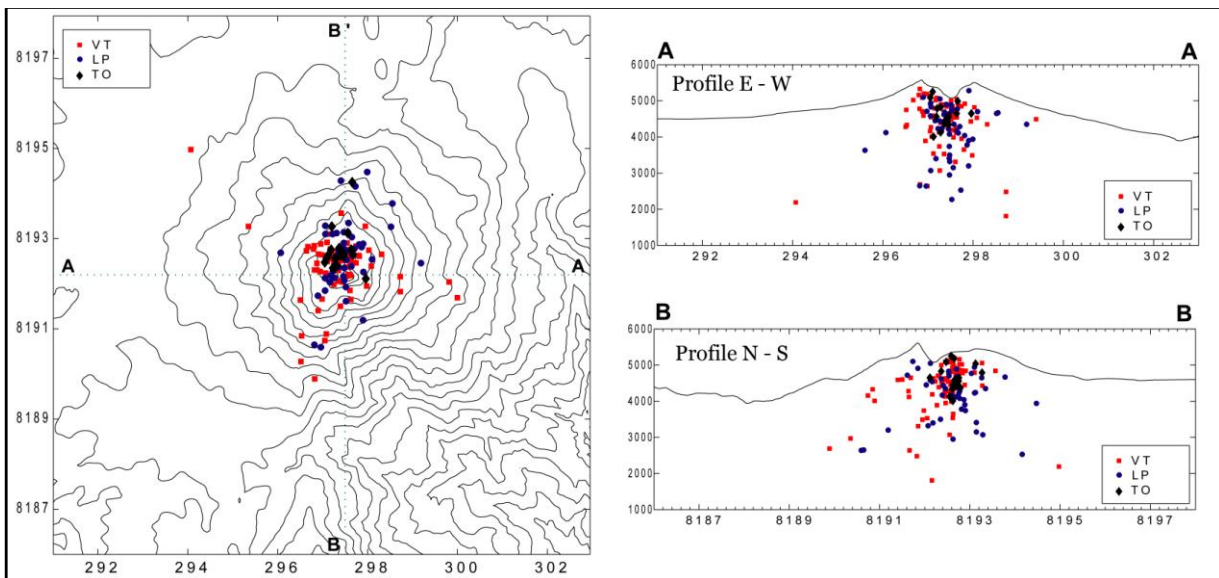


Fig. 1.- Mapa con la distribución de la sismicidad del volcán Ubinas: sismos VT, LP y Tornillos

• Al interior del edificio volcánico una primera mezcla de fluidos tiene lugar entre los miembros definidos como Fluidos Volcánicos (VF) y aguas frescas (FWR). Los fallamientos locales de dirección NW-SE (y/u otros que no han sido reconocidos) probablemente permiten la circulación de aguas provenientes de acuíferos alejados, que ingresan al sistema, y a la vez que salen de él, generando la mezcla de VF y FWR. Esta mezcla se pone de manifiesto por los afloramientos de aguas en las fuentes de Ubinas Termal y Cascada Ubinas situadas en las inmediaciones del pueblo de Ubinas ubicado a 6 Km al SE del cráter. Por tanto, si se deseara montar una vigilancia de la actividad volcánica del Ubinas por medio de análisis geoquímico de aguas, las fuentes de Ubinas Termal y Cascada Ubinas serían las adecuadas para ello. El Instituto Geofísico del Perú ha procedido, en 2002, a construir una caseta destinada a tomar datos sobre las características físico-químicas del agua de la fuente "Ubinas Termal" con propósito de vigilancia. La Fig. 2 resume, mediante un modelo de circulación de fluidos, los resultados encontrados.

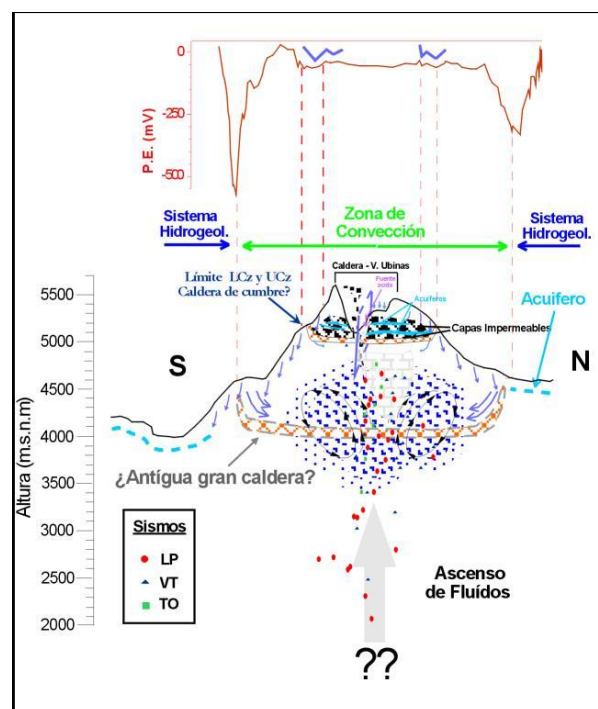


Fig. 2.- Modelo estructural del edificio y de circulación de fluidos en el volcán Ubinas, estimado a partir de los datos de PE, térmicos y de sismicidad. El sistema Ubinas presenta un sistema hidrotermal importante que es cerrado y se encuentra en sobrepresión, dando lugar a manifestaciones fumarólicas intensas solo al fondo de su cráter; asimismo, la actividad sísmica está asociada al hidrotermalismo, con gran actividad en sismos LP, tornillos notables y también VT.

ACCIONES DURANTE LA CRISIS AÑO 2006: LA VIGILANCIA VOLCANICA MEDIANTE SISMOLOGIA

Al inicio de la erupción, en marzo y hasta mediados de abril, solo operaron estaciones analógicas que mostraron intensa y creciente actividad sísmica. Entre el 21 y 26 de abril se instalaron las primeras estaciones digitales portátiles RefTek, con sismómetros 3C de banda

ancha (Guralp CMG40T, 0.02-30 s), sobre los flancos norte y sur del volcán. Posteriormente, a partir del 24 de mayo, entre en funcionamiento la estación telemétrica UB1 (16.3° S, 70.9° W; 4835 m) con un sismómetro Kinematics, modelo SS1, 1 Hz, y cuyas señales son enviadas hasta el IGP-Arequipa (Figura 3).

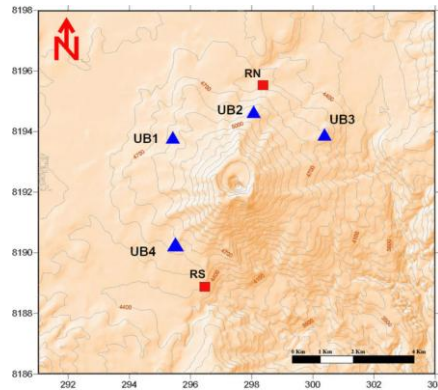


Fig. 3.- Red de estaciones sísmicas en el volcán Ubinas. Triángulos= estación permanente, telemétrica, 1 Hz; Cuadrados= estaciones portátiles de banda ancha.

La figura 4 muestra diagramas de energía obtenidos de los datos de banda ancha filtrados en tres diferentes bandas de frecuencia.

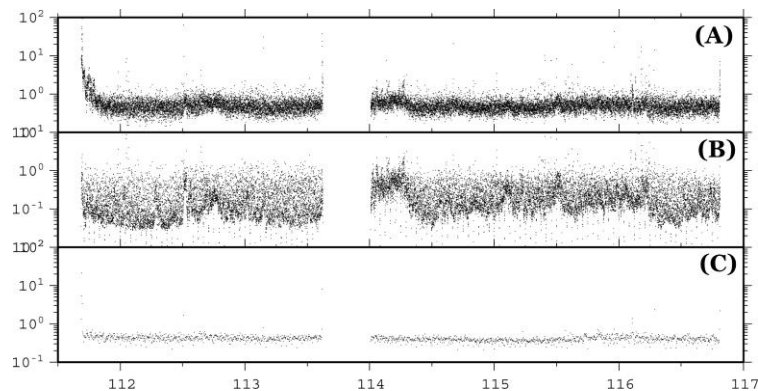


Fig. 4.- Diagrama de energía para el registro del 21-26 abril. (A): Señal no filtrada (B): frecuencias > 1Hz. (C): frecuencias < 1Hz, correspondientes al ruido oceánico. La energía de alta frecuencia, que corresponde a la actividad volcánica, es ligeramente superior al ruido oceánico, por lo que se puede concluir que esta actividad volcánica es débil. Posteriormente, se obtuvieron similares niveles de energía con los datos de UB1.

Tipos de eventos y estadística

En el proceso de erupción los más importantes eventos que han sido observados son las explosiones, los sismos de tipo LP, los tremores, y finalmente también se han observado sismos VT aunque en un número muy reducido. La figura 6 muestra las formas de onda y los espectrogramas característicos de estos 4 tipos de señales sismovolcánicas.

Las explosiones constituyen las señales más importantes registradas. Estas tienen la característica de incluir muy bajas frecuencias, entre 0.3 Hz-0.9Hz, y frecuentemente han sido precedidas por enjambres de LP.

Frecuentemente se han observado también la ocurrencia de tremores especialmente inmediatamente después de explosiones. Las señales sísmicas de estos tremores, que están asociados a la expulsión de material magnético, contienen amplia gama de frecuencias. Por otro lado, cabe indicar que también se registraron tremores asociados a la ocurrencia de un único lahar ocurrido durante el proceso de erupción, el del día 17 de Enero 2007, pero estas señales son distintas pues contienen ruido blanco.

La figura 5 muestra que la mayor parte de la sismicidad ocurrida en este proceso eruptivo corresponde a los eventos de tipo LP; esta sismicidad está asociada al tránsito de fluidos dentro del aparato volcánico, tales como el magma y gases diversos.

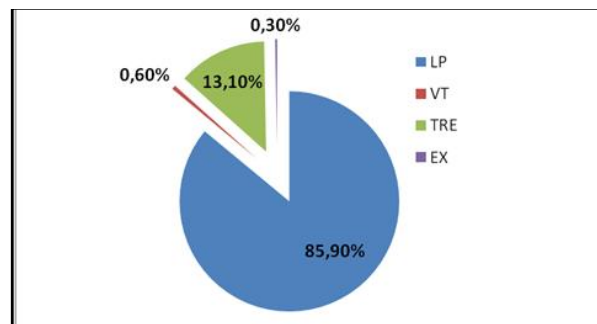


Fig. 5. Gráfico representativo de la estadística de los tipos de eventos sísmicos registrados en el volcán Ubinas durante el proceso eruptivo. LP=sismo de tipo periodo largo, VT=volcanotectónico, TRE=tremor, EX=explosión.

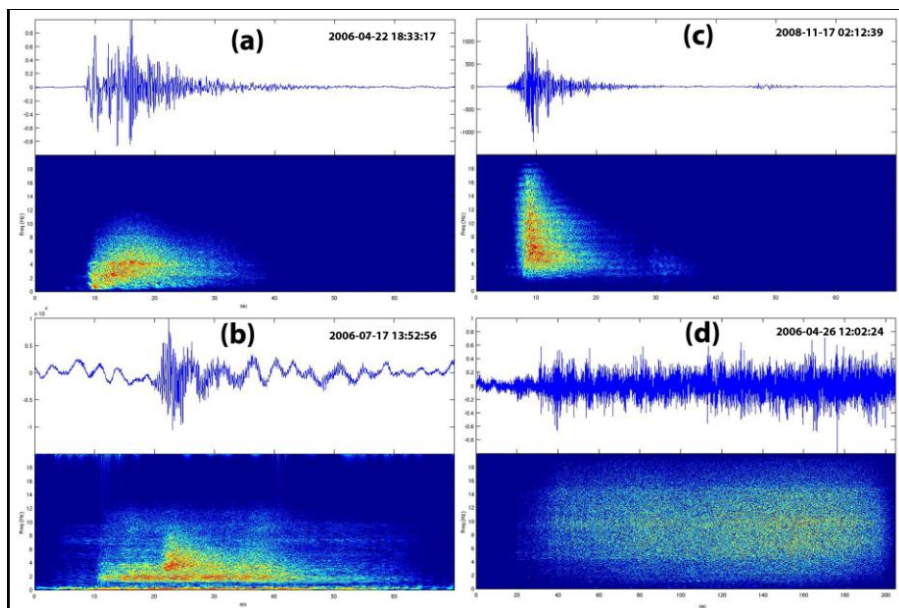


Fig. 6. Principales tipos de eventos sísmicos registrados durante la erupción del volcán Ubinas (formas de onda y espectrogramas): (a) Explosión; (b) LP; (c) VT; (d) Tremor.

Los reportes diarios de la actividad sismo-volcánica

Como se ha explicado anteriormente, el Instituto Geofísico del Perú recibe las señales sísmicas en el Observatorio Vulcanológico de Cayma en Arequipa. Estas señales, que provienen en tiempo real de la red telemétrica de estaciones sísmicas ubicadas sobre el mismo volcán, son analizadas en forma diaria, y dan lugar a sendos reportes. Estos "Reportes de la Actividad Sismovolcánica" son publicados diariamente en la página web del IGP (http://www.igp.gob.pe/ubinas/index_ubina.html) y asimismo enviados a las autoridades del COER Moquegua, COER Arequipa, INDECI, etc., a funcionarios y así como a personas que lo soliciten y a la comunidad en general.

Este reporte contiene una tabla estadística y gráficos de la sismicidad de los últimos 30 días (número de LP, VT, Tremor, Explosión, Energía de explosiones, Energía Diaria Acumulada) así como un pronóstico de vientos para la zona elaborado por el CPNTC (Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima) del IGP, de modo que la trayectoria de las cenizas volcánicas expulsadas a la atmosfera puedan ser tomadas en cuenta para labores de previsión y seguimiento del proceso por autoridades y comunidad. Un ejemplo de este tipo de reportes se da en la Figura 7.

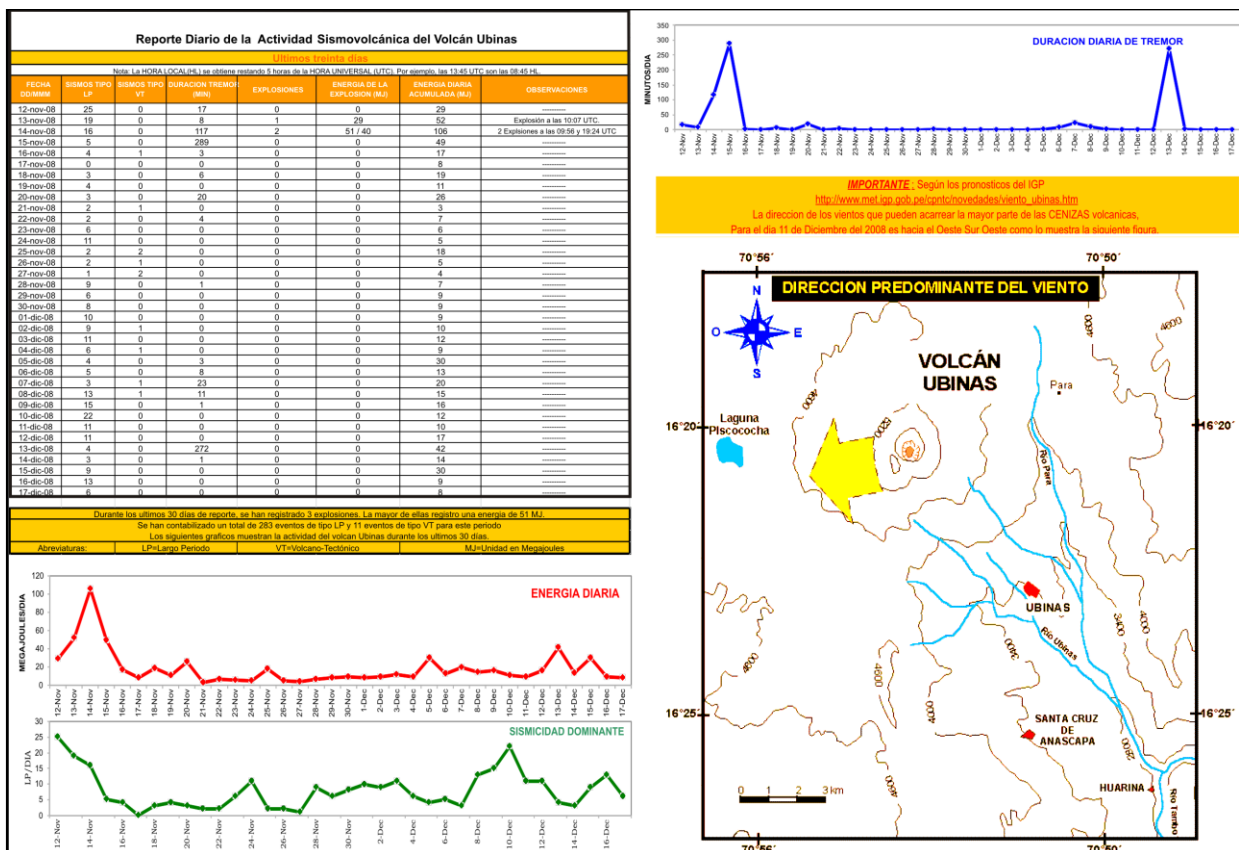


Fig. 7. Ejemplo de Reporte IGP de la Actividad Sismovolcánica Diaria del volcán Ubinas, del 17 de Diciembre 2008. Este reporte-resumen permite tener una estimación cuantitativa de la sismicidad, uno de los parámetros reconocidos como el más significativo en el curso de una erupción volcánica.

Características de la actividad sísmica durante el proceso de erupción

En general, según se puede observar en las gráficas de la energía diaria acumulada (Figura 8) y de los otros gráficos de sismicidad (Fig. 9), el evento eruptivo de 2006-2008 de este volcán puede ser catalogado como muy moderado, y está en correspondencia con el IEV 2 que se le ha asignado. Las figuras 8 y 9 muestran la energía total diaria acumulada, así como la duración de los tremores, durante todo el proceso eruptivo. Se observa altibajos de la energía en los primeros meses, pero luego un marcado aumento progresivo en agosto hasta llegar a máximos los días 18 y 20 de agosto 2006. Así el día 20 de agosto registro hasta 3137 MJ de energía. Después de estas fechas el decaimiento es notable, y aunque hay un repunte de cierta actividad durante octubre, realmente nunca más vuelve a elevarse a los niveles de agosto.

De manera similar, se puede observar que las explosiones más energéticas se producen en los primeros meses de iniciado el proceso eruptivo, observándose la ocurrencia de la mayor explosión el 24 de junio a las 12:54 UTC que registro hasta 719 MJ de energía. Posteriormente ya no se ha vuelto a observar ninguna explosión que alcance tal magnitud de energía.

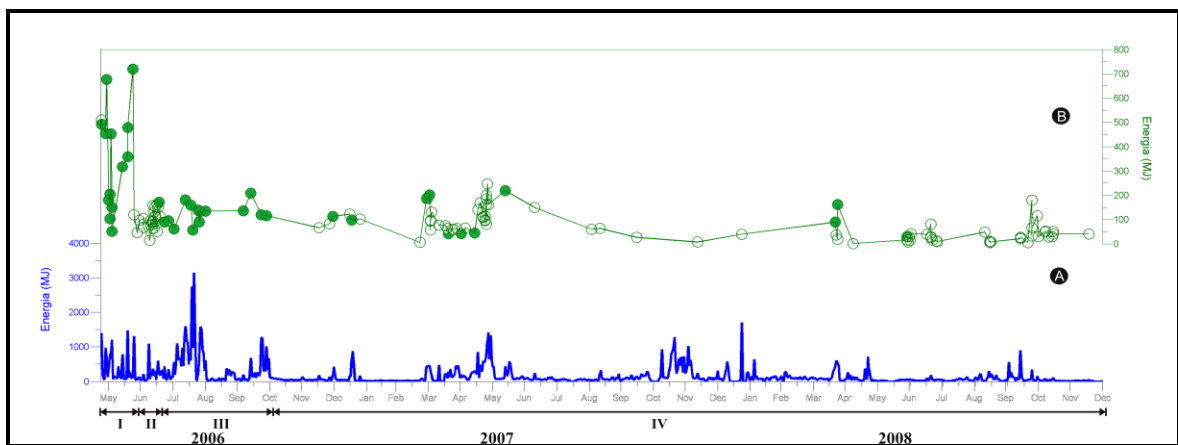


Fig. 8. Energía diaria calculada en la estación UB1 (A), y energía de las explosiones (B). Círculos abiertos = explosión sin precursores. Círculos llenos = explosión con precursores

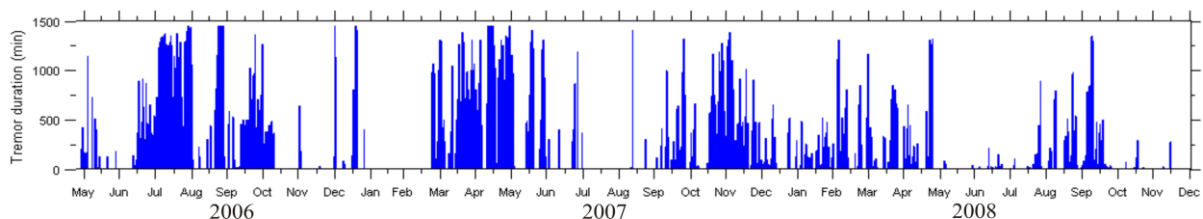


Fig. 9. Duración diaria de los tremores, observada en la estación UB1 de la red sísmica del volcán Ubinas.

Eventos importantes: las explosiones

Como ya hemos anotado más arriba, las explosiones han tenido niveles de energía más bien bajos. Además, buena parte de dichas explosiones han venido precedidas de sismos LP precursoras. La figura 10 muestra un ejemplo de explosión ocurrida el 31 de agosto 2006. Cerca de 90 minutos antes de la explosión, se observa la llegada de sismos LP a intervalos de algunas decenas de segundos y con energía creciente. Producida la explosión, se registra tremores que disminuyen paulatinamente en energía.

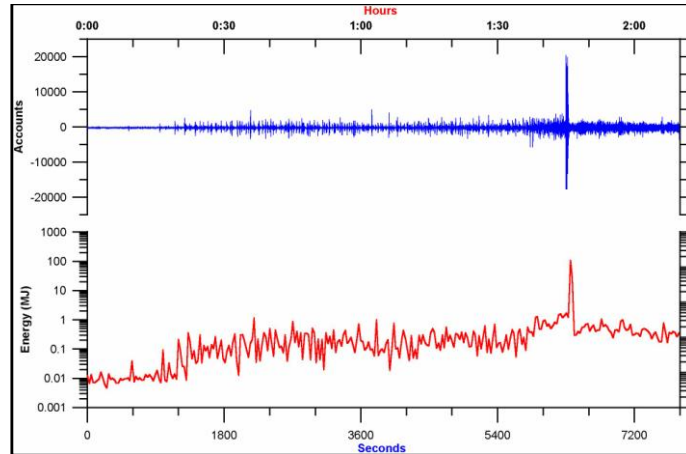


Fig. 10. Explosión del 31 de agosto 2006 a las 10:11 hrs en el volcán Ubinas. Durante 90 minutos antes de la explosión, se observa un enjambre de LPs.

Alerta de explosiones inminentes observando los eventos precursoras de tipo LP

Señales LP precursoras (Fig.11) han ocurrido en forma de enjambres en general. Dichas LP presentan las siguientes características generales:

- Su forma de onda es similar: son señales emergentes que se amortiguan lentamente (Fig. 11). Muchas veces tienen forma de huso.
- Presentan frecuencias de picos notorios. Muchas de esos enjambres tienen picos de 2.8 Hz y 3.6 Hz. (Fig. 11).
- Se repiten cada minuto o menos, en promedio.
- La energía acumulada tiende a incrementarse momentos antes de la explosión. Se ha observado también incremento en la amplitud de los LP a medida que se acerca la explosión.

Haciendo uso del conocimiento de tales características el IGP ha enviado con éxito avisos de "alerta de explosión inminente" a las autoridades encargadas de la gestión directa de la crisis (COER-Moquegua), en diversas ocasiones.

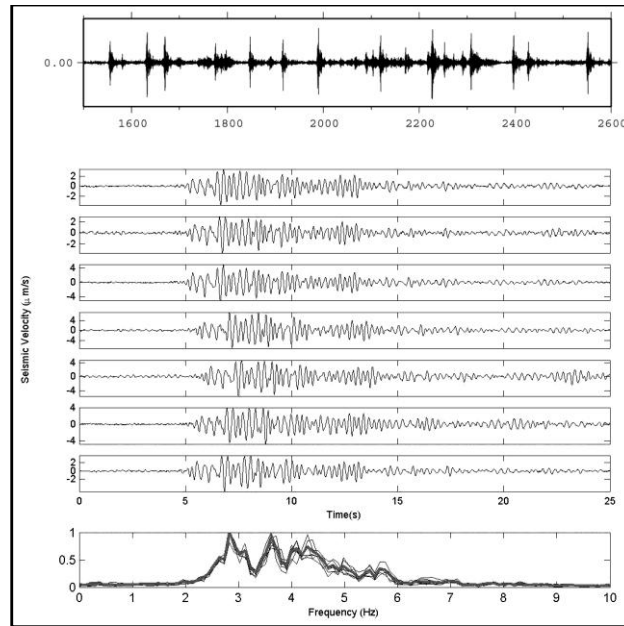


Fig. 11. Enjambre de LPs y su forma de onda característica registrada en la estación UB1. Los picos más frecuentes son los de 2.8 y 3.6 Hz.

CONCLUSIONES

El IGP ha realizado un amplio trabajo de investigación geológica, geofísica y geoquímica desde 1996, es decir 10 años antes de producirse la crisis del 2006. Esos datos han aportado ampliamente en el conocimiento previo del aparato volcánico y han sido muy útiles al afrontar la crisis.

Durante la crisis, el análisis de los registros sísmicos de la red de estaciones digitales que el Instituto Geofísico del Perú opero desde inicios del proceso eruptivo. Ellos mostraron que los niveles de energía asociados a este proceso han sido bajos. Así por ejemplo, las más fuertes explosiones alcanzaron cerca de 700 MJ de energía. Los principales tipos de sismos registrados en esta erupción son los LPs, tremores y explosiones. Hubo muy pocos sismos VT. En los inicios del proceso eruptivo se observó aumento sostenido de la sismicidad llegando a su máximo a fines de Agosto 2006. A partir de entonces la actividad Sismovolcánica ha ido decayendo paulatinamente, pero sobre todo a partir de fines de octubre 2006, con pequeños lapsos de incremento de actividad. El análisis de las señales LP que frecuentemente ocurrían antes de explosiones, permitió dar numerosos avisos de "alerta de explosión" a las autoridades de Defensa Civil

REFERENCIAS

Gonzales Katherine (2001) - « Estudio estructural y del sistema hidrotermal del volcán Ubinas aplicando métodos geofísico y geoquímicos ».- tesis Ing Geofísico, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 176 pags.

Macedo Orlando.- (1998) Mediciones de temperatura y toma de muestras de fluidos en el fondo del crater del volcan Ubinas.- Informe Tecnico interno IGP.- Agosto 1998, 5 pags.

Macedo O., Ramos D. and Taipe E. (2006).- Monitoreo y vigilancia sísmicos de la erupción del volcán Ubinas en 2006.- Informe IGP, nov 2006, 24 p.

Macedo O., Ramos D. & Taipe E. (2006).- Monitoreo y vigilancia sísmicos de la erupción del volcán Ubinas en 2006.- Informe Preliminar.- Instituto Geofísico del Perú, noviembre 2006, 24 pags.

Macedo O. (2006a).- Características de la actividad sismo-volcánica del volcán Ubinas y la erupción del 2006.- Conferencia en el auditorio IGP-Lima, el 5-01-2007.

Macedo O. (2006b).- Monitoreo y vigilancia sísmicos de la erupción del volcán Ubinas en 2006.- Conferencia en el auditorio del Gobierno Regional de Moquegua, el 16-01-2007.

Metaxian J-Ph., Macedo O., Ramos D., Finizola A., Ocola L., & Inza A.- (1998) Geophysical studies of Ubinas volcano, Southern Peru.- Eos Transactions American Geophysical Union, vol.79, N°45, F977, 1998.

Macedo Orlando., Gonzáles K., Finizola A., Métaxian J-Ph, Fournier N. & Sortino F.(2002).- Estudio estructural y del Sistema hidrotermal del volcán Ubinas, por métodos geofísicos y geoquímicos.- Resúmenes Extendidos del XI Congreso Peruano de Geología, Lima-Perú, 26-28 Setiembre, 2002.

Rivera M., Thouret J-C., Macedo O., Finizola A., Davila J. & Gourgaud A. (1997).- Ubinas, el volcán más activo del Perú desde 1552: reconocimiento geológico y evaluación de amenazas volcánicas actuales.- IX Congreso Peruano de Geología, Soc Geol del Perú, Volc Esp. 1, 489-492

Thouret JC, Rivera M., Worner G., Gerbe MC., Finizola A., Fornari M., Gonzales K. (2005).- Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru.- Bull Volcanology, 67, 557-589.

Taipe E. (2008).- Análisis de la actividad sísmica del volcán Ubinas para el periodo Marzo-Abril de 1998.- Tesis de Ingeniero Geofísico.- Univ Nac de San Agustín de Arequipa, 157 p.