

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

**Informe Técnico N° A7258**

# EVALUACIÓN TÉCNICO GEOLÓGICA POST SISMO EN LA PROVINCIA DE CAYLLOMA - AREQUIPA

Departamento Arequipa  
Provincia Caylloma  
Distrito Maca



MAYO  
2022

## **EVALUACIÓN TÉCNICO GEOLÓGICA POST SISMO EN LA PROVINCIA DE CAYLLOMA - AREQUIPA**

Elaborado por la

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Ingemmet

Equipo de investigación:

Briant García Fernández Baca

Anderson Palomino Tacuri

Jose A. Luna Zapata

Enoch Aguirre Alegre

Lorena Rosell Guevara

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). "Evaluación técnico geológica post sismo en la provincia de Caylloma - Arequipa", informe técnico N° 7258, Ingemmet. 22 p.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD .....	4
3. ANTECEDENTES .....	3
4. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS .....	5
5. INVENTARIO DE EFECTOS O DAÑOS .....	6
6. PELIGROS GEOLÓGICOS .....	15
7. ANALISIS TECTÓNICO - ESTRUCTURAL .....	14
CONCLUSIONES.....	14
RECOMENDACIONES .....	15
REFERENCIAS .....	16

## **EVALUACIÓN TÉCNICO GEOLÓGICA POST SISMO EN LA PROVINCIA DE CAYLLOMA - AREQUIPA**

### **RESUMEN**

El 16 de marzo del presente año, un sismo de 5.5 grados de magnitud afectó la zona conocida como el valle y cañón del Colca, su epicentro se localizó a casi 6 km al sur del distrito de Maca en la provincia de Caylloma, Departamento de Arequipa. El fenómeno ocasionó la ocurrencia de diversos procesos geológicos asociados principalmente en la margen izquierda del río Colca, tales como movimientos en masa, ruptura o desplazamiento vertical en el suelo y la licuefacción de suelos.

Estos procesos geológicos asociados, así como efectos de sitio, afectaron a los pobladores de los distritos de Maca, Madrigal, Cabanaconde y Achoma así como al centro poblado de Pinchollo. Durante nuestros trabajos se reconoció que la zona más afectada fue el distrito de Maca, debido a que la población de este distrito se encuentra emplazada en un deslizamiento activo con suelos sueltos a medianamente sueltos de tipo lacustre (presencia de diatomitas) y napa freática muy superficial.

Este informe presenta los resultados de la evaluación técnica geológica post sismo en las zonas afectadas por el sismo del 16 de marzo, basado en el inventario de daños y ocurrencia de agrietamientos y derrumbes. Las evidencias muestran que el sismo fue desencadenado por la reactivación de la falla activa Pungo-Hornillos. Por último, se presentan algunas conclusiones y recomendaciones, principalmente orientadas al mejoramiento de los Planes de Ordenamiento Territorial y la Gestión del Riesgo de Desastres.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), dentro de sus funciones brinda asistencia técnica de calidad e información actualizada, confiable, oportuna y accesible en geología, que permite identificar, caracterizar, evaluar y diagnosticar aquellas zonas urbanas o rurales, que podrían verse afectadas por peligros geológicos cuya evolución pudiera desencadenar en desastres.

Estos estudios, concebidos principalmente como herramientas de apoyo a la planificación territorial y la gestión del riesgo (planes de emergencia), son publicados en boletines y reportes técnicos. En este caso esta labor es desarrollada, por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico a través del proyecto GA50G: Caracterización neotectónica y paleosismológica en las regiones Ancash, La Libertad y Sur del Perú.

Es por eso que, en cumplimiento de sus funciones, el INGEMMET realizó una evaluación técnica por parte de los especialistas en el valle del Colca que pertenece a la provincia de Caylloma, Departamento de Arequipa, esto a raíz del sismo 5.5 Mw ocurrido el 16 de marzo con epicentro al sur del distrito de Maca.

El INGEMMET, por intermedio de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico - DGAR, comisionó a los profesionales Briant García Fernández-Baca, Anderson Palomino Tacuri, José A. Luna Zapata, Enoch Aguirre Alegre y Lorena Rosell Guevara, especialistas en peligros geológicos, para realizar las evaluaciones ingeniero - geológicas en los sectores afectados, los cuales se realizaron entre el 17 de marzo y 04 de abril del presente año.

Las tareas desarrolladas en dicha comisión consistieron en:

- Localización de la falla activa como fuente generadora del sismo del 16 de marzo.
- Inspección técnica de los efectos geológicos y daños en las construcciones.
- Toma de datos y mediciones de grietas en el suelo.
- Inventario, ubicación y análisis de suelos deformados por licuefacción.
- Reuniones sostenidas con autoridades locales y personal de INDECI.
- Sobrevuelo en dron para realizar cartografiado a lo largo de la falla Pungo-Hornillos.
- Por último, se tomaron algunos datos de campo (geometría y medidas de grietas y/o fracturas) y registro fotográfico.

## 2. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

La zona evaluada está ubicada, en el sur de Perú (Fig. 1), específicamente en la zona conocida como el valle del Colca en la provincia de Caylloma del departamento de Arequipa.

La accesibilidad a la zona afectada se realiza a través de la vía Arequipa-Cabanaconde o a través de la carretera Majes-Chivay. El tiempo de viaje vía terrestre aproximado es de 16 horas desde Lima.

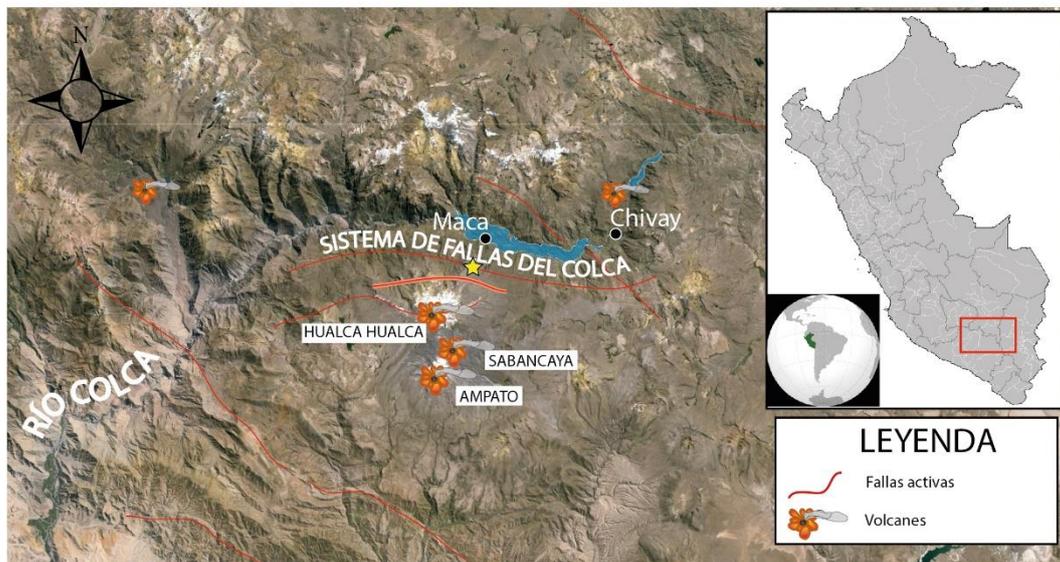


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Se observa en estrella amarilla el epicentro según el IGP y en líneas rojas las fallas activas. La línea roja resaltante representa a la falla Pungo-Hornillos.

### 3. ANTECEDENTES

El día 16 de marzo en horas de la madrugada, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), alertó sobre la ocurrencia de un movimiento sísmico con magnitud 5.5 Mw a una profundidad de 12 km (Figura 2). Este evento sísmico fue seguido en los próximos días, por más de una docena de réplicas con magnitudes menores.

De acuerdo a los datos recogidos por IGP, el evento sísmico tuvo las siguientes características:

- Dia: 16 de marzo del 2022
- Tiempo de origen: 01:06 (Hora Perú)
- Latitud sur: -15.6871
- Longitud oeste: -71.8179
- Profundidad: 12
- Magnitud: 5.5
- Intensidad: V-VI Pinchollo, Madrigal, Maca, Cabanaconde

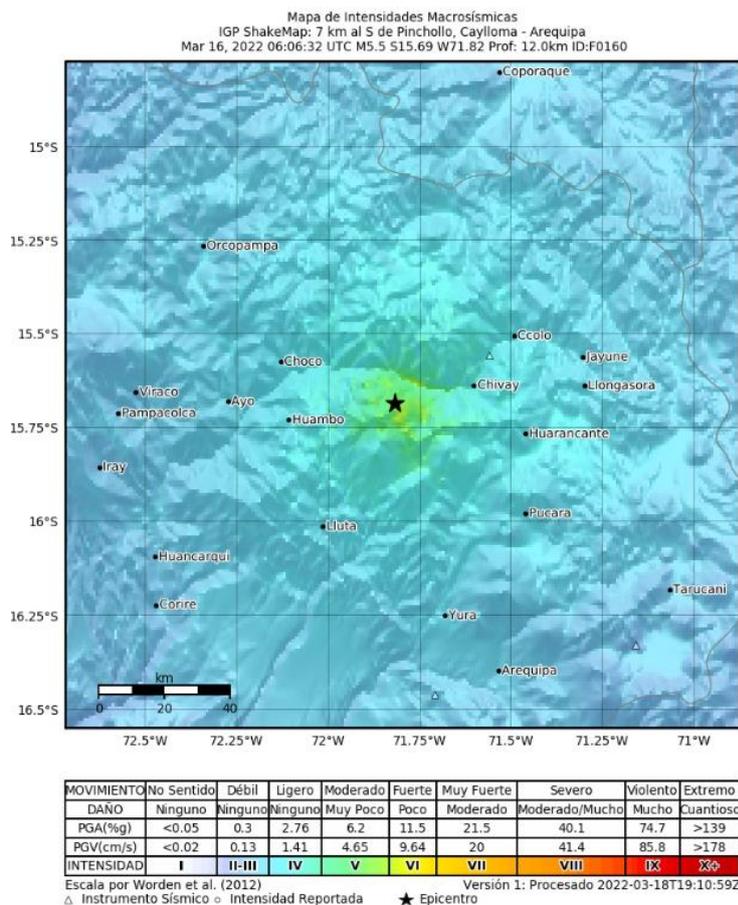


Figura 2. Mapa de intensidades estimadas (fuente IGP).

#### 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

El Cañón del Colca es considerado uno de los cañones más profundos del planeta, tiene una dirección EW y corta los andes del sur peruano drenando sus aguas hacia el Océano Pacífico. Los procesos geológicos y geodinámicos han modelado esta elongada cuenca, donde se registran eventos volcánicos, glaciaciones y constante actividad sísmica.

Esta imponente geoforma es producto de la incisión ocurrida desde el Oligoceno tardío hasta el Pleistoceno Medio (Thouret et al., 2007) (Figura 3). En la margen izquierda del río Colca, a la altura de las localidades de Cabanaconde y Huambo, se observa el Complejo Volcánico Hualca Hualca (CVHH) y el Campo Volcánico Huambo (CVH) (Delacour et al., 2007); ambos centros de emisión han depositado sus materiales volcánicos hacia el cañón del Colca; un colapso del edificio volcánico del Volcán Hualca Hualca, hace  $2.6 \pm 0.8$  Ma (Kaneoka & Guevara, 1984) generó una avalancha de escombros y a su vez formó una caldera en forma de herradura que albergó posteriormente domos y coladas de lavas (Alcalá et al., 2016), un poco más hacia el oeste se formó en el Holoceno el CVH, sus extensas coladas lávicas se extienden se sur a norte, Delacour et al. (2007) han datado su última actividad volcánica hace  $2650 \pm 50$  años.



Es importante mencionar que en el área de Maca afloran depósitos de avalanchas de rocas y depósitos lacustres (limoarcillitas y diatomitas). Todos estos depósitos, desde el punto de vista geotécnico, presentan características relativamente malas: poco compactos o no consolidados y se consideran factores condicionantes para deslizamientos, asentamientos de terreno y agrietamientos. La presencia de agua subterránea, subsuperficial y manantiales, empeoran las condiciones ingenieriles del suelo de fundación del poblado de Maca (Zavala et al 2012).

## 5. INVENTARIO DE EFECTOS Y DAÑOS

En la zona de evaluación los especialistas hemos observado efectos co-sísmicos reflejado en desplazamientos o rupturas verticales, licuefacción de suelos, y movimientos en masa (Figura 4), así como daños estructurales en la infraestructura pública y privada.

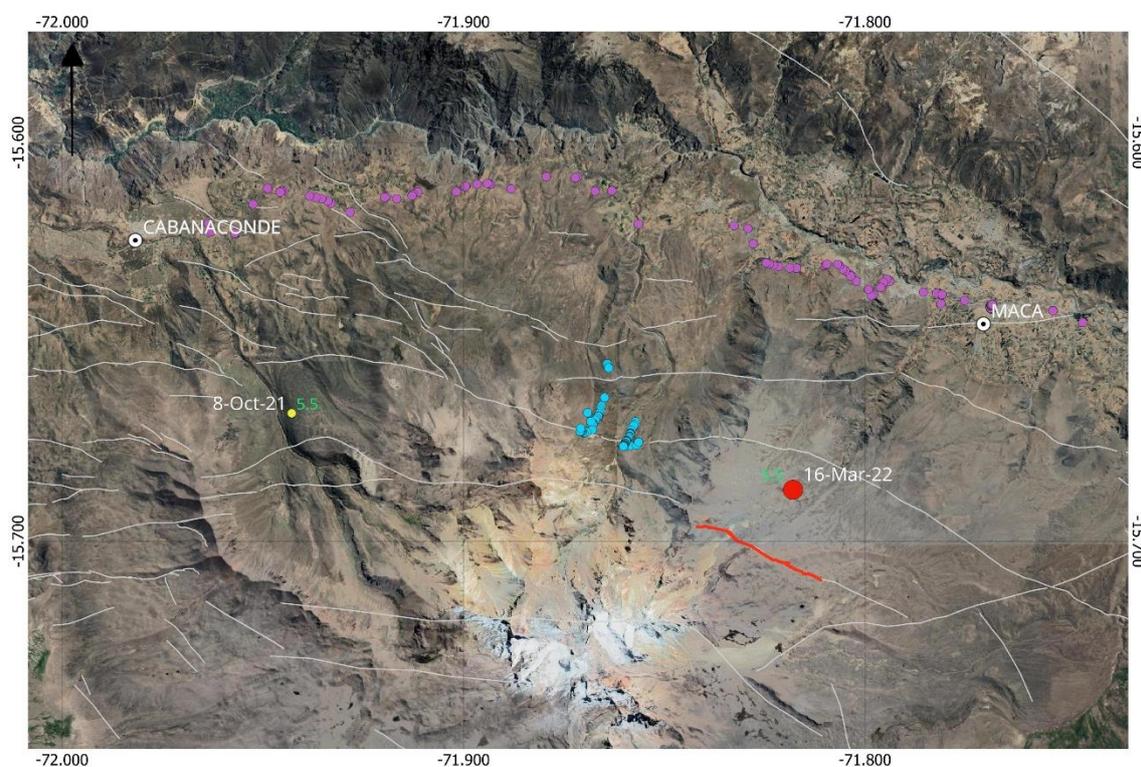


Figura 4. Imagen satelital con los efectos co-sísmicos identificados en campo luego del sismo de 5.5 del 16 de marzo con epicentro al suroeste de Maca (círculo rojo). La línea roja representa la longitud de ruptura de la falla Pungo Hornillo y los puntos lilas indican la ocurrencia de movimientos en masa. Además se identificaron 'jumping stones' en puntos de color celeste, sin embargo estos efectos parecen pertenecer a un evento sísmico anterior.

A continuación se detalla los efectos del sismo, tanto en la naturaleza como en en la infraestructura.

### 5.1 Desplazamiento vertical o ruptura superficial

El objetivo principal de la evaluación geológica post sismo fue identificar la falla geológica que desencadenó el sismo de 5.5 Mw. Durante los trabajos de campo se identificó que a lo largo de la falla Pungo Hornillos cartografiada por Benavente et al. (2017) mostraba rasgos de reactivación, estas evidencias se muestran como desplazamientos verticales (Foto 1) en el suelo a lo largo aproximadamente 4km (Figuras 4 y 5) y horizontales, tal como se evidencia en la figura 6.



Foto 1. Desplazamiento vertical o ruptura en el suelo, relacionada a la reactivación de la falla activa Pungo-Hornillos.

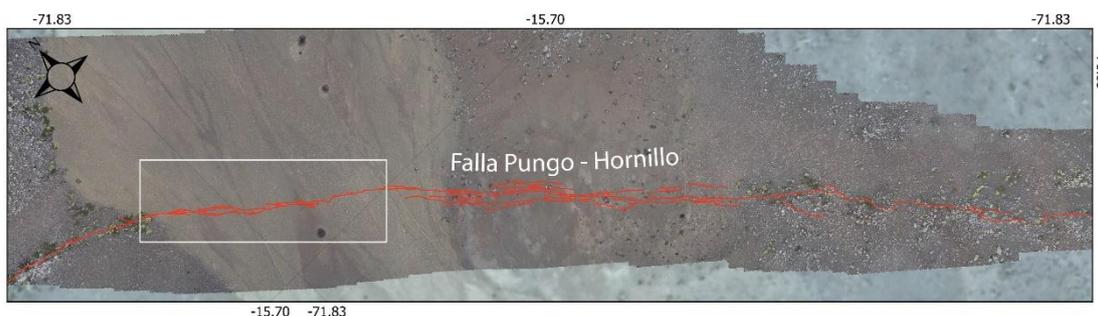


Figura 5. Ortofoto construida a partir de fotografías de drone sobre la cual se ha cartografiado las grietas y rupturas superficiales (líneas rojas) generadas por la reactivación de la falla activa Pungo-Hornillo. El recuadro blanco es la zona de detalle que se muestra en la siguiente figura.

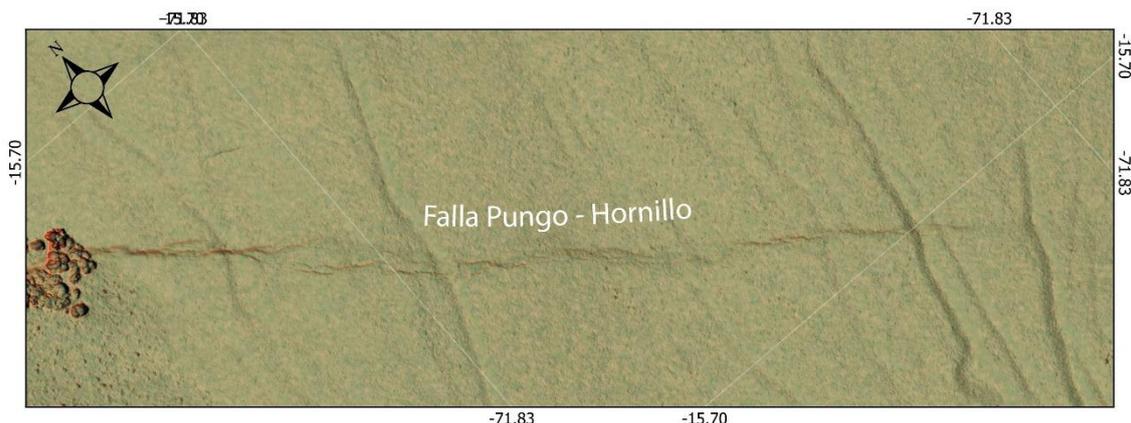


Figura 6. Zona de detalle de la figura 5. Modelo de elevación digital obtenido con dron en la quebrada Jato. Se resalta en la parte media en colores rojizos las grietas y desplazamientos verticales afectando depósitos aluviales holocenos.

Los desplazamientos varían entre 4cm en el extremo este de la falla y 40cm en la zona central (quebrada Jato) (Figuras 5 y 6). Se debe señalar que esta ruptura es una evidencia reportada por primera vez luego de la reactivación de esta falla activa en la zona del Colca.

Los Modelos Digitales de Terreno obtenidos con dron, permitieron mejorar el cartografiado de esta ruptura (Figuras 5 y 6), mostrando segmentación paralela de la falla en la planicie de la quebrada Jato.

## 5.2. Licuación de suelos

Se han identificado una zona con estos efectos en la quebrada Jato (Figura 7). Este fenómeno consiste en emisiones de arena y agua, en la mayoría de los casos relacionadas a las grietas del suelo saturado en agua.

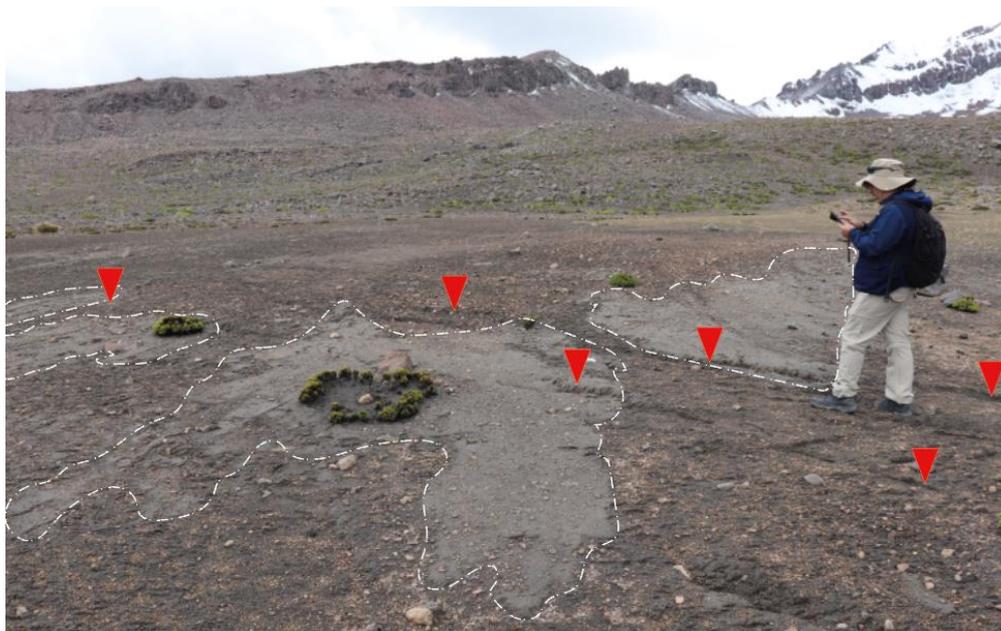


Figura 7. Emisiones de arena y agua (polígonos con línea entrecortada de color blanco) próximos a las grietas o rupturas (flechas rojas) de la falla Pungo Hornillos.

### 5.3. Movimientos en Masa

Se han registrado durante el sismo un total de 62 derrumbes principalmente relacionados al corte de talud de la carretera Maca-Cabanaconde (Fotos 2 y 3). Estos movimientos en masa tienen dimensiones variadas y principalmente están relacionados a zonas de depósitos cuaternarios y unidades volcánicas (ignimbritas).



Foto 2. Preciso instante de un derrumbe en la carretera Pinchollo – Cabanaconde. Las zonas permanecieron inestables hasta días después del sismo.



Foto 3. Salida del tunnel entre Maca y Pinchollo con dirección a Pinchollo. Se observó la mayor cantidad de derrumbes y caídas de rocas en esta zona.

#### 5.4. Grietas

Estas deformaciones se observaron en la carretera de salida y entrada a Maca, exactamente en 2 zonas que están relacionadas a los extremos del deslizamiento activo de Maca (Foto 4).



Foto 4. Grietas en la carretera, en la zona de ingreso a Maca.

#### 5.5. Daños en infraestructura

En Maca, el lugar más afectado por el sismo, los daños han sido severos, según el reporte de las autoridades locales prácticamente el 100 % de las viviendas construidas de manera rústica en adobe, piedra y barro (Foto 5) han sido afectadas de manera severa e incluso en algunos casos han colapsado. Mientras que construcciones de cemento y ladrillo se han visto afectadas en menor proporción (Foto 6 y 7).

Así mismo se logró estimar la tendencia de la dirección de propagación de las ondas sísmicas, mediante el análisis de los efectos en las construcciones. Como en la afectación a la iglesia de Maca (Foto 8), en la que se observa que los adornos de su fachada han caído desplazados con una tendencia en cuanto a su dirección, la cual es perpendicular a la dirección de propagación de la onda sísmica.

Se han realizado medidas de las direcciones de caídas y grietas en la iglesia de Maca, resultando que existe una tendencia de N60 (Figura 8).



Foto 5. Viviendas construidas con adobe o piedra y barro colapsadas en la plaza de Maca.



Foto 6. Grietas en la fachada de la Municipalidad de Maca.



Foto 7. Grietas conjugadas en vivienda de cemento y ladrillo recién construido.



Foto 8. Caída orientada de adornos del cerco perimétrico de la iglesia de Maca. Del mismo modo se observa fracturas en la torre de la iglesia.

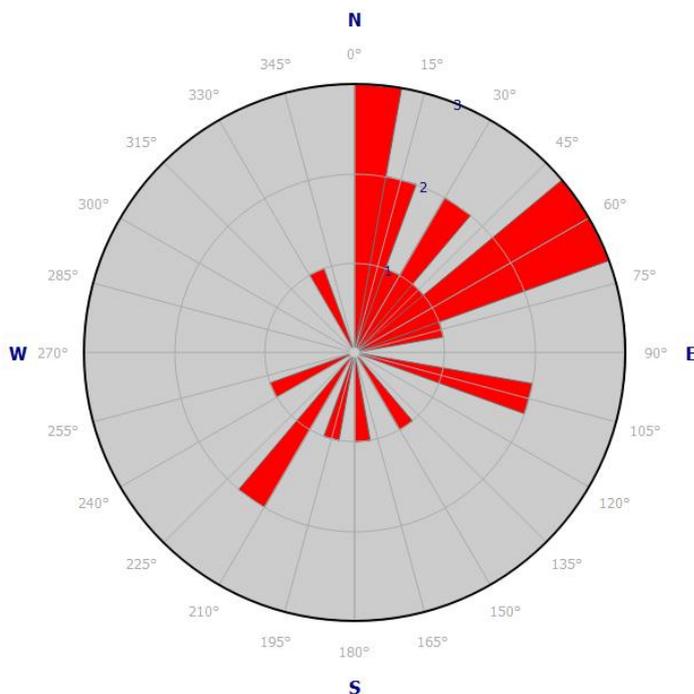


Figura 8. Orientación NE-SO de 25 daños registrados en la iglesia de Maca. La tendencia principal es N60 y la tendencia secundaria es N10.

## 6. PELIGROS GEOLÓGICOS

En base al inventario de daños se ha determinado que la presencia de la falla geológica activa Pungo Hornillos fue la que generó el sismo de 5.5 Mw del 16 de marzo.

Esta estructura se encuentra ubicado al SO del distrito de Maca y es parte del sistema de fallas activas del Colca (Benavente et al., 2017). Su reactivación generó otros procesos geológicos asociados como derrumbes a lo largo de la carretera Maca-Cabanaconde. Así mismo, el deslizamiento activo de Maca ante la ocurrencia de este y otros sismos generan su reactivación, afectando de esta manera a la población que se encuentra asentada sobre él.

### 6.1 Falla activa Pungo-Hornillos

Se trata de una estructura E-O de cinemática normal, con buzamiento al norte y con una longitud total de aproximadamente 20km (Figuras 1 y 9). Esta falla muestra sus evidencias desde la meseta de Hornillos (flanco noreste del volcán Hualca Hualca) hasta la zona de Pungo (sur de Cabanaconde), afectando depósitos volcánicos del Hualca Hualca, así como depósitos morrénicos y aluviales en su trayecto.

Esta falla activa fue identificada por Benavente et al. (2017), sin embargo, antes del sismo del 16 de marzo no se tenía evidencias de su reactivación en los últimos años. En los trabajos de campo se identificó que la reactivación de esta

estructura generó desplazamientos de hasta 40 cm en su escarpe en aproximadamente 4 km de largo.

La reactivación de la falla Pungo-Hornillos corrobora el hecho de que el Sistema de Fallas del Colca es un sistema activo (Benavente et al. 2017) y que esta falla representa una amenaza importante para las localidades cercanas, tales como Achoma, Maca, Pinchollo, Madrigal y Cabanaconde. Además, de acuerdo a la evaluación en campo de su longitud y las dimensiones de su escarpe acumulado, muestran que esta estructura es capaz de generar sismos con magnitudes superiores a la registrada en este último evento sísmico.

## **6.2 Movimientos en masa**

El sismo del 16 de marzo, el sismo de octubre del año 2021 así como otros movimientos sísmicos en esta zona del país han demostrado ser importantes desencadenantes de procesos geológicos asociados, tales como los deslizamientos, caídas de rocas y derrumbes.

Estos movimientos en masa actúan como efectos inmediatos del sismo en la mayoría de los casos, sin embargo, es posible que otros deslizamientos en el valle del Colca sean efectos a largo plazo de los movimientos sísmicos, ya que los sismos debilitan el terreno y generan grietas y fracturas que con aprovechadas por la escorrentia superficial y las precipitaciones pluviales.

Las zonas más afectadas por movimientos en masa originados por los sismos son la carretera Achoma-Cabanaconde y los deslizamientos activos de Maca y Madrigal.

## **7. ANALISIS NEOTECTÓNICO**

El sismo del 16 de marzo del presente año, con epicentro ubicado al suroeste de Maca, ha tenido una magnitud de 5.5 (Fuente: IGP) y una profundidad de ~12 km. La falla responsable de este evento sísmico es la falla activa Pungo-Hornillo, la cual presenta una longitud de ruptura de aproximadamente 4 km. Las réplicas del sismo principal ocurrieron durante los próximos días, mostrándose como un enjambre sísmico en la zona sur de Pinchollo con magnitud inferiores a 4.5 (Figura 9).

Nuestros análisis en campo y con el apoyo de sensores remotos nos permiten interpretar que la falla normal Pungo-Hornillo con buzamiento al norte es una estructura principal, a la cual se anexan en sentido contrario, a manera de fallas antitéticas, las estructuras Solarpampa-Puye Puye-Pillo y Chachas-Cabanaconde-Patapampa identificadas y descritas por Benavente et al. (2017) (Figura 10).

Es necesario precisar que el sismo de 5.5 Mw de octubre del 2021 también está asociado a la falla Pungo-Hornillo. Durante nuestros trabajos de campo se identificaron 'jumping stones', efectos co-sismicos que resultan del brusco sacudimiento del desplazamiento vertical de la falla, generando que los bloques

de rocas se desplacen lateralmente de su lugar de descanso original, rodando o deslizándose en la mayoría de los casos.

Hemos determinado que estos 'jumping stones' pueden ser relacionados con el sismo de octubre del 2021 debido a que en la mayoría de los casos vienen creciendo algunas plantas locales (Fotos 9 y 10), en cambio la ruptura superficial identificada a lo largo de la falla Pungo-Hornillos se encuentra fresca, es decir no se observa aún el desarrollo de plantas locales en el escarpe ni en las grietas en el suelo.

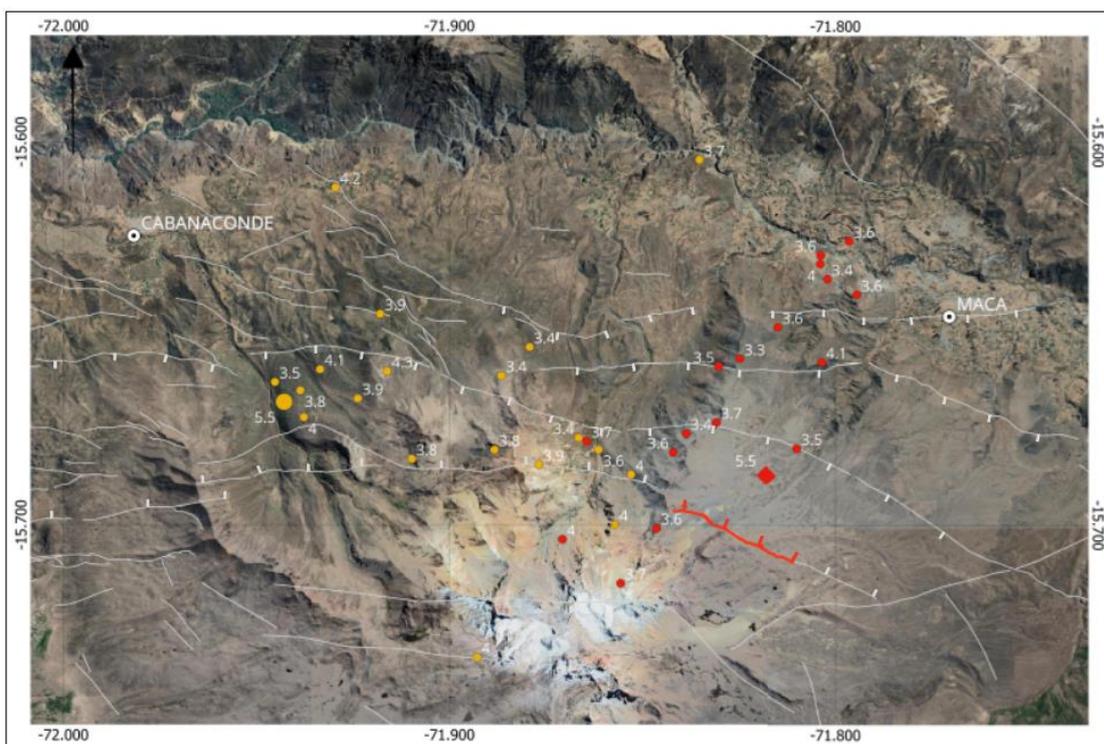


Figura 9. Imagen satelital con los sismos registrados entre el 16 y 18 de marzo del presente año en color rojo y sismos del 8 al 10 de octubre del año 2021 en color naranja. Sistema de fallas del Colca (líneas blancas) donde resalta la zona de ruptura de la falla Pungo-Hornillo (línea roja).



Foto 9. Bloque desplazado (jumping stone) de ~2m de diámetro.



Foto 10. Bloque desplazado (jumping stone) de ~2m de diámetro.

Por último, en base a las observaciones de campo y el análisis de los modelos de elevación digital y ortofotos de alta resolución obtenido con fotografías de drone podemos interpretar que la falla Pungo-Hornillo es una falla normal con importante componente sinistral, capaz de generar sismos de mayor magnitud que el sismo del 16 de marzo.

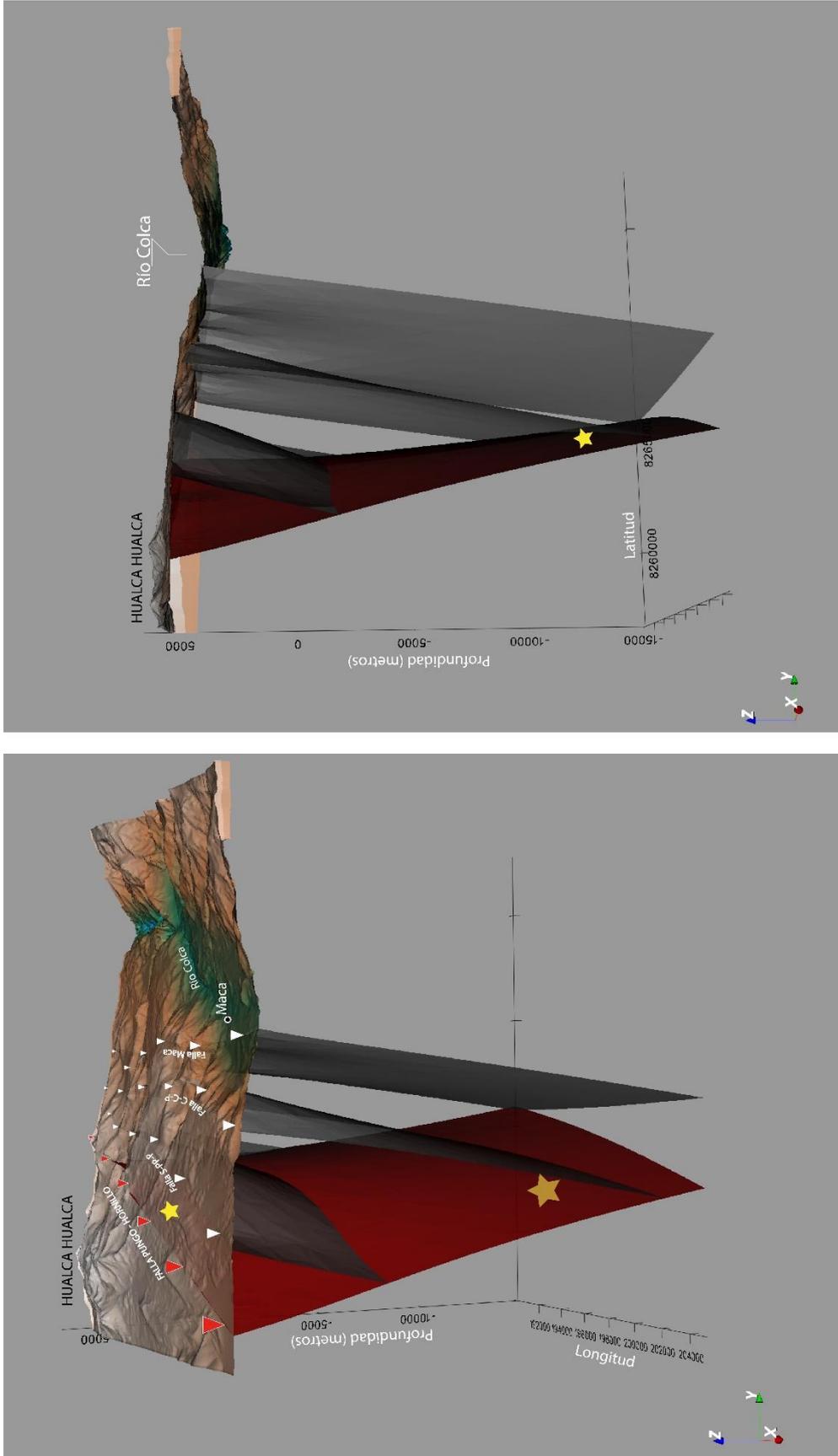


Figura 10. Modelo 3D (perspectiva y perfil) del flanco noreste del volcán Hualca Hualca donde se observa el modelo geológico de la distribución de las fallas Pungo Hornillos, Solarpampa-Puye Puye-Pillo (S-PP-P) y Chachas-Cabanaconde-Patapampa (C-C-P). Así mismo, se observa la ubicación del sismo de marzo en estrella amarilla y su proyección en profundidad (12km).

## CONCLUSIONES

- a) El sismo de magnitud 5.5 Mw con epicentro al sur de Maca, generó una ruptura a lo largo de aproximadamente 4km, evidenciando la reactivación de la falla activa Pungo-Hornillo.
- b) El desplazamiento vertical de la falla Pungo-Honillo varia entre 4 y 40 cm.
- c) El sismo generó derrumbes y caída de rocas en la carretera Achoma-Cabanaconde, identificándose un total de 62 zonas con estos fenómenos.
- d) Del mismo modo el sismo generó licuación de suelos en el trazo de falla en la zona de la quebrada Jato.
- e) El lugar más afectado por el movimiento sísmico fue Maca, el poblado se encuentra emplazado sobre un deslizamiento activo.
- f) La tendencia de los efectos estructurales identificados en Maca nos muestra una orientación N60, lo cual coincide con la ubicación del epicentro y la dirección de la llegada de la onda sísmica.
- g) Se identificó 'Jumping stones', sin embargo, la vegetación que se viene desarrollando en las cavidades abandonadas por el desplazamiento de los bloques nos permiten interpretar que estos fenómenos pueden estar relacionados a un evento sísmico anterior, posiblemente al sismo del 9 de octubre del 2021.

## RECOMENDACIONES

- a) Realizar más estudios de neotectónica y paleosismología en el sistema de fallas del Colca, para conocer el potencial sismogénico de la falla Pungo Hornillos y otras estructuras generadoras de sismos.
- b) Priorizar la construcción de viviendas de material noble en áreas que no presenten problemas de geodinámica externa.

## REFERENCIAS

- Alcalá, J., Palacios Estremera, D.; Zamorano Orozco, J.; Vázquez-Selem, L. (2011). Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, ISSN 0214-1744, Vol. 25, N°. 1-2, 2011, págs. 121-136
- 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 p., 1 mapa.
- Benavides, V. (1962) - Estratigrafía Pre-terciaria de la región de Arequipa. En: Congreso Nacional de Geología, 2, Lima, 1960. Boletín Sociedad Geológica del Perú, (38):5-63.
- Delacour, A.; Gerbe, M.-C.; Thouret, J.-C.; Wörner, G. & Paquereau, P. (2007) - Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes. Bulletin of Volcanology, 69(6): 581-608.
- Jenks, W.F. (1948) - Geología de la hoja de Arequipa al 200,000. Geology of the Arequipa Quadrangle of the Carta Nacional del Peru. Instituto Geológico del Perú, Boletín 9, 204 p.
- Kaneoka, I. & Guevara, C. (1984) - K-Ar age determinations of late Tertiary and Quaternary Andean volcanic rocks, southern Peru. Geochemical Journal, 18(5): 233-239.
- Thouret, J.C.; Wörner, G.; Gunnell, Y.; Singer, B.S., Zhang, X., & Souriot, T. (2007) - Geochronologic and stratigraphic constraints on canyon incision and Miocene uplift of the Central Andes in Peru. Earth and Planetary Science.
- Zavala, B. et al (2012). Evaluación de la seguridad física del distrito de Maca. Informe Técnico N° A6628. INGEMMET - IRD

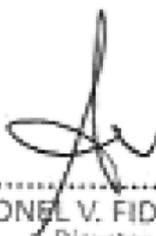


---

Ing. Briant García Fernández Baca

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico

INGEMMET



---

Ing. LIONEL V. FIDEL SMOLL  
Director  
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico  
INGEMMET