

## Pronóstico de Erupción Volcánica mediante la identificación de Señales Sísmicas y Eléctricas en el Volcán Ubinas

Katherine Vargas<sup>1</sup>, Orlando Macedo<sup>1</sup>, José Del Carpio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del Sur, Instituto Geofísico del Perú – [kathendrea@hotmail.com](mailto:kathendrea@hotmail.com)

**Palabras clave:** Sismología volcánica, potencial espontáneo, volcán Ubinas.

El volcán Ubinas (UTM: 297401.97 E, 8192031.28 N, zona 19 S) es un estratovolcán que pertenece a la Zona Volcánica Central de Sudamérica. Políticamente, se localiza en la provincia de General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua. Se encuentra asentado en el margen NW de una depresión erosionada alargada NNW-SSE, pequeñas fracturas cortan el piso de la caldera y el flanco sur del edificio (Thouret et al., 2005). El Ubinas ha presentado 25 erupciones en los últimos cinco siglos, convirtiéndolo en el volcán más activo del Perú (Rivera et al., 2011). Un nuevo proceso eruptivo del Ubinas comenzó en septiembre de 2013 y continúa hasta la actualidad.

El pronóstico de erupciones se basa en la aplicación de dos métodos geofísicos. El primero aplicado es la sismología volcánica, que permite obtener información de la dinámica de los volcanes (Chouet y Matoza, 2013). El Instituto Geofísico del Perú (IGP) monitorea permanentemente el volcán Ubinas, mediante cinco estaciones sísmicas, cuatro alrededor del volcán (UB1, UB2, UB3 y UB4) (Fig. 1), y una quinta estación sísmica que se localiza a 28 km al oeste del Ubinas (HSAL). Los datos registrados llegan vía telemetría al IGP para pasar por un proceso de clasificación de señales sismo-volcánicas y localización de eventos volcano-tectónicos. En este estudio se analizó en específico el periodo marzo a diciembre del 2016.

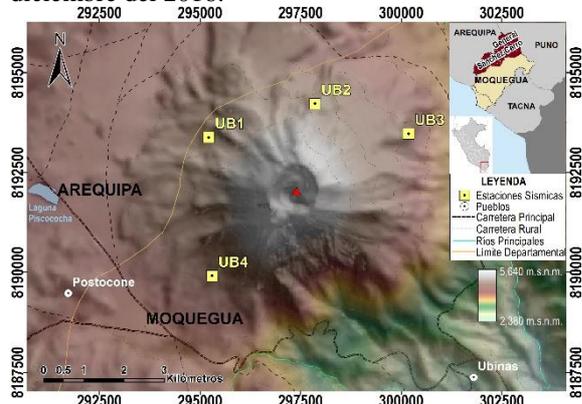


Fig. 1 – Ubicación de las estaciones pertenecientes a la red de Monitoreo del volcán Ubinas.

El segundo método es el potencial espontáneo (PE) que en volcanes como el Ubinas se genera

principalmente por fenómenos electrocinéticos que dan cuenta de zonas de transferencia hídrica subterránea (Gonzales, 2000; Macedo et al., 2002). En el volcán Ubinas, entre los años 2006 y 2014, se realizaron 5 mediciones reiteradas de PE a lo largo del Perfil N°7 del estudio de Macedo et al. (2002). Las medidas se realizaron cada 100 m (Fig. 2a) desde el borde NW del cráter del volcán (5462 m.s.n.m.) hasta un último punto al borde de la laguna Piscococha (4507 m.s.n.m.). Con el interés de investigar el comportamiento del sistema hidrotermal durante época de erupción, hemos realizado 6 mediciones siguiendo un perfil reiterativo de 200 m con paso de 2 m entre cada punto de medida (Fig. 2b). La zona para el experimento fue escogida luego de analizar las variaciones observadas en relación a mediciones de época de no-erupción.

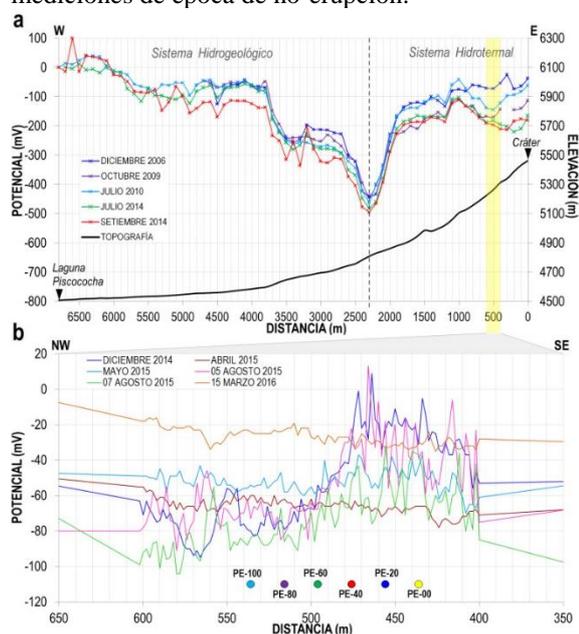


Fig. 2 – Perfiles de reiteración de PE en el volcán Ubinas: a) Cada 100m desde el cráter hasta la laguna Piscococha, b) Cada 2m desde los 400m a 600m del perfil.

Analizando los datos, se observó la ocurrencia de variaciones importantes entre los 436 y 536m del perfil, por lo cual se eligió como ubicación óptima de un equipo de PE con registro automático. En efecto, como se observa claramente en las campañas del 5 y 7 de agosto, un día antes y después de la explosión

del 6 de agosto del 2015 (Fig. 2b), la señal muestra una inflexión.

Se procedió, entonces, a instalar un equipo PE con configuración multielectródica compuesta de un electrodo de referencia (PE-00) y 5 electrodos de medida (PE-20, PE-40, PE-60, PE-80 y PE-100) espaciados cada 20 m (Fig. 3), conectados mediante cables a un registrador de datos (datalogger), que almacenó los datos cada 15 segundos. El experimento se hizo durante dos periodos: setiembre a noviembre del 2016 y abril a mayo del 2017. Cada electrodo fue rellenado con una mezcla de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) y bentonita.

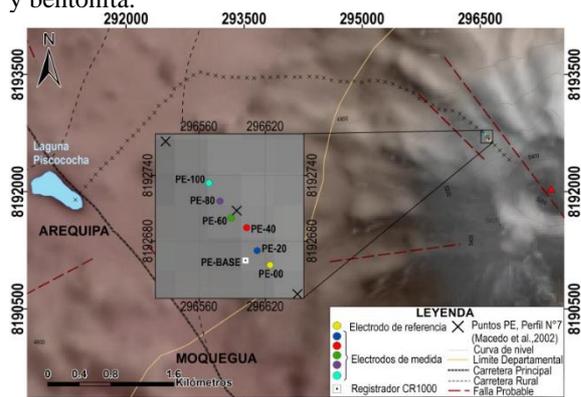


Fig. 3 – Ubicación del equipo de medición continua de PE en el volcán Ubinas.

Por otra parte, también se efectuaron pruebas de mediciones en laboratorio, a fin de optimizar las mediciones en campo. Cuatro pruebas de laboratorio se hicieron en diciembre del 2016 y febrero del 2017, instalando dos electrodos de medida a 20cm de profundidad (Fig. 4c) y dos a 1m (Fig. 4d). Las pruebas 1 y 4 fueron realizadas con una concentración de 20 % de  $\text{CuSO}_4$  y 80 % de bentonita, mientras que las pruebas 2 y 3 con 40 % de  $\text{CuSO}_4$  y 60 % de bentonita. En la prueba 4, se rellenó los electrodos hasta la mitad de su capacidad y se cubrieron con tecnopor y es notable que la variación diurna se ve incrementada cuando se retira el tecnopor de los electrodos a 20 cm (Fig. 4c). Como resultado de las pruebas, se concluyó que la concentración más adecuada es la de 80 % de bentonita y 20 % de sulfato, pues mantiene la humedad necesaria y reduce el tiempo de estabilización al momento de la instalación.

La señal de los electrodos ubicados a 20 cm de profundidad (Fig. 4c), muestra una variación durante el día y la noche (diurna). Siendo un potencial de electrofiltración “per descensum”, la variación de la humedad genera un ruido importante (Rizzo et al., 2004) porque mientras más superficiales se encuentren los electrodos están más expuestos al secado del suelo, lo cual es corroborado por la señal de los electrodos ubicados a 1 m (Fig. 4d) que no presenta una variación diurna marcada.

Los datos de temperatura y precipitación son los registrados por la Oficina Meteorológica de Aeródromo (OMA), ubicada a ~5 km al NW del laboratorio (Time and Date, 2017 y AccuWeather, 2017). Estos datos al ser comparados con la temperatura registrada por el termistor del datalogger presentan mucha concordancia (Fig. 4a y 4b). La mayor temperatura registrada fue de 31.8 °C (datalogger) y 24 °C (OMA) el día 4 de enero del 2017, estos valores máximos correlacionan con el pico de PE observado durante la Prueba 2 (Fig. 4c) y a su vez coincide con una precipitación de 8 mm (Fig. 4e). La señal de PE tiene una tendencia positiva en las fechas de mayor precipitación (Fig. 4c y 4d).

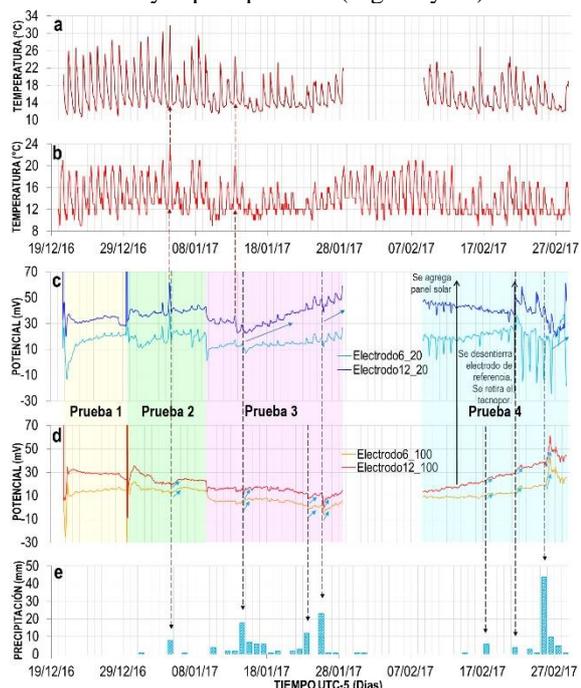


Fig. 4 – Comparación de resultados de las pruebas de PE a) temperatura del equipo, b) temperatura de la OMA, c) PE de los electrodos ubicados a 20 cm, d) PE de los electrodos ubicados a 100 cm y e) precipitación.

Con los datos obtenidos, tanto sísmicos como eléctricos, se procedió a la interpretación de los mismos. Para el análisis sísmico fue necesario considerar el modelo de pronóstico propuesto por Del Carpio et al. (2016), el cual está basado en el modelo de White (2011). Este es producto del estudio de las señales sísmicas del proceso eruptivo 2006-2009 del volcán Ubinas, encontrando un patrón cuya alta efectividad se ha demostrado durante la erupción 2013-2015. Este patrón consta de cuatro fases: (I) Inicia con eventos TOR y VTP, los cuales están relacionados a presión y paso de fluidos que generan a su vez fractura de rocas. (II) Incremento de eventos TRE, cuyo modelo de fuente es asociado a perturbación del sistema hidrotermal. (III) Eventos HIB, que indican ascenso de magma en sus últimos tramos y, por último, (IV) las EXP seguidas de TRE

(en una fase eruptiva indicaría desgasificación y/o emisión de ceniza).

Teniendo en cuenta este modelo se dividió el periodo de análisis en 4 etapas representativas según la predominancia de eventos (Fig. 5).

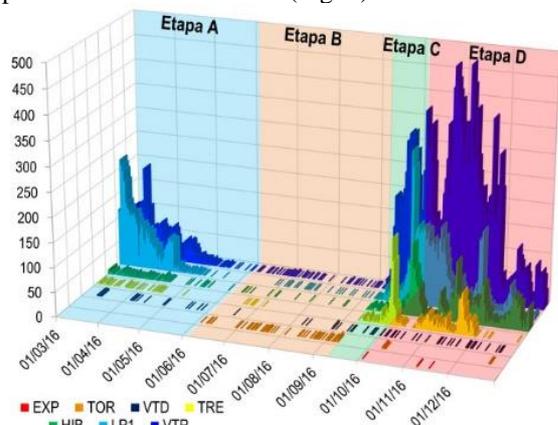


Fig. 5 – Gráfico de columnas en tres dimensiones de los sismos volcánicos ocurridos por día durante marzo a diciembre del 2016 en el volcán Ubinas.

La etapa A se presume que indicaría el final del proceso eruptivo anterior (2015) cuya última explosión ocurrió el 15 de enero del 2016. La etapa B se caracteriza por la presencia de eventos TOR (fase I) que indicarían presión y paso de fluidos en una cavidad resonante. Durante la etapa C, se observó incremento de sismos TRE, LP, VTP e HIB (fases II y III), estos últimos indicarían que el ascenso de magma se encuentra ya casi al final de su recorrido a superficie, lo que es apoyado por una perturbación del sistema hidrotermal (TRE). Finalmente, en la etapa D se cumple el modelo, ocurriendo cinco explosiones (fase IV), y es a finales de noviembre que la sismicidad desciende considerablemente (posible menor aporte de fluidos).

La sismicidad VT muestra una localización preferencial a lo largo de la falla local NW-SE (Rivera et al., 2011), en profundidad se localizan entre 1 a 5 km.s.n.m. (Fig. 6). Los eventos VT suelen localizarse cerca a las fallas, debido a que, por ser zonas de debilidad, se conducen mejor los fluidos y es por la presión de éstos que se producen fracturas.

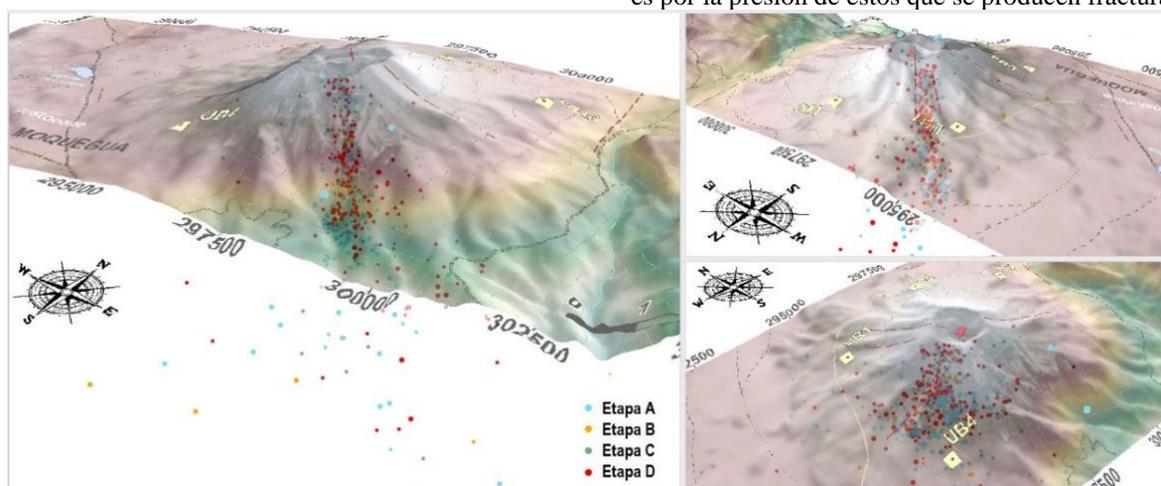


Fig. 6 – Visualización en 3 dimensiones de los eventos VT en el volcán Ubinas durante el período marzo a diciembre del 2016 clasificado en 4 etapas.

El análisis de las señales eléctricas en el volcán Ubinas, muestra que existen variaciones en milivoltios durante el día y la noche, pero durante el período septiembre a noviembre del 2016 se observa una clara anomalía del 9 al 14 de setiembre de más de 60 mV (Fig. 7a), en este periodo los electrodos fueron enterrados a 20 cm de profundidad, instalándose cinco electrodos de medida. Durante el período abril a mayo del 2017, teniendo en cuenta los resultados de las pruebas de PE, se consideró enterrar los electrodos a 50 cm de profundidad y cubrirlos con tecnopor (Fig. 7b), instalándose tres electrodos de medida. Comparando los primeros 42 días de ambos períodos a una misma escala, es notorio que la variación diurna continúa, pero ha disminuido en el segundo periodo. Lo resaltante, es que entre abril y mayo del 2017, no

existe anomalía inicial como en la instalación durante septiembre a noviembre del 2016.

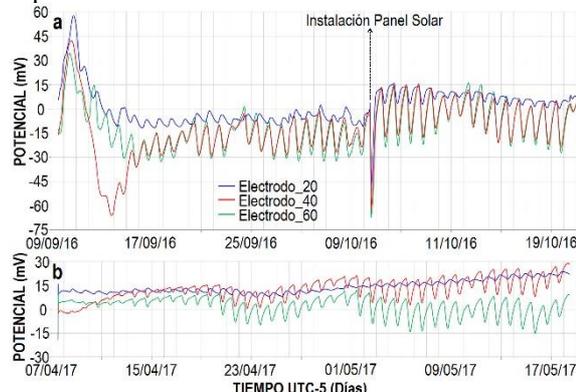


Fig. 7 – Comparación entre resultados de PE en el Volcán Ubinas: a. del 9 de septiembre al 20 de octubre del 2016 y b. del 07 de abril al 18 de mayo del 2017.

Al realizar una comparación entre los datos obtenidos en el Ubinas, tanto de temperatura (del termistor del equipo) como de PE, se encontró una relación inversamente proporcional entre ambos registros. Para obtener una medida relativa del grado de asociación lineal entre la temperatura y el PE, se utilizó el coeficiente de determinación o  $R^2$ . Después de aplicar una regresión lineal se obtuvo una ecuación de la forma  $PE=b*Temperatura+a$ , por lo tanto, para establecer esta relación se despejó la fórmula igualándola a cero  $=(PE-a)/(b*Temperatura)$ .

Luego de aplicar esta corrección, persiste una anomalía en los primeros días de septiembre a noviembre del 2016 (Fig. 8a), a diferencia del segundo periodo en que la señal es más continua (Fig. 8b). Esto hace suponer que la anomalía observada en el PE entre el 9 y 14 de septiembre, no tiene relación directa con la temperatura del equipo ni la temperatura ambiental, sino que posiblemente por un fenómeno de electrofiltración “per ascensum” (vapor ascendente).

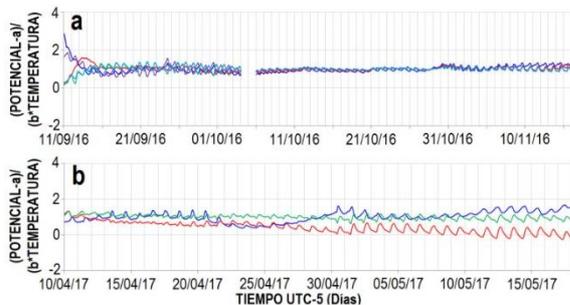


Fig. 8 – Resultado luego de aplicar la ecuación de regresión lineal con mejor  $R^2$  para datos de PE y Temperatura: a. septiembre a noviembre del 2016 y b. abril a mayo del 2017.

Considerando la información del SENAMHI (Fig. 9), posterior a la explosión del 15 de enero del 2016 ocurrieron precipitaciones que favorecieron la

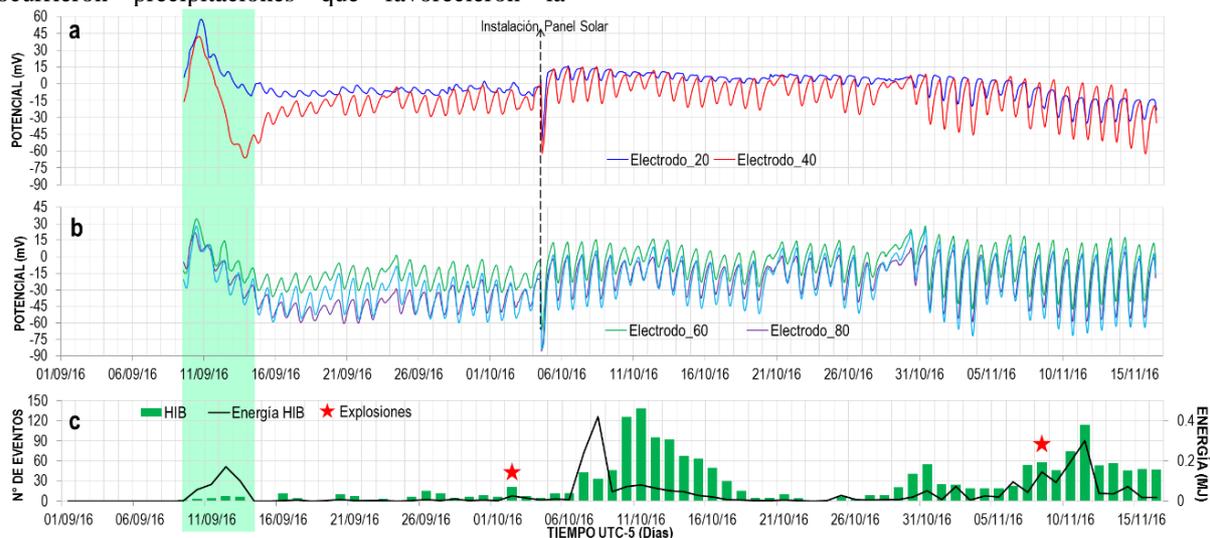


Fig. 10 – Correlación entre las señales Eléctricas y Sísmicas en el volcán Ubinas durante septiembre a noviembre 2016: a. Señal de PE de electrodos a 20 y 40m, b. electrodos a 60, 80 y 100m de la referencia, c. Número y energía de eventos HIB.

alimentación del sistema hidrotermal y además se puede descartar que haya ocurrido un fenómeno de electrofiltración “per descensum” (por infiltración de agua de lluvia) ya que durante septiembre a noviembre de 2016 no ocurrieron precipitaciones.

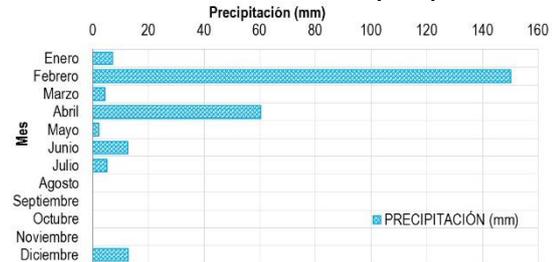


Fig. 9 – Precipitaciones registradas en la Estación Meteorológica Ubinas durante el año 2016 (SENAMHI).

El equipo de PE fue instalado en la zona alta de convección del volcán Ubinas (Macedo et al., 2002), se conoce que el acuífero se encontraba saturado, además, correlacionando el método sísmico y eléctrico, el incremento en la energía de los eventos híbridos (Fig. 10c) es asociado al ascenso de magma en su último recorrido, el calor que irradia este cuerpo caliente perturba el agua de la zona hidrotermal (calor, vibración y evaporación), produciendo el fenómeno de electrofiltración “per ascensum” (asociado al vapor ascendente), lo cual es registrado por el equipo de PE en continuo (Fig. 10a y 10b). Dicha anomalía fortaleció el pronóstico de una erupción que finalmente ocurrió el 2 de octubre (20 días de anticipación). Esta actividad sísmica continuó incrementada luego de la explosión, pero no se observó reflejada en la señal del PE, probablemente porque el calor del magma agotó la mayor parte de la zona hidrotermal en un primer aporte y explosión, y esos picos de energía sísmica indican que aún hay presión y paso de fluidos bajo el edificio volcánico.

La ausencia de una anomalía durante abril a mayo del 2017 (Fig. 11a) puede ser corroborada con la sismica ya que los reportes vulcanológicos del IGP emitidos en el primer trimestre de 2017 describen de manera general que los sismos no superaron los 12 eventos por día, y la máxima energía de los híbridos fue de 0.02MJ (Fig. 11b), que es 10 veces menor a la energía registrada en septiembre de 2016, cuando se generó la anomalía observada en el potencial. Desde abril de 2017, el registro de eventos tornillo (Fig. 11c) indicaría el inicio de un nuevo proceso eruptivo (fase I del modelo de pronóstico), y que el volcán probablemente se encuentra a meses previos de la actividad explosiva.

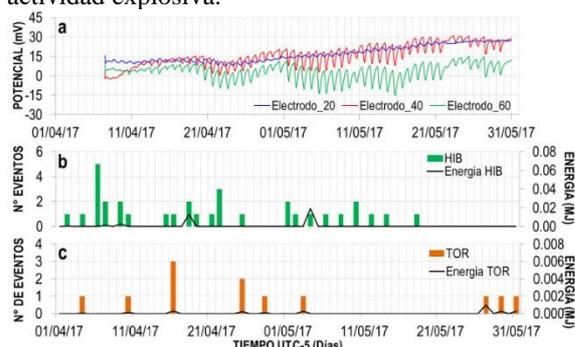


Fig. 11 – Correlación entre las señales Eléctricas y Sísmicas en el volcán Ubinas durante abril a mayo del 2017: a. Señal de PE de los electrodos a 20, 40 y 60 m, b. Número y energía de eventos HIB, c. TOR.

Con estos resultados se puede dar mayor validez al método de potencial espontáneo, el cual junto con la sismica puede determinar si ocurre el fenómeno de electrofiltración “per ascensum” producto de la perturbación del sistema hidrotermal por ascenso de un cuerpo de magma. La perturbación de acuíferos poco profundos del sistema hidrotermal es una de las principales señales de advertencia ante una erupción y contribuye al desencadenamiento de las erupciones (Finizola, 2002; Thouret et al., 2005). Lo más importante es que este proceso ocurre varios días previos a las explosiones, contando con un tiempo prudente para un pronóstico exitoso.

#### Agradecimientos

Este estudio fue realizado en el marco del programa de investigaciones del Instituto Geofísico del Perú, institución que se encarga del monitoreo permanente del volcán Ubinas. La instalación del equipo de potencial espontáneo en continuo ha sido realizada por profesionales del IGP, para lo cual también se agradece las recomendaciones del Dr. Anthony Finizola.

#### Referencias

- AccuWeather® 2017. Recuperado de: [www.accuweather.com](http://www.accuweather.com).
- Chouet, B., Matoza, R. S. 2013. A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 252, 108–175.
- Del Carpio, J., Macedo, O., Torres, J. 2016. A New Method for Volcanic Eruption Forecasting applied with success on Ubinas Volcano. Reporte Técnico Especial del Observatorio Vulcanológico del Sur, Instituto Geofísico del Perú, 72, 24-30.
- Finizola, A. 2002. Etude des systèmes hydrothermaux des volcans actifs: Misti (Pérou) et Stromboli (Italie) : approches géophysiques et géochimiques. Géologie appliquée Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, Français.
- Gonzales, K. 2000. Método del potencial espontáneo aplicado al volcán Ubinas y métodos geoquímicos. Revista de trabajos de Investigación. CNDG – Biblioteca. Instituto Geofísico del Perú, Lima, p. 47-58.
- Macedo, O., Gonzáles, K., Finizola, A., Métaixian, J., Fournier, N., Sortino, F. 2002. Estudio estructural y del Sistema Hidrotermal del volcán Ubinas por Métodos Geofísicos y Geoquímicos, XI Congreso Peruano de Geología. Trabajos Científicos, 23p.
- Rivera, M., Mariño, J., Thouret, J.C. 2011. Geología y Evaluación de Peligros del volcán Ubinas. INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N°46, 83 p.
- Rizzo, E., Suski B., Revil A., Straface, S., Troisi S. 2004. Self-potential signals associated with pumping tests experiments, *J. Geophys. Res.*, 109, B10203.
- Thouret, J.C., Rivera, M., Worner, G., Gerbe, M.C., Finizola, A., Fornari, M., Gonzales K. 2005. Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bull Volcanology*, v.67, p. 557-589.
- Time and Date AS© 2017. Recuperado de: <https://www.timeanddate.com/weather/peru/arequipa/historic>
- White, R. 2011. Monitoring volcanoes and forecasting eruptions. Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy.