

## Detección de Cambios de Velocidad Asociados a la Erupción del Volcán Ubinas 2014, Usando Auto- y Cross- Correlación de Ruidos Sísmico y Eventos Multiplets.

Roger Machacca<sup>1,2</sup>, Philippe Lesage<sup>3</sup>, Eric Larose<sup>2</sup>, Pascal Lacroix<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Arequipa, Perú – [rmachacca@ingemmet.gob.pe](mailto:rmachacca@ingemmet.gob.pe)

<sup>2</sup> Laboratorio ISTerre, Universidad Grenoble Alpes, Grenoble, France.

<sup>3</sup> Laboratorio ISTerre Géophysique des volcans. Universidad Savoie Mont Blanc, Chambéry, France.

**Palabras clave:** Cambios de velocidad, Ruido sísmico, Precursores, Erupciones volcánicas.

### RESUMEN

En este trabajo usamos la correlación de ruido sísmico y eventos multiplets para calcular los cambios de velocidad en el volcán Ubinas durante el 2014. Se han identificado descenso de la velocidad sísmica del medio hasta de -0.8%, tres semanas antes de las principales explosiones que ocurrieron entre el 13 y el 19 de abril de 2014 en ambos métodos. Estos cambios de velocidad tuvieron un carácter precursor.

La ubicación en el plano horizontal de la perturbación de velocidad y el cambio estructural para la fase de mayor actividad eruptiva, muestra que la disminución de velocidad se originó en todo el edificio volcánico, mientras que la perturbación estructural se concentra en el flanco sur del volcán, zona que corresponde a un antiguo colapso.

### INTRODUCCIÓN

Los cambios de velocidad sísmica ( $dv/v$ ) causados por grandes terremotos o actividades volcánicas se han venido estudiado para comprender las propiedades mecánicas de la estructura interna de la tierra. Tales cambios de velocidad sísmica se miden por sismos repetitivos (Poupinet et al., 1984) o fuentes sísmicas activas (Nishimura et al., 2005), pero no es fácil monitorear continuamente estos cambios porque estas fuentes sísmicas son escasas. En los últimos años se ha demostrado que las funciones de cross-correlación (CCF) del ruido sísmico ambiental converge en las funciones de Green entre dos estaciones sísmicas. Los cambios de velocidad se miden luego comparando las CCF de ruido ambiental continuamente obtenidos para un mismo par de estación sísmica. Como resultado, los análisis de correlación de ruido tuvieron éxito en la detección de cambios de velocidad sísmicos debidos a grandes terremotos, a la inflación del edificio volcánico antes de la erupción (Brenguier et al., 2008b), el cambio topográfico causado por una erupción, entre otros procesos.

En sismología volcánica, esta técnica se utiliza principalmente con dos objetivos, realizar tomografía

sísmica y monitorear cambios de velocidad en el interior del volcán debido a intrusión magmática, así pronosticar erupciones volcánicas.

Para realizar la presente investigación, se realizó una estadia de investigación en las Universidades de Grenoble Alpes y Universidad Savoie Mont Blanc, con apoyo del IRD e INGEMMET, donde se estudió la actividad sísmica del volcán Ubinas con el método de correlación de ruido sísmico del ultimo periodo eruptivo 2014-2015.

### RED SÍSMICA

Para nuestra investigación se utilizó la data sísmica de siete estaciones de banda ancha desplegado por personal OVI alrededor del volcán durante la crisis eruptiva del 2014, ver Fig. 1. La estación UBN02 y UBN04 contaron con transmisión telemétrica de datos en tiempo real al OVI. Los resultados presentados aquí corresponden al tratamiento de estos datos.

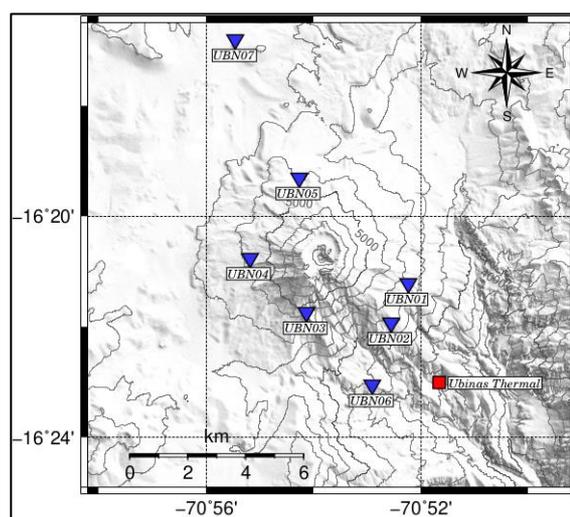


Fig. 1 – Mapa de ubicación de las estaciones sísmicas desplegadas por el OVI-INGEMMET durante el año 2014, representados con triángulos de color azul invertidos.

## CORRELACIÓN DE RUIDO SÍSMICO

Para estimar los cambios de velocidad, primero calculamos las funciones de correlación del ruido sísmico (CCF) entre los siete pares de estaciones que se registraron en el año 2014. Primero cortamos los datos sísmicos continuos en cada estación cada una hora, para remover los datos que contienen señales de terremotos y ruidos artificiales desconocidos, se cortó la amplitud de las señales a 3 veces el valor de la amplitud media cuadrática (RMS). Los datos sísmicos continuos se filtran a 0.1-1 Hz., 0.5-1 Hz., 0.3-1 Hz., 1-3 Hz., 3-5 Hz. y 5-8 Hz., y luego se aplica la normalización en el dominio de frecuencias usando filtro *whitening* (Bensen et al., 2007). Luego calculamos las funciones de correlación para cada hora durante un día y al finalizar realizamos el stacking de estos datos que son las CCF diarios, tal como se muestra en la Fig. 2.

Para estimar los cambios de velocidad sísmica en el medio usamos las CCF, para esto existe dos métodos: el Método de *Stretching* en el dominio del tiempo y el Método de *Moving Window Cross-Spectral* en el dominio de la frecuencia (MWCS) también conocido como método de *doublet*. En ambos métodos, los cambios de velocidad relativa se estiman comparando dos formas de onda: la referencia  $CCF_r(t)$  y las funciones de correlación actuales  $CCF_c(t)$ . En este estudio hemos usado el método *Stretching* ya que es más estable para cambios mayores a 0.1 %.

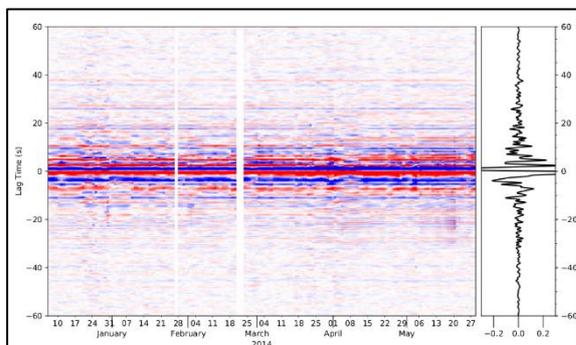


Fig. 2 – Funciones de correlación diarias a lo largo del año 2014 para la autocorrelación de componentes Z-E, estación UBN07. A la derecha de la figura se muestra el promedio de las formas de onda.

## CAMBIOS DE VELOCIDAD CON AUTO-CORRELACIÓN (UNA ESTACIÓN)

Los resultados obtenidos para los datos del 2014 del volcán Ubinas, muestran un claro descenso de la velocidad en casi todas las estaciones sísmicas, ver Fig. 3., esta disminución comienza aproximadamente el 18 de marzo y continuó hasta el 13 de abril de 2014, cuando se producen las primeras explosiones importantes. Después de esta erupción, la velocidad

empieza a recuperarse de nuevo, pero no regresa a sus valores iniciales. La variación máxima ocurre en la estación UBN06, ubicada en el flanco sur del cráter, donde la velocidad disminuye en un -0.8%. En este caso, la disminución de velocidad pre-eruptiva se detecta claramente tres semanas antes de la mayor explosión registrada el 19 de abril de 2014. La autocorrelación entre componentes muestra ser una herramienta útil a la hora de pronosticar y manejar una crisis eruptiva, tal como se observa en el Ubinas.

Se han analizado los cambios de velocidad en diferentes bandas de frecuencias, siendo los más claros en términos de pronóstico los obtenidos para las frecuencias de 10s - 1s. Los núcleos de sensibilidad para estas frecuencias muestran una máxima sensibilidad entre 2 - 3 km. de profundidad del volcán.

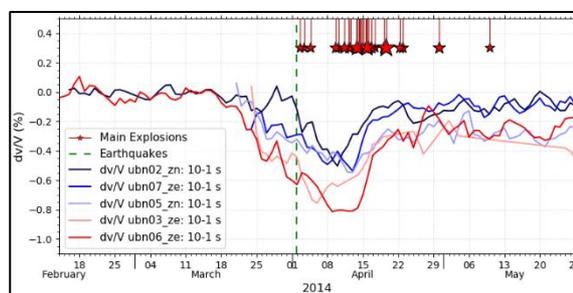


Fig. 3 – Cambios de velocidad aparente obtenidos con auto-correlación entre la componente vertical y una componente horizontal.

## CAMBIOS DE VELOCIDAD CON CROSS-CORRELACIÓN (PAR DE ESTACIONES)

Los resultados obtenidos de cambios de velocidad con cross-correlación (para pares de estaciones), son presentados en la Fig. 4., donde se puede observar un patrón similar al obtenido con las auto-correlaciones entre componentes, es decir hay disminución de la velocidad antes de explosiones mayores, este patrón se repite para varios pares de estaciones, lo que corresponde a cambios en el medio.

Examinando las variaciones de velocidad pre-eruptivas, podemos ver que las amplitudes de estas variaciones son diferentes para diferentes pares de estaciones, ver Fig. 4. a). Por ejemplo, para el par UBN05 - UBN07, la disminución de velocidad es menor que para el par UBN05 - UBN06. Sin embargo, hay una tendencia general de disminución de la velocidad antes de la erupción. El comienzo de la disminución de velocidad no está bien definido, ya que no se tiene información anterior a 23 de marzo de 2014, debido a que la instalación de los sismómetros comenzó recién el 23 de marzo, sin embargo estos cambios de velocidad duran hasta la ocurrencia de las primeras explosiones importantes (ver Fig. 4). Después de eso, la velocidad recupera su valor inicial.

En el próximo capítulo, localizaremos la perturbación de velocidad. Para ello, definimos cuatro períodos: un primero periodo como Referencia, antes del inicio de la disminución de velocidad, que se usara como

referencia, el segundo P2 donde la disminución de velocidad fue máxima y P3 que corresponde al periodo después de las explosiones principales (ver Fig. 4 b) ).

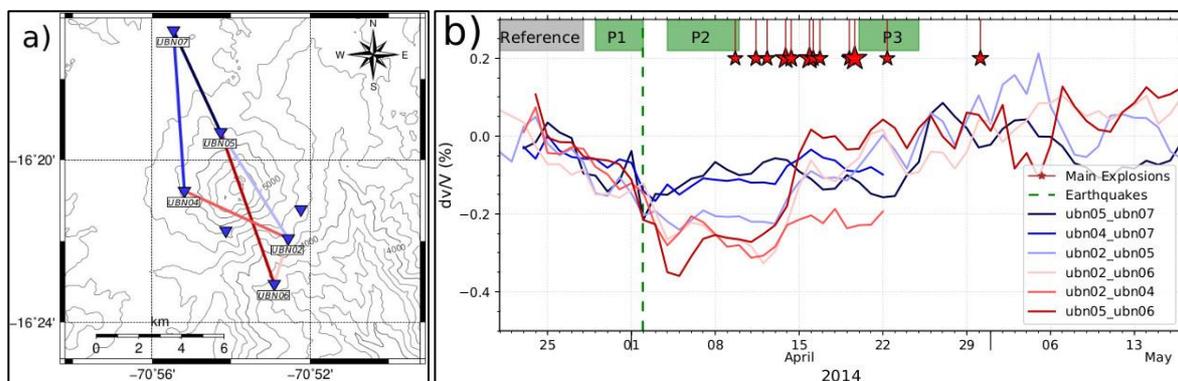


Fig. 4 – a) Trayectoria de las ondas para algunos pares de estaciones. b) Cambios de velocidad con cross-correlación para pares de estaciones graficados en a).

### CAMBIOS DE VELOCIDAD CON MULTIPLETS

En la Fig. 5 se muestran los cambios de velocidad usando eventos similares (multiplets). Para ello primero se estiman las familias de sismos de Largo Periodo (LP) registrados durante 2014, tomando en cuenta su coeficiente de correlación  $\geq 0.8$  de sus formas de onda, usando el algoritmo *hierarchical clustering* disponible en el paquete GISMO de Matlab. Finalmente se identificaron 20 familias de LPs, de los cuales solo tres familias (Fam08, Fam13 y Fam19) ocurrieron durante el periodo de disminución de velocidad obtenidos con Auto-correlación de ruido sísmico. Su ocurrencia en tiempo se presenta en la parte superior de la Fig. 5.

forma de onda registrada en cada familia, utilizando el método *stretching* (Weaver et al. 2009). Los cambios de velocidad estimados con estos eventos, muestran también disminución de velocidad tres semanas antes de las erupciones principales del Ubinas, similar a los obtenidos usando el ruido sísmico ambiental. Los cambios de velocidad obtenidos con las familias Fam08 y Fam13, muestran una disminución en la velocidad del medio que inicia también a mediados de marzo, mientras que para la familia Fam19, la máxima disminución de velocidad coincide con el máximo valor del descenso de velocidad obtenido con la correlación de ruido sísmico, tal como se muestra en la Fig.5.

### LOCALIZACIÓN EN 2D DE LOS CAMBIOS DE VELOCIDAD

En la sección anterior, observamos que los cambios de velocidad tienen diferentes amplitudes para cada par de estaciones, de acuerdo a sus posiciones con respecto al cráter. Por ejemplo, la disminución de velocidad asociada con los pares de estaciones cuya trayectoria no cruza el cráter es más pequeña. Usamos esta observación para ubicar los cambios de velocidad del medio en 2D. Para eso, relacionamos el  $dv/v$  como una perturbación local de velocidad en un punto  $x_0$  como  $dv/v(x_0)$ , usando los núcleos de sensibilidad a diferentes tiempos en la coda utilizando la técnica de Locadiff (Larose et al., 2010), para cada par de estaciones. Lugo aplicamos la inversión lineal de mínimos cuadrados (Tarantola y Valette, 1982) para obtener la distribución horizontal de los cambios de velocidad relativos. En la Fig. 6 se muestra los resultados de las inversiones para el período P2, que corresponde al período de

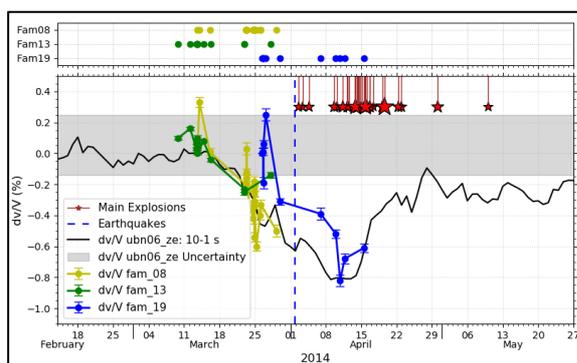


Fig. 5 – Cambios de velocidad aparente estimados con eventos multiplets con las familias Fam08, Fam13 y Fam19 registrados en la estación UBN02. En la figura superior la ocurrencia de las familias.

Una vez obtenido las familias sísmicas se procedió a estimar los cambios de velocidad para cada elemento de una familia respecto a la primera

sobrepresurización del sistema en el que se produjo el cambio de velocidad en todo el volcán. Por otro lado, el cambio estructural (Fig. 6 b)) ocurre en el flanco sur. Esto puede ser el resultado de la apertura de grietas y la inyección de magma durante este período

en el flanco sur del volcán. La fuerte disminución de la velocidad en todos los edificios del volcán también puede estar asociada con la inflación continua del edificio.

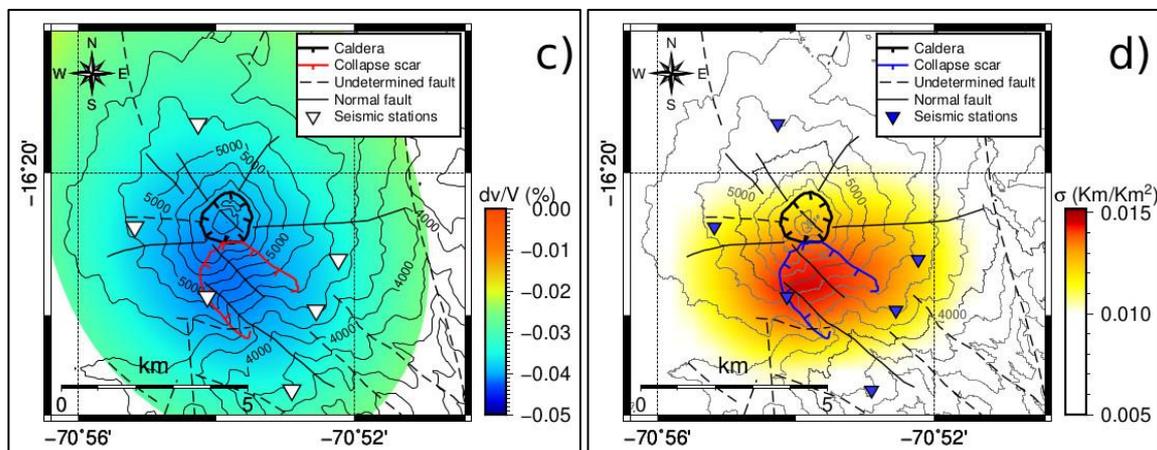


Fig. 6 – Localización espacial del cambio de velocidad y cambio estructural del volcán Ubinas para el periodo P2. a) Cambio de velocidad. b) Cambio estructural.

## DISCUSIONES

Se ha detectado la disminución de hasta -0.8% en la velocidad sísmica aparente del volcán Ubinas, tres semanas antes de la explosión principal ocurrida el 19 de abril de 2014, estos cambios fueron observados con la correlación de ruido sísmico y eventos multiplets, que corresponden un cambio real de la velocidad. El método ruido sísmico ha sido aplicado principalmente a volcanes efusivos en todo el mundo. En este trabajo presenta uno de los pocos estudios sobre volcanes explosivos.

La localización de la distribución espacial de estos cambios temporales de la velocidad sísmica y decoherencia (cambio estructural), muestran que los cambios de velocidad se localizan en todo el edificio volcánico y en la parte sur del volcán, mientras que el cambio estructural se localiza preferentemente en el flanco sur del volcán, que corresponde a la cicatriz de un colapso antiguo (Rivera et al., 2014) y probablemente se deba a que el material en esta región este más pre-dañado/débil, el que muy posiblemente sea afectado de nuevo en caso se de una erupción importante en este volcán.

## Agradecimientos

Agradezco al Dr. Pascal LACROIX, Philippe LESAGE, Eric LAROSE y Bernard VALETTE por haberme acogido y guiado durante mi estadía de investigación en el laboratorio ISTERre de la Universidad Grenoble Alpes y Universidad Savoie Mont Blanc, en la ciudad de Grenoble, Francia. Asimismo, quiero agradecer al INGEMMET y en

especial al personal del OVI por haberme apoyado durante este trabajo.

## Referencias

- Larose, E., Planes, T., Rossetto, V., and Margerin, L., 2010. Locating a small change in a multiple scattering environment. *Applied Physics Letters*, 96(20):204101.
- Poupinet, G., Ellsworth, W. L., and Frechet, J., 1984. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the calaveras fault, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7):5719–5731.
- Brenguier, F., Campillo, M., Takeda, T., Aoki, Y., Shapiro, N. M., Briand, X., Emoto, K., and Miyake, H., 2014. Mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops. *Science*, 345(6192):80–82.
- Rivera, M., Thouret, J.C., Samaniego, P., and Pennec, J.L., 2014. The 2006 – 2009 activity of the ubinas volcano (peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270:122 – 141.
- Tarantola, Albert and Valette, Bernard, 1982. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Reviews of Geophysics*, 20(2):219–232.
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Shapiro, N. M., and Yang, Y., 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3):1239–1260.
- Nishimura, T., Tanaka S., Yamawaki T., Yamamoto H., Sano T., Sato M., and Sato H. (2005), Temporal changes in seismic velocity of the crust around Iwate volcano, Japan, as inferred from analyses of repeated active seismic experiment data from 1998 to 2003, *Earth Planets Space*, 57(6), 491–505.