

# **EFFECTOS GEOLOGICOS ASOCIADOS AL SISMO DE 7.9 Mw, EN PISCO, PERU**

Bilberto Zavala<sup>1</sup>, Patricio Valderrama<sup>1</sup>, Carlos Costa<sup>2</sup> & Reginald Hermanns<sup>3</sup>

1: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Perú. bzavala@ingemmet.gob.pe

2: Universidad Nacional de San Luis, Argentina

3: Norges geologiske undersøkelse (NGU)

## **INTRODUCCION**

Por sus características geológicas y sísmicas, el Perú históricamente ha sido afectado por eventos sísmicos de magnitud importante en los últimos 500 años. Históricamente la Región Ica ubicada al sur de la capital, Lima, ha sido afectada por los sismos del 12 de mayo de 1664 y 29 de septiembre de 1946 (Sigaldo, 1978). El 15 de agosto del 2007 las ciudades de Pisco, Ica, Chincha y Cañete, ubicadas entre 140 y 300 km de la capital, fueron sacudidas por un sismo de magnitud 7,9 (Mw), originando 519 muertes y afectando 655 679 viviendas. Procesos geológicos co-sísmicos responsables de los daños principales, ocurrieron en un radio de 200 km del epicentro.

Profesionales del Servicio Geológico Peruano (INGEMMET), con participación de expertos patrocinados por el PMA:GCA, efectuaron estudios en las áreas afectadas por el sismo, evaluando los procesos geológicos. Se reconocieron deformaciones superficiales en las zonas costeras, movimientos en masa en los taludes de corte de carretera y reacomodo en algunos antiguos depósitos de deslizamientos.

## **CONTEXTO GEOLOGICO**

En el área afloran rocas con edades del Precámbrico al reciente. Las zonas más afectadas se localizan donde afloran limolitas, lutitas, areniscas y niveles bentoníticos Eoceno-Oligocenos (Formación Paracas); diatomitas, limonitas con niveles tufáceos y areniscas del Mio-Plioceno (Formación Pisco); conglomerados y areniscas pliocuaternarias (Formaciones Cañete /Topara); depósitos aluviales, coluviales, eólicos y sedimentos marinos recientes en menor porcentaje. Las localidades costeras se asientan sobre depósitos aluviales (Chincha, Cañete), marinos (Paracas, Tambo de Mora), Formación Topara/Cañete (Sunampe), Formaciones Pisco y Paracas (Pisco y San Clemente). Estructuralmente se diferencian zonas de fallamiento en bloques, en la Bahía de Paracas y oeste de Ica (Fernandez, M., 1993), y de un plegamiento leve (flexura de Pisco). En la zona litoral el sistema de fallas (NNE-SSO) controlan la orientación de la costa; fallas longitudinales paralelas a la costa y fallas transversales interrumpen secuencias estratigráficas y desplazan cuerpos del Batolito de la Costa en el lado norte. Si bien existen varias estructuras cuaternarias, no hay evidencias de actividad holocénica o su asociación con sismos conocidos.

## **PROCESOS GEOLÓGICOS CO-SÍSMICOS Y POST-SÍSMICOS ASOCIADOS**

Como resultado del sismo se generaron procesos co-sísmicos dentro de los cuales destacan deformaciones superficiales en el terreno principalmente en las zonas costeras, incentivación de movimientos en masa en los taludes de corte de carretera y reacomodo en algunos depósitos antiguos de deslizamientos. Posterior al evento sísmico principal, se produjeron principalmente tsunamis a lo largo de la costa. Las réplicas del sismo a su vez generaron mayores procesos de movimientos en masa, agrietamientos del terreno, etc.

## DEFORMACIONES SUPERFICIALES

Las deformaciones superficiales originadas por los sismos del 15 de agosto (Costa & Valderrama, 2007), se encuentran distribuidas en las zona litoral, planicie costanera y valles inferiores de los ríos Pisco, San Juan (Chincha Baja, Tambo de Mora), y Cañete (Quilmaná, San Luis).

Las deformaciones cosísmicas están concentradas al pie de la escarpa/acantilado de 30 m de desnivel promedio, desarrollada sobre areniscas, pelitas y diatomeas, las cuales terminan con conglomerados de edad Pleistocénica. En la zona entre el Penal de Tambo de Mora, la carretera Panamericana Sur y ascenso a Sunampe, las deformaciones están asociadas a expansión lateral (lateral spreading), con efectos de borde libre debido a la escarpa topográfica principal, Figura 1. Considerando el basculamiento observado en las escarpas asociadas a geometrías *roll-over* y la apertura de las grietas, la extensión azocada con estos hundimientos es muy significativa lo cual implicaría una falla normal de ángulo muy bajo y/o superficie de despegue muy somera.

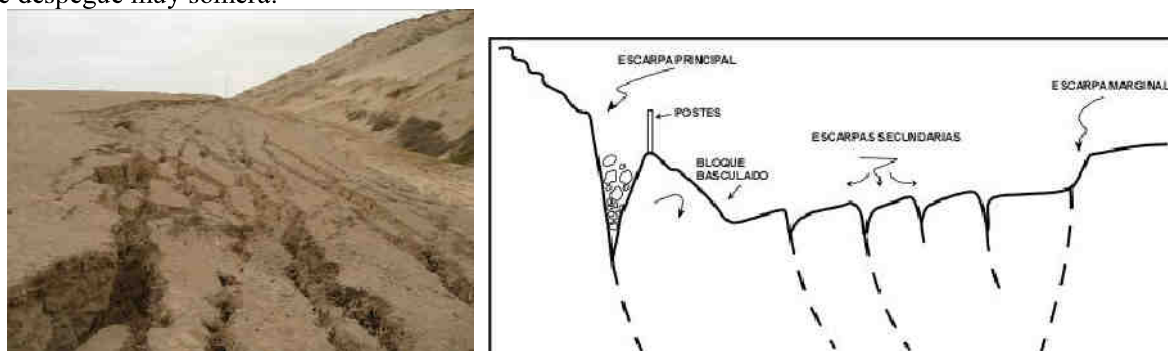


Figura 1: Imagen y Perfil esquemático de la deformación superficial por lateral spreading, en la zona de Tambo de Mora, Chincha Baja.

En el acceso hacia Pisco, 150 m al oeste del cruce con la carretera Panamericana Sur se reconoce un tren de escarpas secundarias y grietas con resaltos centimétricos, orientación general  $150^\circ$ . Las estructuras observadas corresponden a disrupciones de la fábrica original de los sedimentos ocasionadas por licuefacción. Fuera de las áreas urbanas se reconocieron deformaciones superficiales cerca al litoral entre Pisco y Chincha Baja (La Hoyada y Polvareda-Santa Cruz, Pampa Camacho, San Martín y Callejón), y en zonas alejadas de Pisco (Irrigación Cabeza de Toro, Toscana, Chongos, Manrique, Cuchilla Vieja, San Juan de Córdor, Monte fuerte), hasta zonas muchas más alejadas en el valle de Quilmaná / Cañete (sectores La Quebrada, Compradores, Cantagallo). Estas áreas muestran deformaciones asociadas a procesos de licuación en terrenos aluviales, con nivel freático muy superficial relacionados con humedales.

## MOVIMIENTOS EN MASA

Los movimientos en masa, constituyen procesos geológicos que mas comúnmente son detonados cuando ocurre un sismo. Se distribuyeron en: a) Acantilados costeros de la Reserva Nacional de Paracas (RNP), sobre secuencias sedimentarias marinas de la Formación Paracas; b) Taludes en las carreteras de penetración a la sierra desde las localidades de Cañete, Chincha, Pisco e Ica; c) Laderas naturales medias y superiores de montañas con moderada a fuerte pendiente, caras libres de terrazas aluviales d) Acantilados costeros entre Chincha y Cañete, en sedimentos de las Formaciones Cañete / Topará y en depósitos eólicos (Zavala et al, 2007).

En la ***Reserva Nacional de Paracas***, de acuerdo a su tipología se diferencian en: Caída de rocas y detritos, derrumbes de detritos, deslizamientos (rotacional o traslacional) y avalanchas de Rocas. Los volúmenes de material removido se calculan en  $14\ 750\ m^3$ . Colapsos de material rocoso se produjeron en zonas con

intenso fracturamiento en los estratos, en donde las discontinuidades de las rocas, el grado de fisilidad de las lutitas favorecieron estos procesos (Figura 2). Estos procesos son muy comunes y normalmente se asocian a las caídas de rocas y deslizamientos, en los sectores entre playa Yumaque-Punta del Cielo, La Catedral, Los Frayles y Puente. Caídas de rocas de tamaños variables con diámetros que varían entre 1.5 a 2.5 metros como máximo. Los volúmenes son variados siendo mayores entre Yumaque-Punta del Cielo-La Catedral-Puente, alcanzando valores entre 2 hasta 10 m<sup>3</sup>. Deslizamientos de tipo rotacional, o traslacional, favorecidos por los sistemas de fracturas en cuñas y planares pre-existentes. En la carretera que accede a la playa La Mina se observa un deslizamiento rotacional con una longitud de 200 m y con un desnivel entre escarpa y pie de 18 a 20 m; presentando saltos de terreno entre 0,70 a 0,95 m, aberturas entre 0,60 a 1,03 m y profundidades entre 2,30 y 5,50 m. Para el segundo caso se tienen muchos ejemplos de estos procesos entre Punta del Cielo y La Catedral. Cuñas inestables se distinguen en el sector de Mirador de Lobos 2 y 3 con escarpas con inferiores a 1 m, y volúmenes del orden de 15 a 25 m<sup>3</sup> aproximadamente.



Figura 2: Ejemplos de deslizamientos, agrietamientos, derrumbes, cuñas y caída de rocas en los acantilados de la Reserva Nacional de Paracas.

En las carreteras de penetración a la sierra desde las cuatro localidades principales afectadas por el sismo (Cañete, Chincha, Pisco e Ica), se produjeron un gran número de caída de rocas, caídas o derrumbes de detritos y deslizamientos, presentándose en forma indistinta sobre rocas intrusivas del Batolito Andino en mayor porcentaje, secuencias rocas volcánico-sedimentarias y sedimentarias en menor porcentaje (Figura 3).



Figura 3: Ejemplos de movimientos en masa detonados por el sismo que afectaron tramos de las carreteras de penetración a la sierra; nótese principalmente caída de rocas y derrumbes.

En las laderas naturales de los valles principales, a diferencia de los tramos de carreteras inventariados, los movimientos en masa se dieron en las laderas superiores de montañas, zonas disectadas o cárcavas y en los bordes libres de terrazas en las márgenes de los ríos. Las ocurrencias, fueron generalmente remociones superficiales de material detrítico en forma de caída de detritos, derrumbes y caídas de rocas. Los deslizamientos activados son muy escasos, pero se dan algunas pequeñas reactivaciones, donde probablemente hay relación entre el tipo de suelo y la presencia de humedad. Los volúmenes acumulados por la remoción de laderas naturales, en las cuencas son aproximadamente los siguientes: Cañete: 240 m<sup>3</sup>, San Juan-Chincha: 275 m<sup>3</sup>, Pisco: 6161 m<sup>3</sup> e Ica: 150 m<sup>3</sup>.

En los Acantilados costeros entre Cañete y Chincha, sobre secuencias sedimentarias poco consolidadas de las Formaciones Cañete y Topara, la morfología de la línea de costa muestra acantilados casi rectos de dirección NO-SE con altitudes 20 hasta más de 150 m. En 53 km de acantilados, se observan depósitos de

movimientos en masa antiguos, probablemente detonados por sismos antiguos de gran magnitud en la región. Las evidencias de movimientos en masa detonados por el sismo, se reducen a caída de detritos y asentamientos con escarpas entre 0.10 a 0.30 metros que pueden ser observados en las cercanías de la carretera Panamericana Sur desde sus bordes superiores. Generalmente la remoción es de material superficial, no cohesivo compuesto por gravas en una matriz arenosa, y cuyos volúmenes de remoción son pequeños a moderados, muy inferiores individualmente a los 10 m<sup>3</sup>.

El volumen acumulado total de remoción alcanzó los 42 425 m<sup>3</sup> de material. Las distancias al epicentro calculadas para los diferentes movimientos en masa, tomando como referencia la ubicación del primer movimiento sísmico oscilaron entre 32 km y 198 km. Los tipos más frecuentes fueron caídas de rocas y derrumbes. Las caídas de detritos, mezcla con caídas de rocas o derrumbes y deslizamientos le siguen en orden de ocurrencia. La combinación de derrumbes y deslizamientos y deslizamientos independientes son los que acumularon mayor volumen de remoción. En función a cinco clases de volumen de material, se distingue un mayor número de eventos con volúmenes entre 10 y 100 m<sup>3</sup>, seguidos de entre 100 y 500 m<sup>3</sup>. Los eventos con volúmenes mayores a 1000 m<sup>3</sup> fueron menores, sin embargo su volumen acumulado fue de 31279 m<sup>3</sup> (Figura 4). En el área existen depósitos antiguos de avalanchas de rocas y deslizamientos de gran dimensión, donde se asientan poblaciones rurales: Laraos, Chocos, Huangascar; Tantará, Ticrapo y Huaytará. Sus dimensiones implican grandes sismos o cambios climáticos importantes. En el pasado reciente con el sacudimiento sísmico, sufrieron un reacomodo generando pequeños asentamientos de terreno, con influencia directa sobre las viviendas que se ubican sobre ellos.

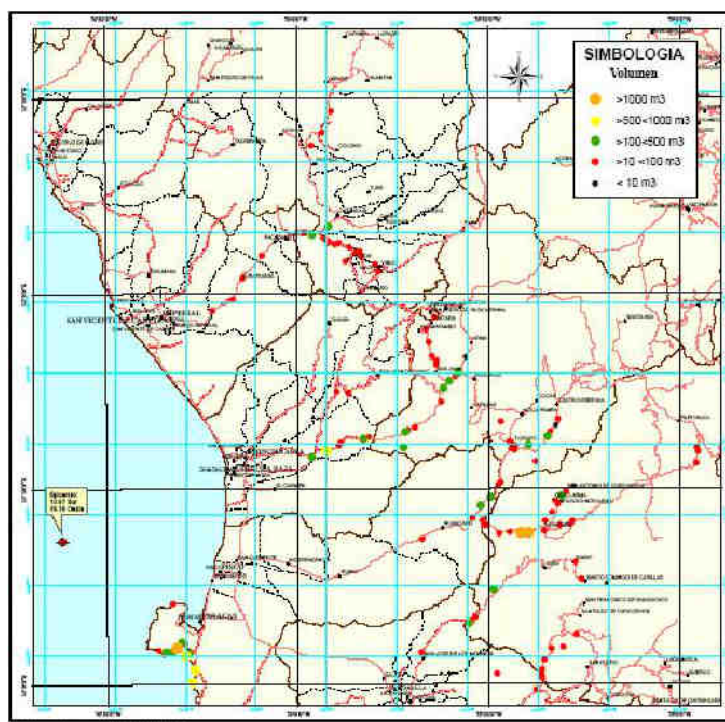


Figura 4: Movimientos en masa detonados por el sismo de Pisco del 15/08/2007.

## TSUNAMIS

A lo largo del litoral entre Ica y Lima, se pudo observar como consecuencia del sismo la presencia de inundación por tsunami, en diferente grado. Cuyos efectos se dieron en función a la morfología del litoral, con mayor impacto en las costas de Pisco y la Reserva Nacional de Paracas (Figura 5). En la RNP, las áreas afectadas de norte a sur las playas de El Carmen (Sector entre El Museo y Garita de Control), playa



Atenas, Lagunillas, Yumaque, Salinas, Mendieta-Playón y Laguna Grande, así como la zona de amortiguamiento (Pisco Playa, Grupo Aéreo N° 5 y Playa Chaco-Paracas. (Zavala, B., 2007). Según versión de los pobladores las olas del tsunami se presentaron en tres oportunidades, llegando alcanzar, en algunos sectores, alturas entre 4 a 6 m, y un run up de hasta 10 m en playa Yumaque (DHN, 2007). Los depósitos de estas tres olas verificaron en el área de inundación de Lagunillas, donde se efectuaron calicatas de exploración.



Figura 5: Huellas de altura de inundación por tsunami y efectos sobre áreas agrícolas y puertos en las localidades de Paracas y Pisco.

## CONCLUSIONES E INTERPRETACIONES

De acuerdo a las características de los daños apreciados en los lugares visitados, se puede indicar entre los principales procesos geológicos asociados al sismo, en orden de mayor afectación:

1. Licuación o licuefacción de suelos en áreas aluviales con nivel freático superficial y/o zonas de humedales y litorales; incluye sedimentos de la Formación Pisco susceptibles a licuación.
2. Tsunamis a lo largo de la costa, en función a la morfología del litoral. Las olas del tsunami alcanzaron en algunos sectores alturas de 4 a 6 m. Sus efectos principales fueron sobre áreas de balnearios e infraestructura de hoteles, áreas pobladas, áreas de cultivo, tramos de carreteras y trochas, muelles o embarcaderos y zonas avícolas. En Playa Chaco (Paracas), fue un ascenso rápido del nivel mar.
3. Fracturamientos, fallas, deslizamientos en cuñas, colapsos o derrumbes y caídas de rocas en secuencias de la Formación Paracas específicamente dentro de los acantilados de la RNP, que afectaron grandemente parte el potencial turístico de la reserva.
4. Movimientos en masa distribuidos en orden de mayor afectación: a) Acantilados costeros de la Reserva Nacional de Paracas; b) Taludes de las carreteras de penetración a la sierra desde las cuatro localidades principales afectadas por el sismo (Cañete, Chincha, Pisco e Ica); c) Laderas naturales, generalmente laderas medias y superiores de montañas que exponen generalmente caídas de detritos; d) Caídas de detritos en los sedimentos plio-cuaternarios de las Formaciones Cañete / Topará en la zona costanera y depósitos eólicos recientes; e) Reactivación de algunos depósitos de movimientos en masa antiguos (Laraos, Chocos, Huangascar, Tantar, Huaytará).

Las dislocaciones o deformaciones superficiales reconocidas no están vinculadas con rupturas primarias o reactivaciones de estructuras preexistentes, sino más bien han resultado de procesos asociados al sacudimiento cosísmico (*ground shaking*); tales como expansión lateral (*lateral spreading*) y licuefacción. Las rupturas observadas en el sector del Penal de Tambo de Mora- Sunampe, corresponden a fenómenos de expansión lateral amplificados por un efecto de borde libre producido por el desnivel topográfico al pie del acantilado. De confirmarse esta hipótesis mediante información de subsuelo, ello implica que el acantilado costero desarrollado en toda esta zona, no solo presenta susceptibilidad a generar deslizamientos e inestabilidades de ladera durante un sismo, sino que además es posible el desarrollo de rupturas y hundimientos importantes al pie del mismo.

En las poblaciones costeras afectadas por el sismo (Pisco, Chincha, Ica y Cañete), es necesario realizar estudios geotécnicos y de microzonificación sísmica, para determinar los parámetros adecuados de construcción.

## REFERENCIAS

- Costa & Valderrama 2007. Deformaciones Superficiales asociadas al sismo de Pisco del 15/08/2007. Informe Interno, INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.
- DHN 2007. Informe Post-Tsunami. Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina (Agosto, 2007).
- Fernández Dávila, M. 1993. Geología de los Cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Córdova. Boletín N° 47, Serie A., Carta Geológica Nacional INGEMMET.
- Silgado E. 1978. Historia de los Sismos más Notables ocurridos en el Perú (1513-1974), Boletín N°3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Instituto de Geología y Minería. Lima, Perú.
- Zavala, B., Valderrama, P. & Antayhua Y. 2007. Procesos geológicos co-sísmicos e instrumentación sísmica efectuada en zonas afectadas el sismo de pisco del 15/08/2007. Informe Interno, INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, Septiembre 2007.
- Zavala, B., Valderrama, P., Costa C. & Hermanns, R. 2007. Movimientos en masa y deformaciones superficiales asociadas al sismo de Pisco del 15/08/2007. Informe Interno, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET, Octubre 2007.
- Zavala B. 2007. Efectos geológicos del sismo de pisco en la Reserva Nacional de Paracas. Informe interno, INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.