

ACTIVIDAD SISMO-VOLCÁNICA ASOCIADA A LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN UBINAS EN 2006 -2008

Macedo O. (1), Métaixian J-Ph (2), Taïpe E. (1), Ramos D. (1)

(1) Instituto Geofísico del Perú (IGP), omacedo@geo.igp.gob.pe

(2) Institut de Recherche pour le Développement (IRD-France)

INTRODUCCIÓN

El 25 de marzo 2006, pobladores del valle situado al SE del volcán Ubinas ($16^{\circ} 22' S$, $70^{\circ} 54' W$; 5,672 m) alertan sobre ruidos provenientes del volcán y de caída de cenizas sobre sus sembríos. Este volcán, considerado como *el más activo del Perú* en los últimos 500 años (Rivera, 1997), había entrado nuevamente en erupción, amenazando a más de 3,500 pobladores que habitan en el valle del río Ubinas. El *Instituto Geofísico del Perú (IGP)*, en cooperación con el *Institut de Recherche pour le Développement (IRD-France)* efectúa el monitoreo de la actividad sísmica asociada al proceso eruptivo desde, primero mediante dos estaciones sísmicas digitales de banda ancha (entre abril-junio) y posteriormente mediante una red de hasta cuatro estaciones sísmicas digitales (tres de periodo corto y una de banda ancha) que empezó a funcionar desde el 24/05/06 las cuales transmiten los datos hasta el *Observatorio Volcanológico de Cayma* en Arequipa. Presentamos las principales características de la evolución de la sismicidad observada desde mayo 2006, usando los datos de la red sísmica radio-telemétrica.

Anteriormente, durante tres semanas en marzo-abril 1998 (Taïpe, 2008), se realizó un monitoreo sísmico mediante una red de seis estaciones sísmicas digitales RefTek equipadas con dos sismómetros digitales 3C de banda ancha y otros cuatro sismómetros 3C de periodo corto desplegados sobre todo el edificio. Estos estudios determinaron la existencia de una importante sismicidad (Fig 1) caracterizada por diversos tipos de sismos asociados a fracturas (VT) y paso de fluidos (LP, tremores y tornillos) en las inmediaciones del cono.

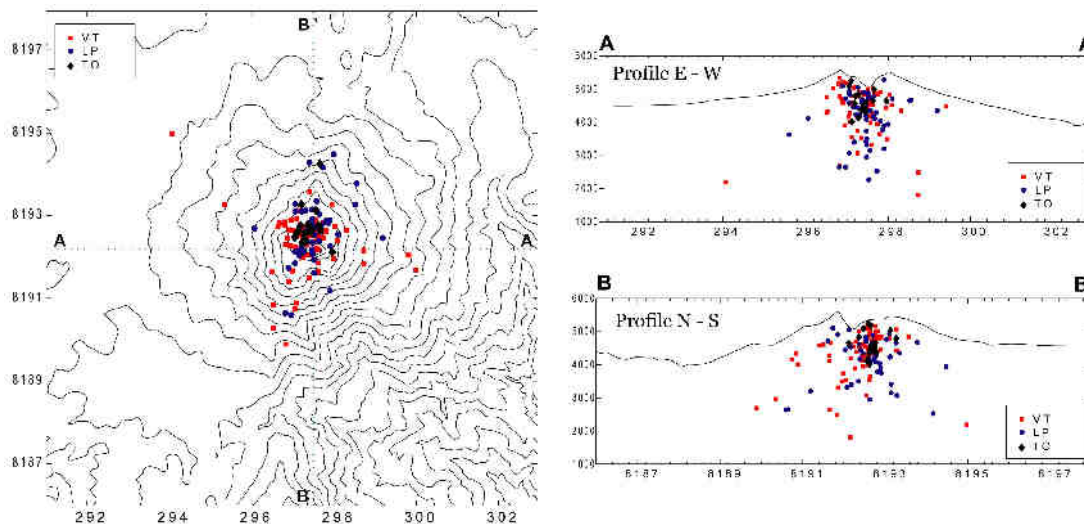


Figura 1.- Distribución de la microsismicidad observada en 1998 en el volcán Ubinas.

LA ACTIVIDAD SISMICA REGISTRADA

Al inicio de la erupción, en marzo y hasta mediados de abril, solo operaron dos estaciones analógicas que mostraron intensa y creciente actividad sísmica. Entre el 21 y 26 de abril 2006 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, el 24 de mayo entró en funcionamiento la estación telemétrica UB1 (16.3° S, 70.9° W; 4,835 m) con un sismómetro Kinematics, modelo SS1, 1 Hz, y cuyas señales son enviadas hasta el IGP-Arequipa (Fig 2)

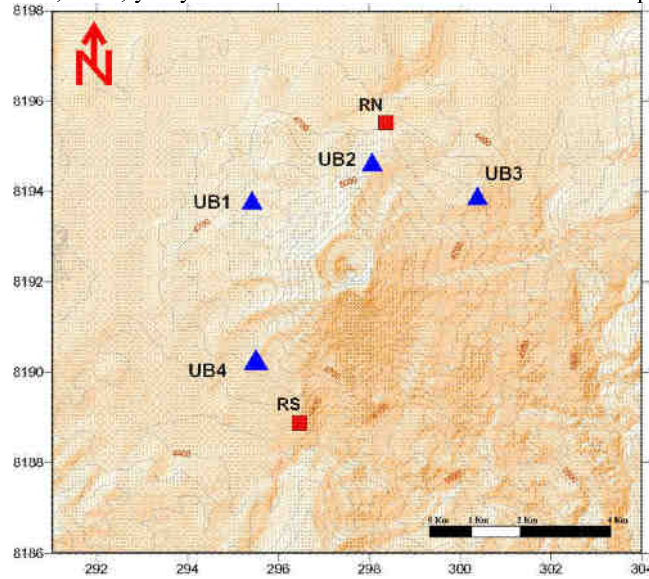


Figura 2.- Red de estaciones sísmicas en el volcán Ubina. Triángulos= estación permanente, telemétrica, 1 Hz ; Cuadrados= estaciones portátiles de banda ancha.

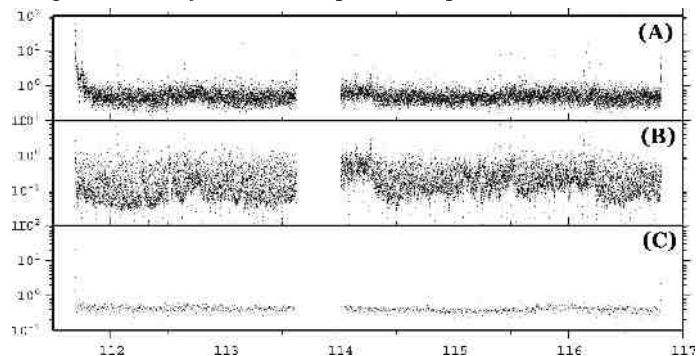
Con las señales digitales obtenidas se ha investigado, desde el inicio, los niveles de energía sísmica característicos en este proceso eruptivo. Se ha usado la data de banda ancha del 21-26 de abril obtenida en la estación RN (Fig 2) para estimar dichos niveles energéticos por integración de la señal sísmica (registros de velocidad) según la relación (Jonson y Aster, 2005):

$$E_{seismic} = 2\pi r^2 \rho_{earth} c_{earth} \frac{1}{A} \int S^2 U(t)^2 dt$$

r = distancia fuente-estación (m)
 ρ_{earth} : densidad (kg/m³)
 c_{earth} : velocidad de ondas P (m/s)
 A : Corrección de atenuación
 S : Corrección por respuesta del site (estación)
 $U(t)$: velocidad de partícula del suelo (10⁻⁶ m/s)

La figura 3 muestra diagramas de energía obtenidos de los datos de banda ancha filtrados en tres diferentes bandas de frecuencia. 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.

Figura 3.- Diagrama de energía para el registro del 21-26 abril. (A): Señal no filtrada (B): frecuencias > 1Hz. (C): frecuencias < 1Hz, correspondientes al ruido oceánico.



CLASIFICACIÓN DE LOS EVENTOS Y ESTADÍSTICA DIARIA

En orden de predominancia, en el proceso de erupción se ha observado sismos de tipo LP, tremores (asociados al desplazamiento de magma y gases), explosiones y finalmente muy pocos VT (asociado probablemente a algún proceso de fractura en las inmediaciones del cono). Las *figuras 4 y 5* muestran la energía total diaria acumulada, así como la duración total diaria 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 en los días 18 y 20 de agosto 2006. 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.

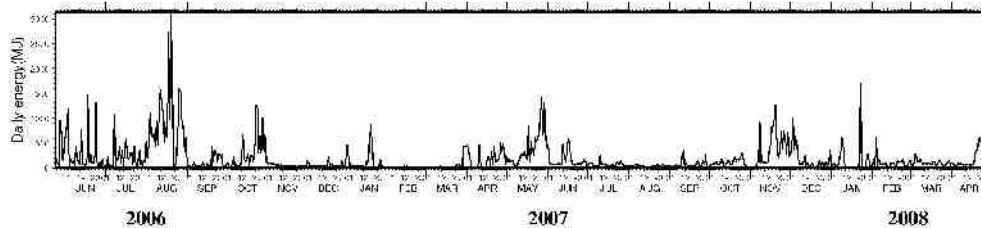


Figura 4.- Energía diaria, observada en la estación UB1.

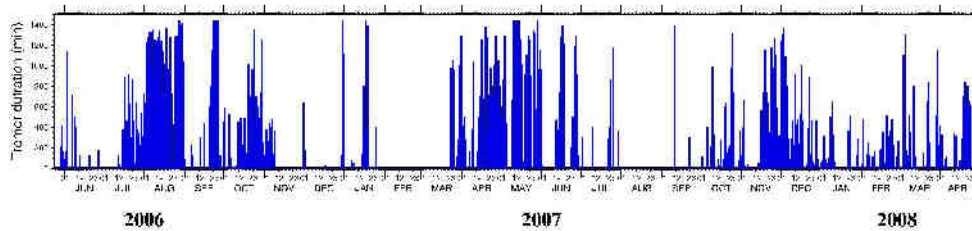
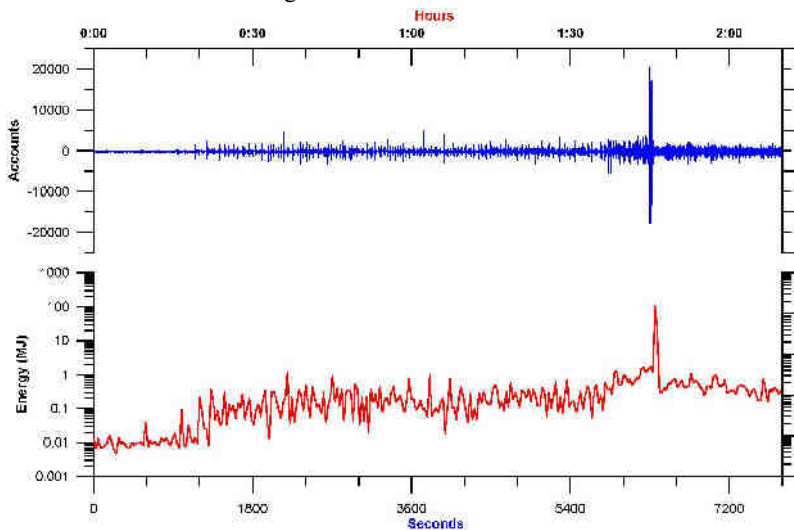


Figura 5.- Duración diaria de los tremores, observada en la estación UB1.

EXPLOSIONES

Como ya hemos anotado más arriba, las explosiones han tenido niveles de energía bajos. Además, buena parte de dichas explosiones han venido precedidas de sismos LP precursores. La *figura 6* 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.

Figura 6.- 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.



LAS CARACTERISTICAS DE LA SISMICIDAD DURANTE EL PROCESO DE ERUPCIÓN

A partir del análisis de los registros continuos obtenidos mediante la estación telemétrica UB1, se puede distinguir, hasta abril 2008, cuatro etapas (I, II, III, y IV) en el proceso eruptivo (Fig 7).

I) DEL INICIO DE ERUPCIÓN HASTA EL 24 DE JUNIO 2006:

El sistema intrusivo se establece; apertura de los conductos eruptivos.

- Pocos tremores, pero va “in crescendo” tanto en amplitud como en frecuencia de ocurrencia.
- Las explosiones vienen siempre precedidas por señales LP (eventos precursoros), y a veces ocurren sismos VT inmediatamente luego de la explosión.
- En comparación con las explosiones futuras que se observan en las etapas siguientes, las explosiones de esta etapa presentan mayor energía.
- Durante esta etapa el magma llega por primera vez a la superficie el día 19 de Abril 2006.

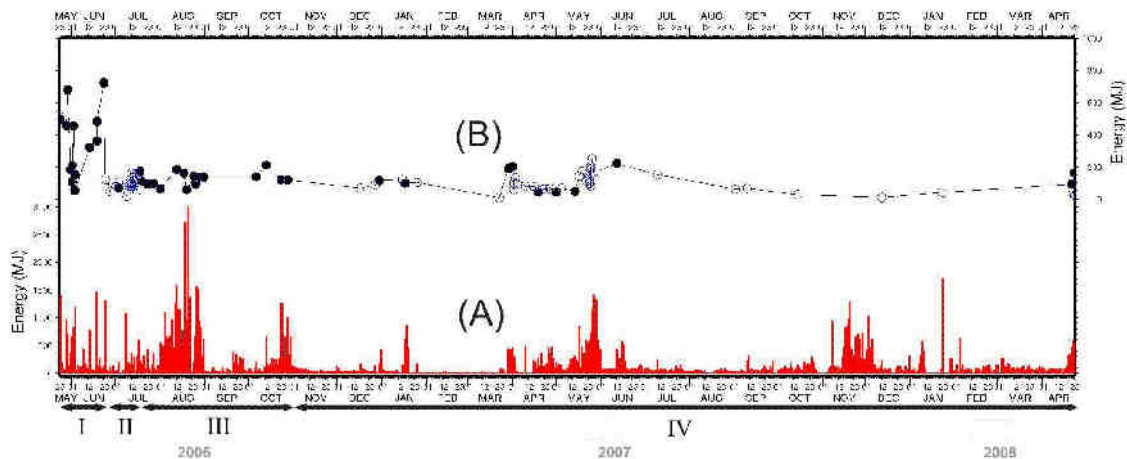


Figura 7.- Energía diaria calculada en la estación UB1 (A), y energía de las explosiones (B). Círculos abiertos = explosión sin precursoros. Círculos llenos = explosión con precursoros

II) DEL 24 DE JUNIO AL 16 DE JULIO 2006:

El sistema trabaja como un sistema abierto; flujo pequeño

- Ocurre muy poca actividad tremórica.
- Las explosiones ya no tienen eventos LP precursoros.
- El número de explosiones aumenta, alcanzando algunas veces hasta tres por día. Sin embargo, el nivel de energía de estas explosiones decae notoriamente
- Por otro lado, la temperatura en superficie detectada por el satélite GOES (Universidad de Hawai) un incremento ligero pero sostenido.

III) DEL 16 DE JULIO HASTA FINES DE OCTUBRE 2006:

Incremento del flujo eruptivo

- Aumentan notablemente los tremores y su energía, llegando hasta diez veces su tasa de energía “habitual” próxima a los 100 MJ.
- Aumento ligero de la energía de las explosiones.
- Las explosiones presentan nuevamente eventos LP precursoros.

IV) NOVIEMBRE 2006 EN ADELANTE

El sistema intrusivo cesa de ser alimentado o retrocede paulatinamente; se observa breves episodios de recuperación de la actividad.

- Hay largos periodos de relativa calma, con poca ocurrencia de explosiones y tremores.
- Sin embargo, ocurren episodios cortos de aumento de actividad sísmica. Tales episodios se hacen cada vez más espaciados y de menor duración.
- La mayoría de las explosiones no tienen LP precursoros, o éstas son débiles.
- Los eventos LP disminuyen notoriamente en número.

- En general, la energía diaria acumulada decrece de manera importante
- En la época de lluvias ocurren algunas explosiones, probablemente de tipo freatomagmático.

OBSERVACIONES DE CAMPO E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS SISMICOS

- En la **etapa I**, paulatinamente se incrementa la ocurrencia de LPs, tremores y explosiones. El 19 de abril el magma alcanza por primera vez la superficie. Todo esto significa que el magma asciende, se abre camino entre conductos aún parcialmente obstruidos.
- En la **etapa II**, los niveles de energía emitida y registrada disminuyen por el menor número de LPs y tremores. Se observa la disminución notoria de la energía emitida en cada una de las frecuentes explosiones. Todo lo anterior significa que los conductos se encuentran más libres o limpios de obstáculos. El magma aflora ahora con mayor facilidad, probablemente sin incrementar significativamente su débito pues no se presentan tremores importantes.
- En la **etapa III**, hay un fuerte aumento de la sismicidad. Significaría que el aporte magmático sería mucho más intenso. Los conductos de salida, aún estando relativamente limpios, no se abastecen para evacuar el magma que es expulsada de manera intensa y sostenida.
- En la **etapa IV**, se observa un retroceso del magma en superficie (hueco notable, en el lugar anteriormente ocupado por la lava), al mismo tiempo que la actividad sísmica decrece notoriamente. Por tanto se puede interpretar que la intrusión magmática cesa de ser alimentada de modo que en superficie se observa un franco retroceso. Pueden ocurrir cortos periodos de nuevo aumento de actividad eruptiva y aún explosiones pequeñas, pero se nota que los periodos de calma son cada vez más largos.

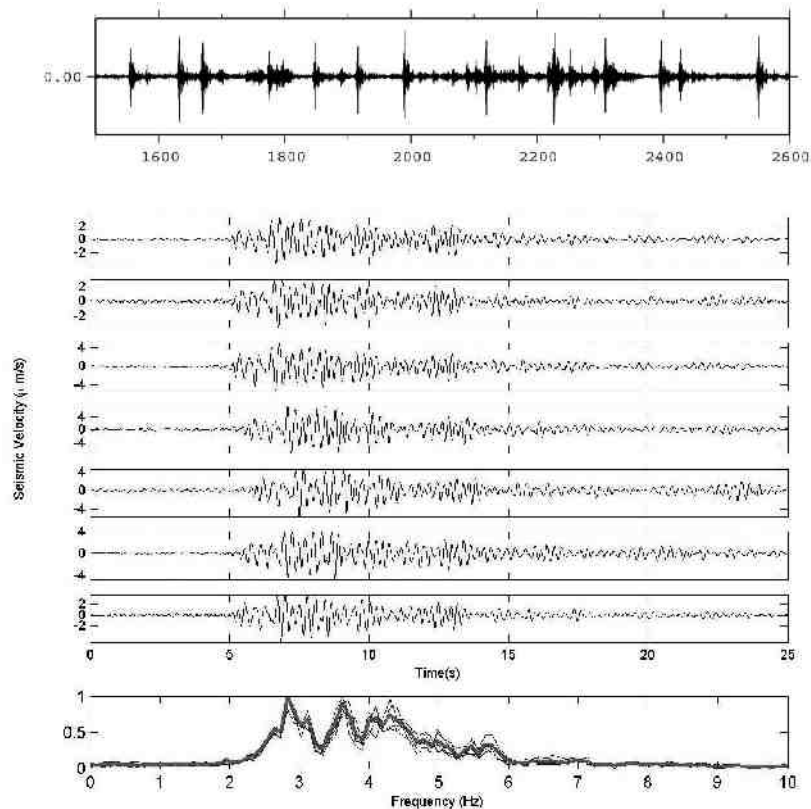


Figura 8.- Enjambre de LPs y su forma de onda característica registrada en la estación UB1. Los picos más frecuentes son los de 2.8 y 3.6 H .

ENJAMBRES DE SISMOS LP PRECURSORES DE EXPLOSIONES

Señales LP precursoras (Fig 6) han ocurrido en forma de enjambres en general con frecuencia durante las etapas I y III, así como en algunas ocasiones de la etapa IV (Fig 7) Dichos LPs presentan las siguientes características generales:

- Su forma de onda es similar: son señales emergentes que se amortiguan lentamente (Fig 8). Muchas veces tienen forma de huso.
- Presentan frecuencias de picos notorios entre 2.8 Hz a 3.6 Hz (Fig. 8).
- 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, con algunas decenas de minutos u horas de anticipación.

CONCLUSIONES

El análisis de los registros sísmicos de la red de estaciones digitales que el *Instituto Geofísico del Perú* opera desde inicios del proceso eruptivo muestran que los niveles de energía asociados a este proceso han sido bajos. Así por ejemplo, las más fuertes explosiones alcanzaron menos de 700 MJ de energía. Los principales tipos de sismos registrados en esta erupción son los LPs, tremores y explosiones. Hay muy pocos sismos VT. En los inicios del proceso eruptivo se observó un aumento sostenido de la sismicidad llegando a su máximo a fines de Agosto del 2006. A partir de entonces la actividad sismovolcánica ha ido decayendo paulatinamente, pero sobre todo a partir de fines de octubre 2006, con pequeños incrementos 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.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a A. Inza, V. Montesinos, E. Vila, D. Portugal, O. Ancajima, y a todo el equipo de *Redes Geofísicas* del *Instituto Geofísico del Perú* (IGP) por el gran esfuerzo desplegado en la instalación de equipos y redes. Esta es una contribución del *Observatorio Volcanológico de Cayma- Arequipa* del Instituto Geofísico del Perú. Los fondos para lo esencial de el monitoreo y análisis han sido cubiertos por el IGP. Este trabajo se ha beneficiado también del soporte, en 2007 y 2008, del Proyecto VOLUME, Contract N° 08471, de la Comisión Europea, 6th Framework Projets.

REFERENCIAS

- Johnson J.B. and Aster R.C. 2005. Relative partitioning of acoustic and seismic energy during strombolian eruptions.- *JVGR*, 148, p. 334-354.
- Rivera M. 1997. El volcán Ubinas (Sur del Perú): Geología, historia eruptiva y evaluación de las amenazas volcánicas actuales.- Univ Nac Mayor de San Marcos, p. 123.
- 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, p. 157.