

# Discontinuidades cosísmicas identificadas a partir de datos GNSS relacionadas a actividades sísmicas

Rafael Miranda<sup>1</sup>, Rosa Ancasi<sup>1</sup>, Luis Cruz<sup>1</sup>, Edu Taipe<sup>1</sup> y Alfonso Añamuro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI - INGEMMET), Arequipa, Perú - ovi@ingemmet.gob.pe

**Palabras clave:** Desplazamientos cosísmicos, Series GNSS, Sismos CVASHH.

## RESUMEN

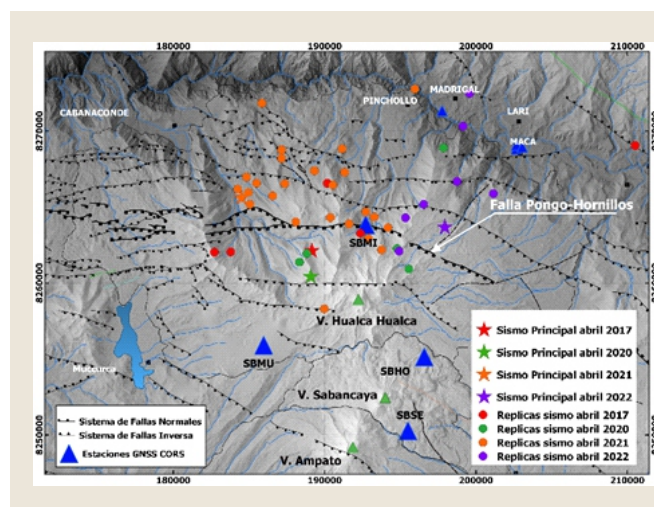
El presente resumen describe los episodios de discontinuidades y desplazamientos co-sísmico asociados a sismos de diferentes magnitudes ocurridos en la zona norte del Complejo Volcánico Amapto - Sabancaya - Hualca Hualca (CVASHH) y alrededores, áreas con recurrencia sísmica asociada a procesos volcánicos y tectónicos. En el año 2014 el Observatorio Vulcanológico del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (OVI - INGEMMET) instaló una red de 08 estaciones GNSS para el monitoreo de volcanes y deslizamientos. La estación GNSS identificada como Milluca (SBMI) se ubica sobre el bloque deslizante de la falla normal Pungo-Hornillos, ha registrado 4 procesos de desplazamiento cosísmico, la más significativa debido al sismo del 08 de octubre del 2021 (5.5 Magnitud Local), asociado a periodos de intrusiones magmáticas, que probablemente activó a un conjunto de sistemas de fallas de esta región, provocando un desplazamiento cosísmico horizontal de 12 cm y vertical de -24 cm, registrado por 11 estaciones de monitoreo GNSS y que a su vez restringe la estimación de las velocidades.

## INTRODUCCIÓN

Las discontinuidades en las series GNSS están inducidas por sismos que provocan impacto significativo en la tasa de desplazamiento súbito de una o varias estaciones GNSS, asociados a sismos de diferentes magnitudes entre 4.7 - 5.5ML (catálogo sísmico IGP) y que a su vez dependen de su ubicación espacial. La estación SBMI que se situó sobre el plano de falla normal Pungo - Hornillos, con la prioridad de medir las discontinuidades relacionadas directamente con la actividad sísmica que constantemente ocurren en el sector norte de CVASHH. Con los datos de esta estación se muestran los diferentes episodios de desplazamientos co-

sísmico y sus magnitudes relacionadas a sismos que provocaron un cambio en las series GNSS, en trabajos futuros se proponen realizar análisis y modelamiento por cada episodio.

Marco Geodinámico: Los procesos tectónicos locales que controlan el CVASHH, es debido a su ubicación dentro de la cadena volcánica de los andes centrales, tectónicamente es un ambiente complejo y muy activo, según Rivera (2014), está limitado por un sin número de lineamientos, fallas activas (Fig. 1), fracturas de dimensiones y rumbos variados. Este complejo sistemas de fallas, se distribuyen en tres grupos: (1) Sistema de fallas normales Trigal, con rumbo hacia el E-O de longitud entre 12 a 10 km, (2) Sistema de fallas normales Solarpampa-Puye Puye-Pillo, con una longitud de ~100 km, con lineamientos en dirección N-S, (3) Sistema de fallas Sepina, con orientación hacia el NE-SO, Rivera et al (2014), Benavente et al (2017), Jay et al (2015), Pritchard et al (2015), Gerbe y Thouret (2004), Antayhua y Tavera (2003), Huaman (1993), Mering (1996). Es un área

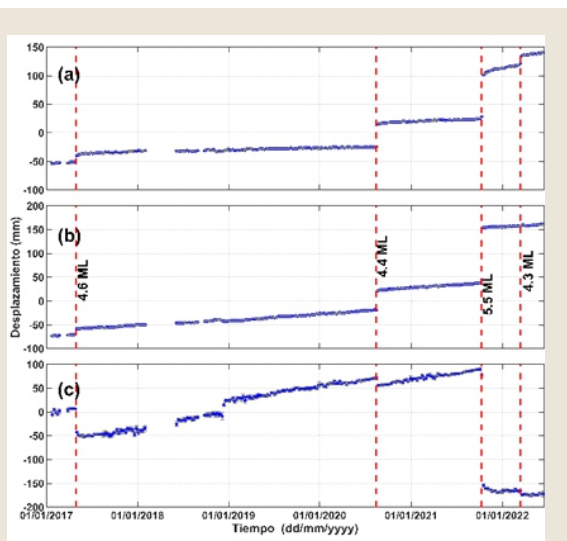


► Fig. 1 - Mapa de distribución de los sistemas de fallas, sismicidad representativa y estaciones GNSS, generadora de procesos de desplazamiento co-sísmico.

sísmicamente muy activa que registran a una fuente de generación de sismos que se distribuyen de manera dispersa entre el N, NW y NE del CVASHH, estos procesos tectónicos locales evidencian una relación entre el vulcanismo actual y los sistemas de fallas. En este grupo de sistema de fallas, se sitúa la falla normal Pungo - Hornillos (Fig. 1), desde que se tiene datos de sismicidad y GNSS, se ha registrado desplazamientos co-sísmico recurrentes con una tasa de hundimiento entre -24 a -1.5 cm.

Observaciones GNSS CORS: Después de haberse iniciado la actividad eruptiva del volcán Sabancaya (6 de noviembre del 2016), se estableció una cuarta estación GNSS permanente en octubre del 2016 al norte del volcán, con el objetivo de medir y cuantificar deformación asociada a intrusiones magmáticas, sin esperar medir desplazamientos co-sísmico del bloque deslizante de la falla normal Pungo - Hornillos, probablemente asociados a procesos de intrusión magmática desde fuentes profundas que terminaron activando los sistemas de falla. Analizamos datos de 11 estaciones GNSS CORS (Fig. 1), configurados para muestrear cada 15 segundos. El procesamiento diario se realiza con el software GAMIT/GLOBK v.10.7.1, (Herring y McClusky et al 2010).

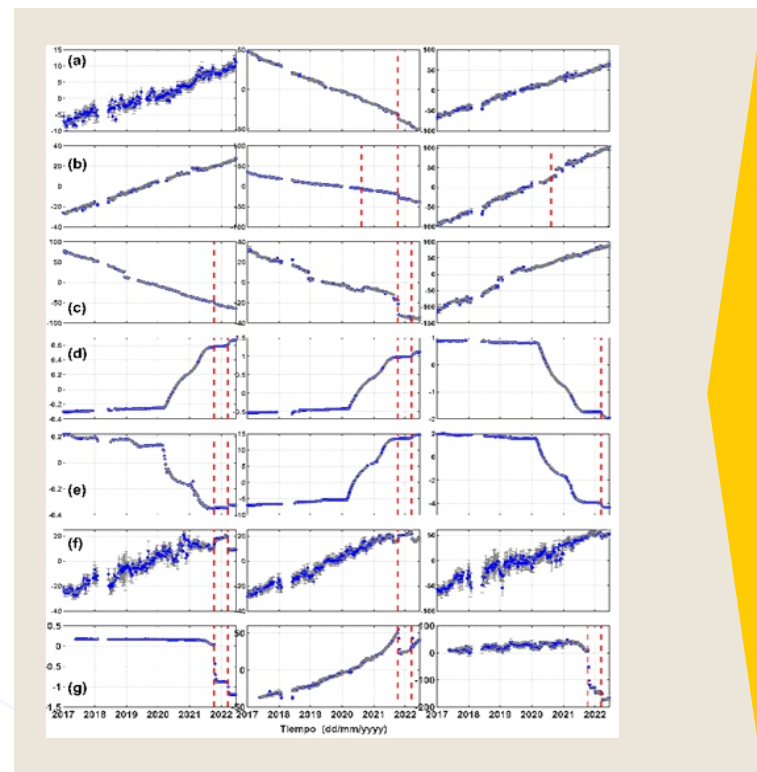
Para estimar las posiciones diarias absolutas incluimos en el procesamiento 22 sitios permanentes



► Fig. 2 - Serie temporal de la estación GNSS SBMI (Milluca), con desplazamientos co-sísmico de 04 episodios, asociados a sismo con magnitudes >4.3 (líneas rojas).

del Servicio GNSS Internacional (IGS) de la placa de Sudamérica, empleando las efemérides finales, parámetros de rotación de la tierra, del modelo de ionosfera y los sesgos de código diferencial para satélites y receptores. La estación GNSS SBMI (Milluca) registro 4 episodios de deformación co-sísmica de hasta -24 cm (componente vertical) con un periodo post-sísmico de ~ 2 meses después del sismo del 08 de octubre del 2021, en la Fig. 2 se ilustra la serie temporal más representativa del desplazamiento co-sísmico.

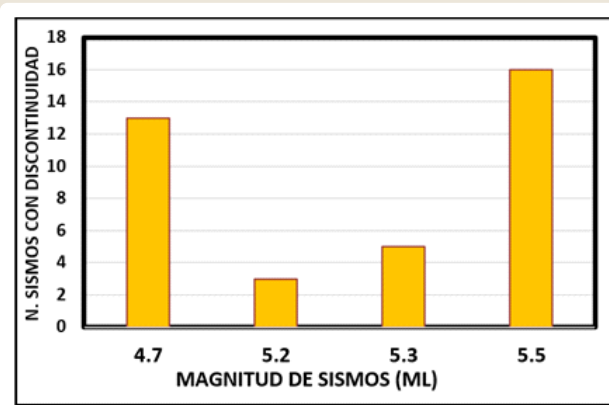
Registro De Discontinuidades En Los Datos GNSS: Las discontinuidades identificadas en las series de tiempo en las diferentes estaciones de monitoreo de volcanes y deslizamientos se visualizan en la Fig. 3, registrándose desplazamientos horizontales y verticales en al menos una componente, inducidos por sismos de magnitudes mayores >4ML y compensaciones co-sísmico relacionados a estos sismos importantes (Tabla 1) registrados desde el año 2015. Es probable que existan discontinuidades no identificadas en las series de tiempo inducidas por



► Fig. 3 - Discontinuidades observadas en 08 estaciones GNSS asociado a sismos > de 4.7 ML, serie temporal de la a) estación SurEste, b) estación Hornillos, c) estación Mucurca, d) estación Maca 1, e) estación Maca 3, f) estación Maca 2 y g) estación Madrigal.

sismos de menores magnitudes, dada la alta tasa de deformación del Sabancaya (~ 3.4 cm/año) y en los deslizamientos del Colca, enmascaran muchos procesos co-sísmicos, asociados a procesos de recarga de magma hacia la cámara magmática regional situada entre 12 - 13 km de profundidad (Boxiart et al. 2020), determinándose un volumen instruido de 155 millones m<sup>3</sup>, (mayor volumen de magma calculado). De acuerdo a MacQueen et al 2020, dicha área está altamente estresada por las altas presiones, asociadas al volumen de magma en ascenso, y su ubicación dentro de un sistema hidrotermal, que activan diferentes sistemas de fallas, como Pungo-hornillos.

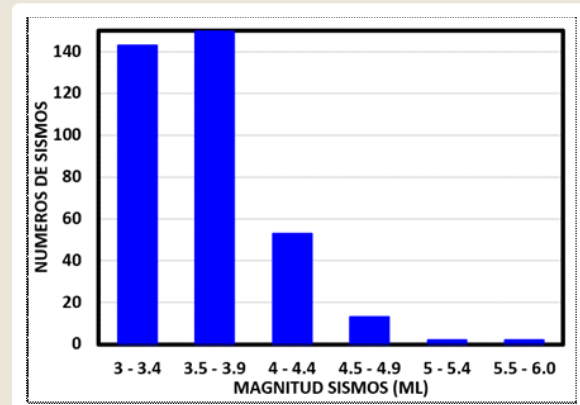
Desde nuestro enfoque se han identificado 37 discontinuidades en las series de tiempo GNSS, asociados a desplazamientos inducidos por sismos (Tabla 1). Sin embargo, entendemos que existen discontinuidades en la base de datos que requieren mayor análisis. La Fig. 1, muestra la red de estaciones GNSS que registraron discontinuidades inducidos por sismos de magnitud > 4ML. En la Fig. 4 se muestra un histograma del número de discontinuidades con respecto a la magnitud de los sismos que indujeron discontinuidades, sismos de 5.5ML inducen mayores magnitudes de deformaciones registrados a fecha.



► Fig. 4 - Histograma del número total de discontinuidades identificadas con respecto a la magnitud de los sismos.

La Fig. 5, muestra el número de sismos que originaron discontinuidades en las estaciones GNSS en relación con su magnitud. De este conjunto de sismos, un total de 553 eventos registrados corresponde a un ámbito de 50 km con respecto a los sistemas de fallas, 4

eventos sísmicos son responsables de las discontinuidades visibles en nuestra base de datos, diremos que en el rango de magnitud 3 - 3.9ML que representa al 87 % de los sismos registrados entre el 2017 - 2022 (mayo), rara vez inducen discontinuidades, el 12% de estos sismos que corresponde a magnitudes entre 4.0 - 4.9 ML son responsables del 57% de las deformaciones co-sísmicas, que indujeron al menos una discontinuidad en una componente en las series GNSS.



► Fig. 5 - Número total de sismo registrados por la red del IGP y clasificados dentro de un radio de 50 km, respecto al sistema de fallas que indujeron discontinuidades.

Observamos que los sismos entre 5.0 - 5.5 que representan el 1% y son responsables del 43% de los desplazamientos co-sísmicos registrados en las series GNSS de la red de monitoreo. Un sismo importante de magnitud 6.0ML (1 de noviembre del 2016) registrado en la región de Puno a ~ 100 km del sistema de fallas Pungo -Hornillos, no genero cambios en las series GNSS.

Discontinuidades Inducidos Por Sismos Importantes en el CVASHH.

Sismo del 30 de abril del 2017: Ocurrido a lo largo del sistema de fallas activas normales Pungo-Hornillos y Hualca Hualca-Jatun Rumi, un 30 de abril de 2017 de magnitud 5.2ML (13:29 UTC) a 3.9 km al suroeste de la estación GNSS SBMI, con una profundidad de 11 km, acompañado de 5 réplicas de magnitudes entre 3.4 - 4.5 ML, generando discontinuidades en tres componentes de la estación GNSS SBMI, con un desplazamiento co-sísmico máximo en la

componente horizontal de 1.5 cm y un desplazamiento co-sísmico registrado en la componente vertical de -4.4 cm de hundimiento, la dirección predominante del desplazamiento co-sísmico con la estimación de velocidades presenta una orientación hacia el noreste.

Sismo del 14 de agosto del 2020: Ocurrido el 14 de agosto de 2020 de magnitud 5.3ML (15:34 Hora Local) a 5 km al suroeste de la estación GNSS SBMI, con una profundidad de 7 km, sin réplicas después del evento principal, los días del 15 y 16 se registraron sismos próximos al evento del día 15, las magnitudes estuvieron entre 3.4 - 3.9 ML, el epicentro del sismo se localizó a lo largo del límite del sistema de fallas activas normales de Hualca Hualca - Jatun Rumi, provocando hasta 5 discontinuidades, de las cuales 3 se observaron en la estación GNSS SBMI con desplazamiento co-sísmico horizontal de 3.9 cm, en dirección noreste y un desplazamiento co-sísmico vertical máximo de -1.5 cm, dos de estas discontinuidades se registraron en la estación GNSS SBHO con desplazamientos horizontales de 3 mm y vertical de -8 mm.

Sismo del 09 de octubre del 2021: Uno de los sismos de mayor magnitud registrado en el ámbito del sistema de fallas normales, ocurrió el 8 de octubre de 2021 con magnitud 5.5ML a 8.4 km al oeste de la estación GNSS SBMI, con una profundidad de 10 km, genero 22 réplicas de magnitudes entre 3.4 - 4.3 ML. La red de estaciones GNSS (Fig. 1) registraron desplazamientos co-sísmicos horizontales y verticales

en 8 estaciones de monitoreo volcánico y deslizamientos (Tabla 1). La estación GNSS SBMI registro un desplazamiento horizontal de 11.7 cm y vertical de -24.1 cm, con dirección predominante hacia el noreste., mientras las estaciones GNSS SBSE, SBHO y SBMU, presentaron una dirección de desplazamiento co-sísmico horizontal hacia el suroeste, la estación GNSS MGAL de monitoreo de deslizamientos registro un desplazamiento horizontal de 78.6 cm y vertical de -12.7 cm, activando al deslizamiento, las estaciones GNSS permanentes MAD1, MADM y MAD3, presentaron una dirección de desplazamiento en sentido de la pendiente del deslizamiento.

Sismo del 15 de marzo del 2022: Es el cuarto sismo que genero un impacto significativo en la tasa de desplazamiento y deformación en las estaciones de monitoreo de volcanes y deslizamientos, este sismo fue detectado entre el límite del sistema de fallas activas normales Pungo Hornillos - Hualca Hualca - Jatun Rumi, ocurrido el 15 de marzo del 2022 de magnitud 4.7ML a 5.2 km al este de la estación GNSS SBMI, con una profundidad de 11 km, con un total de 6 réplicas asociados al sismo principal, las magnitudes fueron entre 3.2 - 4.1 ML, las discontinuidades inducidas en las series GNSS, fueron un total de 13 (Tabla 1), registrados en 5 estaciones GNSS (Fig. 1), el mayor desplazamiento co-sísmico horizontal fue de 26.8 cm (MGAL) y vertical de -14.5 cm (estación MAD3), las compensaciones co-sísmicas se llegaron a estabilizar después de 2 meses de ocurrido el evento.

## CONCLUSIONES

El propósito de este resumen es la identificar y estimar desplazamientos y movimientos co-sísmicos en registros GNSS asociados con sismos registrados en ámbito del CVASHH, como mencionamos, en trabajos futuros se proponen realizar estimaciones del desplazamiento co-sísmico y modelamiento usando geodesia espacial.

Los registros de discontinuidades en la data GNSS evidencian que sismos con magnitudes menores a 4.5 inducen desplazamientos co-sísmicos de menor magnitud, sismos de magnitud 5.5ML son los responsables de generar las mayores discontinuidades visibles en las series GNSS, que significan tan solo el 1% de los sismos registrados en el ámbito de los sistemas de fallas y que provocan el 43% de las discontinuidades, con un radio de afectación de 20 km con respecto al sistema de fallas activas. Las magnitudes de desplazamiento en la componente vertical fueron de -24 cm y en las componentes horizontales de hasta 12 cm, registrados por la red de monitoreo volcánico. La red de monitoreo de deslizamientos registro hasta 78 cm de desplazamiento en la componente horizontal y en la vertical de -14 cm, geográficamente asociados al epicentro del sismo, su profundidad y proximidad a los sistemas de fallas activas.



Observamos que la región más activa se refiere al sector norte del complejo, región con alta actividad extensiva asociado al incremento de esfuerzos litosféricos típico de fallas normales, que probablemente estén asociados con los periodos de intrusiones magmáticas que correlacionan con los periodos de los sismos ocurridos. El estrés debido a las altas presiones que es provocado por el volumen de magma en ascenso genera una compresión del área circundante provocando un acomodamiento y compensación regional del área limitado por los sistemas de fallas activas de Pungo – Hornillos y Hualca Hualca - Jatun Rumi, la cual se sitúa dentro de un sistema hidrotermal activo, como respuesta a la compresión ejercido por el ascenso de magmas hacia las regiones más superficiales del volcán Sabancaya.

## REFERENCIAS

- ▶ Antayhua, Y., & Tavera, H. (2003). Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya (Arequipa). Gerbe, M. C., & Thouret, J. C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6), 541-561.
- ▶ Antayhua, Y., & Tavera, H. (2003). Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya (Arequipa). Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E., & Audin, L. (2017). Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. *INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 64, 370.
- ▶ Boixart G, Cruz LF, Miranda Cruz R, Euillades PA, Euillades LD, Battaglia M (2020) Source model for Sabancaya volcano constrained by dinsar and GNSS surface Deformation Observation. *Remote Sensing* 12:1852. <https://doi.org/10.3390/rs12111852>.
- ▶ Gerbe, M. C., & Thouret, J. C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6), 541-561.
- ▶ Herring, T.; King, B.; McClusky, S. Introduction to GAMIT/GLOBK Reference manual Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.3. EAPS. 2010.
- ▶ Huaman et al (1993): Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Perú): *Bull. Soc. Géol. France*, t. 164, no 6, 807-818.
- ▶ Jay, J. A., Delgado, F. J., Torres, J. L., Pritchard, M. E., Macedo, O., & Aguilar, V. (2015). Deformation and seismicity near Sabancaya volcano, southern Peru, from 2002 to 2015. *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2780-2788.
- ▶ MacQueen, P., Delgado, F., Reath, K.A., Pritchard, M.E., Bagnardi, M., Milillo, P., Lundgren, P.R., Macedo, O., Aguilar, V., Ortega, M., Ancasi, R., Lazarte Zerpa, I.A., Miranda, R., 2020. Volcanotectonic interactions at Sabancaya volcano, peru eruptions, magmatic inflation, moderate earthquakes, and fault creep. <https://doi.org/10.1002/essoar.10501561.1>
- ▶ Mering, C.; Huamán, D.; Chorowicz, J.; Deffontaines, B. & Guillaude, R. (1996) - New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics*, 259(1-3): 153-169.
- ▶ Rivera Porras, M. A., Mariño Salazar, J., Samaniego Eguiguren, P., Delgado Ramos, R., & Manrique Llerena, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, Arequipa - [Boletín C 61].