

CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS SÍSMICOS Y GRAVITACIONAL SOBRE EL DESLIZAMIENTO DE MACA (COLCA)

Pascal LACROIX¹, Marc WATHELET¹, Jersy MARINO², Edu TAIPE², Lucille TATARD¹, Bertrand GUILLIER¹, Francis BONDOUX¹, Bilberto ZAVALA², Patricio VALDERRAMA², Lionel FIDEL², Juan-Carlos GOMEZ³, Edmundo NORABUENA³

¹ IRD, Ca. Teruel, Miraflores, LIMA

² INGEMMET, Av. Canadá, San Borja, LIMA

³ IGP, Ca. Badajoz, Ate, LIMA

1. RESUMEN

El deslizamiento de Maca está ubicado en el poblado del mismo nombre, a orillas del río Colca en la región Arequipa al sur de Perú. En 1991, un sismo superficial (mb 5.4), con epicentro localizado a 8 km de la zona de estudio, reactivó el deslizamiento, provocando un hundimiento de la carretera, y causó la destrucción del sector oeste del pueblo. Los objetivos del estudio son evaluar los riesgos sísmicos y gravitacionales en el sector de Maca y alrededores. Para ello, se estudiará la respuesta del deslizamiento a los sismos y la interacción onda / estructura, para movimientos sísmicos moderados a fuertes. En este estudio presentamos medidas geodésicas y geofísicas que permitirán caracterizar el subsuelo y la cinemática del deslizamiento, mostrando las diferencias entre los sectores oeste y este. Especialmente, el subsuelo en la parte oeste del pueblo está conformado por material bien consolidado y saturado de agua. Las mediciones sugieren la influencia del subsuelo sobre los procesos sísmicos que sucedieron en 1991. Referente a la cinemática, los resultados de mediciones GPS muestran la influencia de la circulación del agua en la dinámica del deslizamiento, con desplazamientos en la parte oeste de 0.60 m/mes durante la época de lluvia, y de menos de 0.05 m/mes en época seca. La unión de las medidas geofísicas y geodésicas sugiere que la presencia de agua y del sismo es el origen del gran desplazamiento del deslizamiento durante el sismo de julio 1991, justo después la época de la lluvia.

2. INTRODUCCIÓN

El deslizamiento de Maca está ubicado en la valle del Colca a 70 km al norte de Arequipa. Es un deslizamiento antiguo, de tipo rotacional que afecta directamente al pueblo de Maca (600 habitantes), a la carretera usada por el turismo (160 000 visitantes en 2009), y a los andenes pre-incas [Fidel y Zavala, 1994].

El 23 Julio 1991, un sismo superficial (5.4 mb), localizado a 8 km al Sur de la zona de estudio [Antayhua et al., 2002], reactivó el deslizamiento, provocando un hundimiento de cerca de 8 m de la carretera que une Maca con Cabanaconde. Este sismo también causó la destrucción del sector oeste del pueblo y la muerte de 14 personas. La población afectada fue reubicada en el sitio denominado Maca “nuevo” ubicado al este del pueblo, sin embargo, con el paso del tiempo los habitantes están retomando poco a poco la posesión de sus antiguas viviendas. Por otro lado, en respuesta a este sismo, la aparición de bofedales sobre el sitio muestra la importancia de la circulación del agua sobre la dinámica del deslizamiento. Otros sismos (particularmente 1992 y 2001), también causaron sacudidas fuertes sobre el sitio acompañadas por un desplazamiento del deslizamiento.

El sitio de Maca presenta una sensibilidad fuerte a los sismos, con un efecto de sitio bien marcado, como lo muestra la distribución de daños asociados con el sismo de 1991. La frecuencia de los sismos regionales está relacionada a la actividad volcánica próxima, a fallas tectónicas regionales (sismos superficiales de 1991, 1992, 1998), así como, a la subducción situada a 200 km del sitio [Dorbath et al., 1990]. La energía acumulada desde el sismo de 1868 (Mw 8.8) en la zona norte-Chile y sur-Perú puede producir un sismo de magnitud Mw 8.1-8.4 [Chlieh et al., 2011].

Los objetivos a mediano plazo son (1) caracterizar el subsuelo y la cinemática del deslizamiento, con el fin de comprender las diferencias de comportamiento del suelo al este y al oeste del pueblo durante el sismo de 1991, (2) estudiar la posible influencia de la estructura del suelo sobre los procesos gravitacionales que se desarrollan actualmente en Maca.

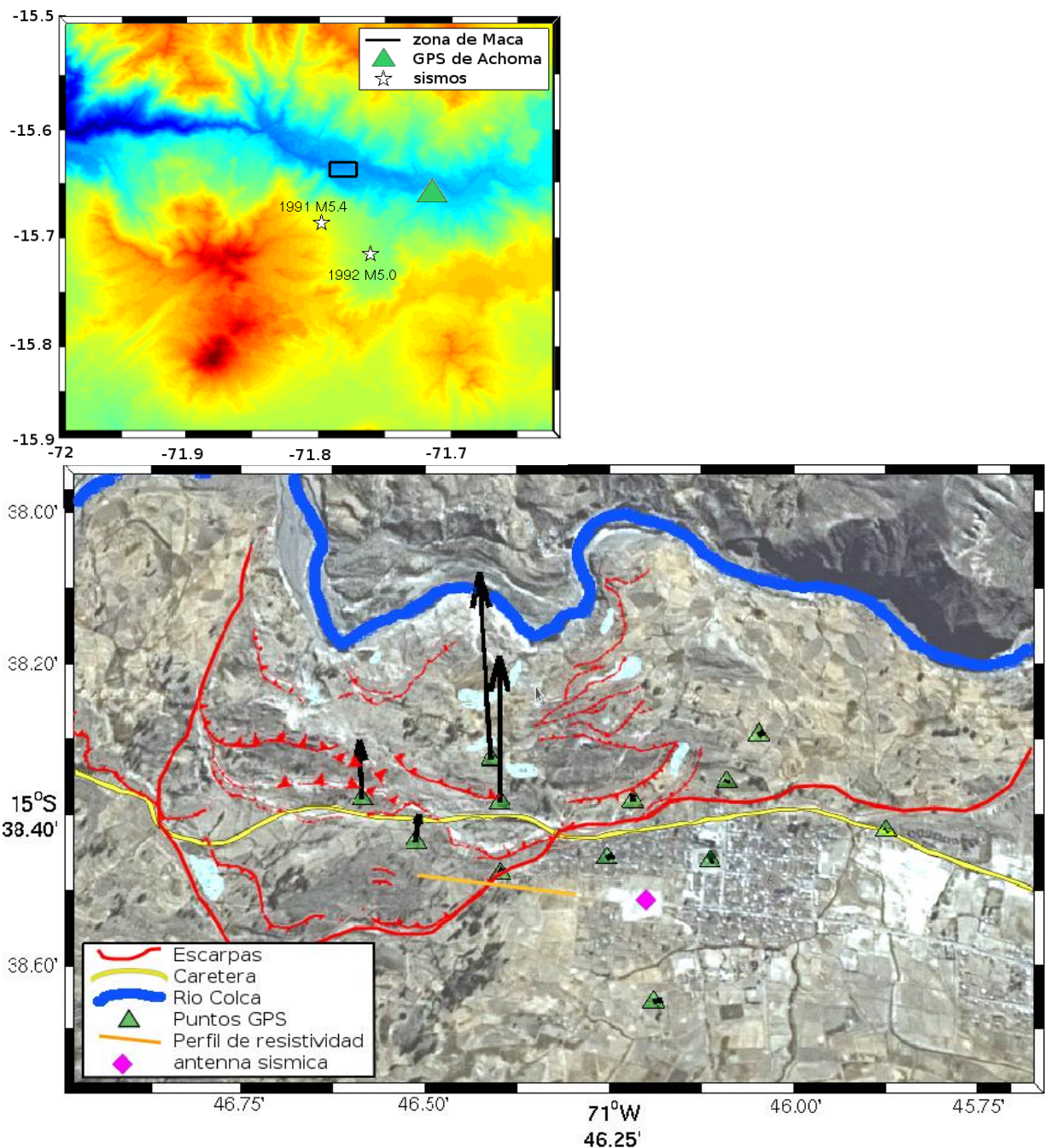


Figura 1. Arriba: localización del área de estudio, en el valle del Colca, al pie del volcán Hualca-Hualca, y de los 2 principales sismos destructores de 1991 y 1992. Abajo: imagen satélite del sitio de Maca con las principales medidas mostradas en este estudio. Las flechas representan el desplazamiento entre diciembre 2011 y abril 2012 (movimiento máximo: 2.5m).

3. MEDIDAS

Un primer estudio geológico fue efectuado en Setiembre 2010 por el INGEMMET [Mariño *et al.*, 2011]. La geología de la zona está formada por una secuencia de cuarcitas en la base, cubiertas por flujos de lava del volcán Hualca Hualca. Por otro lado, un depósito de avalancha de escombros, que probablemente data del Plio-Pleistoceno, se encuentra cubriendo el sustrato volcano-sedimentario. Este evento provocó el represamiento de una parte del valle, que originó la creación de un lago ahora desaparecido. Como resultado de este proceso, la mitad este de la zona, se encuentra cubierta por depósitos lacustres y diatomitas. Las estructuras principales del deslizamiento (escarpes, “ridges”, etc.) fueron mapeadas, poniendo énfasis en la complejidad del movimiento en la parte oeste (Figura 1).

Entre noviembre 2011 y abril 2012, se realizaron dos tipos de medidas: (1) varias medidas

geofísicas (ruido sísmico de fondo antena y H/V, resistividad, sísmica); y (2) medidas geodésicas GPS (Figura 1).

3.1. MEDIDAS GEOFÍSICAS

Las medidas geofísicas realizadas incluyen:

- (1) Un total de 74 medidas de ruido sísmico (H/V) en diferentes partes del pueblo de Maca y de alrededores, usando una estación de 3 componentes CitysharkII. Las relaciones espectrales de los componentes horizontales y verticales fueron calculadas con el software “Geopsy” [<http://www.geopsy.org/>].
- (2) Una antena sísmica de 7 sensores verticales fue instalada en círculo con un diámetro de 40m por 2 horas en la parte oeste del pueblo (Figura 1). La velocidad de las ondas S (V_s) fueron invertidas sobre un perfil vertical usando el ruido sísmico, mediante procesamientos FK y SPAC [Wathelet *et al.*, 2008]. El ratio H/V fue también calculado (Figura 2).
- (3) 5 perfiles de resistividad en varias partes del sitio (Figura 1 y 3) usando un Terrameter con 64 electrodos. Todos los perfiles fueron ubicados en el pueblo, salvo uno que cruza también la avalancha de escombros (Figura 3).
- (4) 7 perfiles de sísmicos MASW de 70m de largo, que permitieron obtener velocidades de las ondas S en varias partes del área de estudio: en las diatomitas, en la avalancha de escombros, en Maca este y oeste.

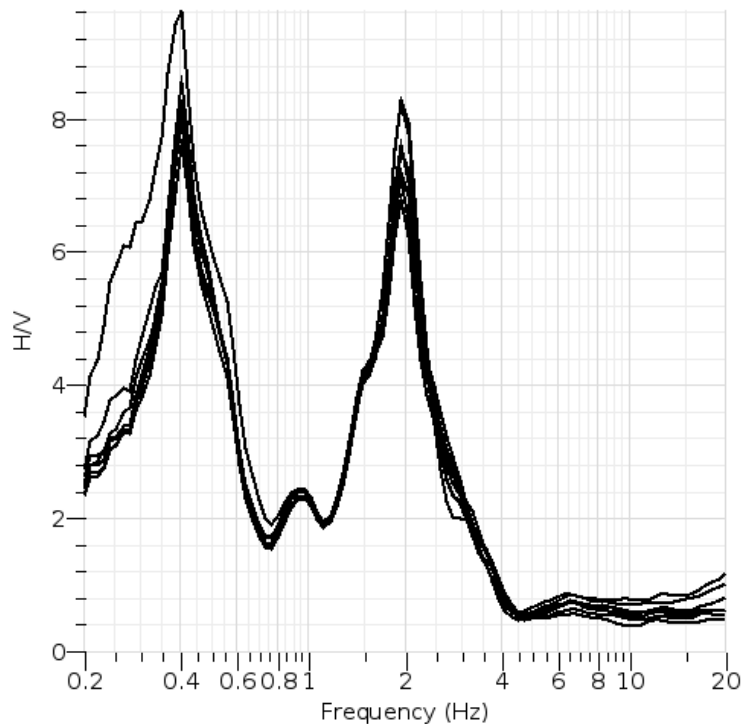


Figura 2. Relaciones de las componentes horizontales y verticales (H/V) procesando por los 7 sensores de la antena sísmica.

3.3. MEDIDAS GEODÉSICAS

Un estudio geodésico realizado entre 2000 y 2001 por el IGP muestra desplazamientos del orden de 50 cm por año [Gomez *et al.*, 2005]. Estas medidas se limitaron únicamente a una zona pequeña, y por lo tanto, no reflejan la variabilidad espacial de los desplazamientos de todo el

deslizamiento.

Por eso, un total de 13 hitos fueron instalados (Figura 1), incluido uno al exterior del deslizamiento en la comunidad de Achoma a 7 km del deslizamiento (Figura 1), ubicada en una zona aparentemente estable. Estos hitos fueron fijados en roca, y cada punto fue medido 3 veces en noviembre 2011 (02/11-06/11), diciembre 2011 (08/12-12/12), y abril 2012 (01/04-05/04). Las mediciones se realizaron durante un periodo de 2 horas, utilizando un GPS bi-frecuencia, salvo el punto de Achoma que fue medido durante por toda la duración de las campañas temporales (al menos 4 días). La posición de los puntos fueron calculados en modo absoluto con el método PPP [Zumberge *et al.*, 1997] con una precisión de 4 cm. Los 3 campos de medidas permiten calcular 2 desplazamientos característicos en la época seca (entre el 2 de noviembre y el 12 diciembre 2011), con una precipitación de 10 mm que fue medida por la estación meteorología de Chivay¹, y de la época de la lluvia (530 mm de lluvia entre diciembre 2011 y abril 2012).

4. INTERPRETACIÓN

Los resultados geofísicos preliminares muestran una gran heterogeneidad de respuestas del suelo, con una diferencia bien marcada entre el este y el oeste del pueblo, en las curvas H/V y en los perfiles de resistividad y sísmica. Al oeste, el perfil de resistividad muestra la existencia, debajo del pueblo, de una capa superior de poca resistividad de 8 m de espesor (Figura 3). En esta parte las curvas H/V (Figura 2) y el perfil vertical de Vs muestra 3 capas: la capa superior de 8 m con Vs muy baja (70m/s), una capa de 200 m con Vs de 350 m/s. y una parte profunda más estable. Las medidas sísmicas sobre silts o diatomitas que afloran en el pueblo muestran también Vs muy baja (60-70m/s). Entonces, la capa superior de 8 m son seguramente diatomitas saturadas de agua. En comparación con los perfiles de resistividad y sísmica conseguido en la parte este de Maca, podemos ver que el suelo no está formado del mismo material en Maca este con velocidad de las ondas S más alta.

Los desplazamientos medidos en el pueblo son de menos de 5 cm, dentro del margen de error del cálculo GPS. Entonces se necesita nuevas medidas cubriendo una época más larga, o nuevos procesamientos de los datos usando GAMIT, para saber si el pueblo está ubicado en una parte estable o no. Sin embargo, podemos notar que los grandes desplazamientos ocurren sobre los depósitos de avalancha de escombros, que no afloran en el pueblo.

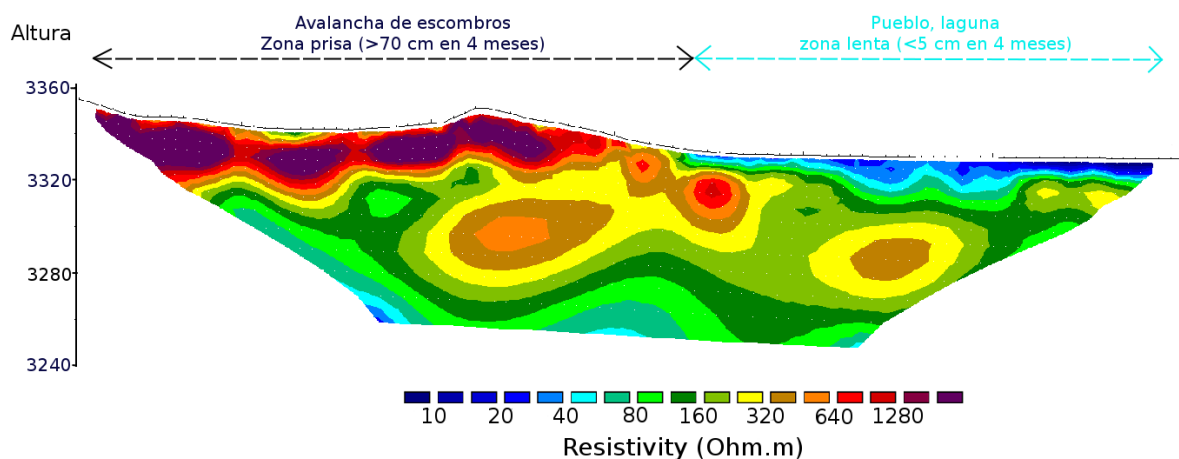


Figura 3. Perfil de resistividad que corta la parte oeste del pueblo y la avalancha de escombros (Figura 1). La avalancha de escombros tiene un desplazamiento fuerte (entre 70 cm y 2m50 por la época de la lluvia).

Al oeste del Pueblo, sobre la avalancha de escombros, el perfil de resistividad muestra un suelo menos conductor (Figura 3) sobre 40-50 m entrecortado por las escarpas. El perfil muestra también que los escombros se emplazaron sobre un material más conductor. Esta capa más profunda, parece similar a la ubicada debajo del pueblo y debajo de la avalancha de escombros. Sin embargo, el

1 <http://www.senamhi.gob.pe/>

desplazamiento en el pueblo es mucho menor (5 cm en 4 meses) que sobre la avalancha de escombros (entre 70 cm y 2.5 m en 4 meses). Esto sugiere que la avalancha de escombros fluye sobre la capa más profunda. La parte de la avalancha que se mueve más (2.50 m en 4 meses, Figura 1) está ubicada al nivel y abajo la carretera hundida por el sismo de 1991. Cabe notar que esta parte está directamente ubicada sobre un meandro del río Colca. Asimismo, la otra parte de la carretera hundida durante el sismo está también ubicada sobre un segundo meandro. Esto también sugiere la influencia de la erosión del río en los procesos gravitacionales.

Las medidas GPS en diferentes épocas muestran una gran sensibilidad de la dinámica del deslizamiento al agua en el sector oeste del sitio. Por ejemplo, en el sector que se mueve más, la velocidad es de menos de 5 cm/mes en época seca, contra más de 60 cm/mes en época de la lluvia. Sin embargo, estos 60 cm son mucho menos que los 8 metros registrados durante el sismo de 1991, que sucedió en julio de ese año, justo después la época de la lluvia. El impacto de una sacudida fuerte por un sismo en un suelo inconsolidado y saturado de agua puede generar efectos de licuefacción [Seed & Idriss, 1966]. Nuestros resultados sugieren que el agua subterránea desempeña un papel en los efectos del sismo de 1991.

5. CONCLUSIONES

Este estudio de campo permitió iniciar las medidas geofísicas y geodésicas en el sector de Maca. Estas medidas muestran diferencias en el subsuelo entre el sector este y el oeste del pueblo, con un subsuelo mal consolidado al oeste. Este tipo de material puede generar una ampliación de las ondas sísmicas. Además, los métodos geofísicos muestran un suelo con una gran porosidad y lleno de agua, que pueden interactuar con las ondas sísmicas para generar un efecto de licuefacción. Estos dos efectos pueden ser el origen de la diferencia de comportamiento entre los sectores este y el oeste del pueblo, observados durante el sismo de 1991, y afectar fuertemente los procesos gravitacionales que ocurren sobre el deslizamiento. La zona de Maca presenta un interés científico importante para el estudio de los efectos de sitio y el impacto de los sismos sobre la dinámica de los deslizamientos. Trabajos futuros deben permitir monitorear la sismicidad y la cinemática del deslizamiento, para estudiar las respuestas del deslizamiento a los sismos.

6. REFERENCIAS

- Antayhua, Y., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H. & Aguilar, V. (2002). Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998) región del Volcán Sabancaya (Arequipa). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, V. 93, 63-71.0
- Chlieh, M., H. Perfettini, H. Tavera, J.-P. Avouac, D. Remy, J.-M. Nocquet, F. Rolandone, F. Bondoux, G. Gabalda, and S. Bonvalot (2011), Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166.
- Dorbath L., A. Cisternas, C. Dorbath (1990), Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, *BSSA*, 80 (3), 551-576.
- Fidel L. y Zavala B. (1994) Estudio Geodinámico de la cuenca del río Camaná-Majes (Colca), departamento de Arequipa. *Dirección de Geotecnia, INGEMMET, Bol No. 14, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica. Lima, Perú.*
- Gomez J.C., D. Huaman, E. Norabuena & L. Ocola (2005), Monitoreo geodesico de deslizamientos activos en el sector medio valle del río Colca, region Arequipa, *CONCYTEC-IGP, Lima, Perú.*
- Mariño J. (2012). Cartografiado geológico a escala 1/2500 del valle del Colca. *Inf. Int. INGEMMET*, 25 p.
- Seed, H.B. & I.M. Idriss (1966), An analysis of soil liquefaction in the Niigata earthquake, *Berkeley Pub.*, 101-228-852
- Wathelet, M., D. Jongmans, M. Ohrnberger, and S. Bonnefoy-Claudet (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over V_s inversion. *Journal of Seismology*, 12, 1-19
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. & Webb, F. H. (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J Geophys Res* 102:B3, 5005–5017.