



- **ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL SISMO DEL 15 DE AGOSTO EN PISCO**

Manuel A. Olcese Franzero
Jorge Zegarra Pellanne

- **DEFECTOS QUE INCIDIERON EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES DE ALBAÑILERÍA EN EL SISMO DE PISCO DEL 15-08-2007**

Ángel San Bartolomé

- **COMPORTAMIENTO DE LAS VIVIENDAS DE ADOBE REFORZADAS ANTE EL SISMO DE PISCO.**

Daniel Quiun
Angel San Bartolomé
Luis Zegarra
Alberto Giesecke

- **CARACTERIZACIÓN DE DAÑOS, REPARACIÓN Y REFUERZO EN CONSTRUCCIONES DE ADOBE**

Daniel Torrealva Dávila

- **ENSEÑANZAS DEL SISMO DEL 15 DE AGOSTO DE 2007**

Antonio Blanco

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS ANTISISMICAS

El laboratorio de estructuras antisísmicas del departamento de ingeniería, con más de 28 años de experiencia, cuenta con equipo e instalaciones que permiten la ejecución de ensayos estáticos y dinámicos en especímenes a escala natural o reducida. Se dispone de equipo para construcción y traslado de especímenes, montaje de dispositivos, aplicación de carga, medición, adquisición y procesamiento de datos.

En el laboratorio se desarrollan tres tipos de actividades:

- Apoyo a los cursos de Pre-Grado y Maestría.
- Investigación en materiales locales para mejorar su comportamiento sísmico.
- Servicio técnico a la industria de la construcción.

Los ensayos que habitualmente se realizan son:

- I. Ensayos mecánicos: compresión, tracción, flexión, compresión diagonal, corte, impacto, etc. en distintos materiales y elementos estructurales.
- II. Carga horizontal monótonica y cíclica en sistemas y componentes estructurales.
- III. Simulación sísmica en modelos a escala natural y reducida.
- IV. Verificación de equipo de aplicación de carga. Se cuenta con celdas de carga patrón calibradas en el National Standard Testing Laboratory, U.S.A.
- V. Compresión en probetas estándar de concreto.
- VI. Determinación de la calidad del concreto fresco in-situ.
- VII. Determinación de la calidad y uniformidad del concreto endurecido in-situ mediante probetas diamantinas y esclerometría.
- VIII. Evaluación de la capacidad de estructuras mediante pruebas de carga.
- IX. Consultoría en temas de estructuras y de hepatología estructural en general.



Informes

Jefe de Laboratorio: Ing. Gladys Villa García Medina

Teléfono: 626-2000 anexo 4640,

Fax: 629-2089

E-mail: ledi@pucp.edu.pe

PRESENTACIÓN

Grandes terremotos ocurridos en nuestro país, siempre han generado pérdidas de vidas humanas, serios daños materiales incluso de monumentos históricos, redes viales y de la infraestructura industrial de la zona afectada, provocando retrasos en su desarrollo. Sin embargo, estos sismos nos proporcionaron también lecciones que aprender.

El denominado “Sismo de Pisco” ocurrido el 15 de agosto del 2007 no fue la excepción, a pesar que poco antes, en el llamado “Sismo del Sur” del 2001, se había comprobado, por ejemplo, la efectividad de ciertas técnicas de refuerzo aplicadas previamente en viviendas de adobe. Pese a su sencillez y economía, estas técnicas no se aplicaron, excepto en 3 viviendas piloto, y el daño en las viviendas de adobe fue masivo en la zona afectada por el sismo de Pisco, volviéndose a repetir la historia.

De este modo, con el objetivo principal de que se adopte una política preventiva ante los sismos futuros, la Sección Ingeniería Civil del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, difunde en esta edición cinco artículos relacionados al “Sismo de Pisco”, donde los profesores de esta Sección han volcado sus experiencias y conocimientos productos de muchas investigaciones.

Ángel San Bartolomé

Coordinador de Investigaciones

Sección Ingeniería Civil



- **ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL SISMO
DEL 15 DE AGOSTO EN PISCO**

Manuel A. Olcese Franzero
Jorge Zegarra Pellanne

ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL SISMO DEL 15 DE AGOSTO EN PISCO

Manuel A. Olcese Franzero (Profesor Principal PUCP)
Jorge Zegarra Pellanne (Profesor Principal PUCP)

RESUMEN

El sismo del 15 de agosto en Pisco ocasionó daños en viviendas, vías de comunicación, taludes, instalaciones portuarias. En este informe, se presentan diversos problemas geotécnicos encontrados desde Villa (Chorrillos, Departamento de Lima), por el norte, hasta la ciudad de Ica, por el sur. Dado que los mayores daños geotécnicos causados por el sismo se deben al fenómeno de licuación, en algunos casos con desplazamiento lateral, se presentan nueve casos: Villa, las Lagunas de Puerto Viejo, la falla de un talud de 400 m en Jahuay, un gran desplazamiento lateral en Canchamán, la falla de cimentaciones superficiales en Tambo de Mora, el Terminal Marítimo General San Martín (Pisco), fallas observadas en la carretera Panamericana Sur al ingreso de la ciudad de Pisco y la Laguna de Huacachina. También se presentan las fallas en taludes en la carretera Panamericana Sur, en el tramo Lima-Ica (orientada Norte-Sur), y en la Vía Los Libertadores (carretera 024A), que une las ciudades de Pisco y Ayacucho (orientada Oeste-Este).

El presente informe está basado en las visitas realizadas por los autores a la zona afectada por el sismo, que se llevaron a cabo el 16 de agosto, del 20 al 23 y del 27 al 29 de septiembre, y del 25 al 27 de octubre. Adicionalmente, Manuel Olcese y Viviana Moreno, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, fueron parte de una misión de la *Geo-Engineering Earthquake Reconnaissance* (GEER), que con apoyo financiero de la *National Science Foundation* (NSF), recorrió la zona entre el 21 y 25 de agosto. Este viaje de reconocimiento generó un informe preliminar que puede consultarse en Internet¹ y ha sido la base para elaborar el presente artículo. El informe incluye visitas a las ciudades de Lima, Tambo de Mora, Pisco, Paracas e Ica, los caminos que conectan estas ciudades con otros pueblos costeros más pequeños, así como la Vía Los Libertadores, para documentar la extensión de las fallas geotécnicas hacia el interior.

INTRODUCCIÓN

El miércoles 15 de agosto de 2007, a las 6:40 pm, hora local, un sismo de magnitud Mw 8.0 sacudió la región costera del Perú central. El sismo ha sido referido como el sismo de Pisco o el de Ica (Pisco fue la ciudad más afectada, e Ica es el departamento donde las ciudades de Pisco e Ica están localizadas). El sismo causó severos daños a las ciudades de Pisco, Ica, Cañete y Chincha, y fue fuertemente sentido en Lima.

Desde la perspectiva geotécnica, los aspectos más relevantes del sismo de Pisco son los múltiples casos de licuación de suelo observados y el considerable daño que causó en las zonas urbanas y en la infraestructura de transporte. Luego de la sección introductoria, este reporte presenta consideraciones sismológicas, incluyendo una discusión de los registros obtenidos, licuación de suelo junto con sus efectos y deslizamientos de tierra ocurridos a lo largo de las principales carreteras. La información presentada pretende detallar solamente observaciones y datos recolectados durante el reconocimiento realizado. Este reporte no documenta todo los antecedentes recabados por el equipo de GEER; más bien, es un resumen que da luces sobre algunos de los aspectos geotécnicos más importantes del sismo de Pisco.

El sismo de Pisco causó severos daños dentro de su área mesosísmica. De acuerdo con la evaluación del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) del 13 de noviembre de 2007, el sismo causó la muerte de 519 personas y 1,291 heridos; asimismo, el INDECI señala que 48,208 construcciones fueron destruidas, 45,500 declaradas inhabitables y 45,813 afectadas con diversos grados de daño. La mayor parte de los daños y pérdidas humanas ocurrieron en la ciudad de Pisco, donde, según las estimaciones, el 80% de las construcciones colapsaron o fueron seriamente dañadas.

El Instituto Geofísico del Perú reportó intensidades modificadas de Mercalli de VII en las ciudades de Pisco, Chincha y Cañete, de V a VI en Lima, de III en Cuzco y de II en Arequipa (Tavera et al. 2007). Además, el sismo fue sentido en las ciudades de Quito (Ecuador), La Paz (Bolivia) y en Manaus (Brasil), según información del *U.S. Geological Service* (USGS). El sismo generó un tsunami que causó considerables daños en la ciudad de Paracas e inundó porciones de muchas otras ciudades y pueblos a lo largo de la costa.

¹ http://gees.usc.edu/GEER/Peru_2007/Peru_2007_WebPage/index.htm

ASPECTOS SISMOLÓGICOS Y REGISTROS SÍSMICOS

Aspectos sismológicos

El sismo de Pisco del 15 de agosto de 2007 fue resultado del proceso de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana. La convergencia de estas placas provoca una alta sismicidad a lo largo de las costas de Perú y Chile. El sismo de 2007 o “sismo de Pisco” es un evento interplaca que ocurre en la brecha sísmica (*seismic gap*) identificada con anterioridad (Tavera y Bernal, 2005) entre las zonas de ruptura de los eventos de Lima (1974) y Nazca (1996). La magnitud del sismo de Pisco fue de 8.0 (M_w , escala de Momento), de acuerdo con lo reportado por USGS. El hipocentro se localizó a 13.76° de latitud sur y 76.97° de longitud oeste, a una profundidad de 39 km. La ruptura de la falla se propagó de norte a sur desde el hipocentro (Tavera et al. 2007). La solución de Ji y Zeng (2007) para la zona de ruptura sugiere una ruptura de 324° de rumbo y 27° de buzamiento, con dimensiones aproximadas de 190 km de largo y 95 km de ancho (Figura 1). Las ubicaciones de los hipocentros correspondientes a las réplicas coinciden con este plano de ruptura (Tavera et al., 2007). El bajo buzamiento y gran ancho del plano de falla hacen que las ciudades más afectadas por el sismo, Pisco e Ica, estén ubicadas sobre la proyección vertical del plano de falla. La prolongada duración del sismo indica un proceso de ruptura complejo, con una duración aproximada de 210 segundos (Tavera et al. 2007).

Registros sísmicos

El sismo de Pisco fue registrado por 15 instrumentos ubicados a distancias no mayores a 150 km del plano de falla (las distancias fueron calculadas al plano de ruptura obtenido de Ji y Zeng, 2007). La Tabla I muestra los 15 instrumentos que registraron el movimiento junto con información relevante acerca de los parámetros de cada registro. Es importante destacar que todos los registros, con excepción de los obtenidos en Ica, corresponden a instrumentos ubicados al norte del plano de falla, a una distancia aproximada de 100 km, en las cercanías de la ciudad de Lima. Un gráfico de PGA (aceleración máxima del suelo) versus distancia más próxima al plano de falla, incluyendo los 15 registros, se presenta en la Figura 2. Para efectos de referencia, las predicciones de la relación de atenuación de Atkinson y Boore (2003) para suelo y roca se han incluido en la misma figura. En el gráfico, se puede observar que el registro de Ica (Parcona) posee un PGA próximo a 0.5g, lo que supera la predicción para suelo de la relación de atenuación de Atkinson y Boore en más de un 85%, mientras que los PGAs de los registros cercanos a Lima no superaron el percentil 15 de la misma ley de atenuación. El tipo de suelo correspondiente a cada estación se estimó a partir de mapas de zonificación local (Aguilar y Alva, 2007) y de Tavera et al. (2007). Se observa una tendencia a mayores PGAs en las estaciones ubicadas sobre suelo. Ejemplo de ello son las dos estaciones de Sedapal (E1 y E2), muy cercanas una de otra, en la estación en suelo registró un PGA (0.056g), 2.6 veces mayor que el registro en roca (0.021g).

Las diferentes formas de los espectros de respuesta correspondientes a cuatro estaciones ubicadas entre 96 y 111 km del plano de falla (Figura 3), las que están localizadas sobre tres diferentes tipos de suelo, dan evidencia adicional de los efectos de sitio, los que se expresan en amplificaciones significativas sobre bandas de períodos compatibles con la descripción del tipo de suelo (i.e. depósitos superficiales rígidos en La Molina y suelos blandos en Callao).

Los acelerogramas para los registros disponibles mostrados en la Tabla I se pueden observar en Internet², y los registros de La Molina (suelo firme) y el Callao (suelo blando) se muestran en las Figuras 4 y 5, respectivamente. Obsérvese que todos los registros están caracterizados por dos pulsos de aceleraciones, lo que concuerda con el deslizamiento sobre dos asperezas indicadas por la solución de falla finita (Figura 1).

Los efectos de sitio son particularmente notables al comparar los registros de las estaciones de El Callao y Rímac. Ambas están ubicadas a una distancia de 111.1 km del plano de falla, por lo que se podría esperar registros de similares características. La estación acelerográfica de El Callao está ubicada sobre suelo blando, mientras que la del Rímac está ubicada sobre el conglomerado de Lima. Cuando se analiza la transformada de Fourier del registro de El Callao, la diferencia entre ambos pulsos es patente, pues el segundo pulso posee una intensidad significativamente mayor, específicamente en el rango de bajas frecuencias (períodos altos) cercanos a 1 segundo. Esta diferencia entre el primer y segundo pulso es también evidente al comparar los espectros de respuesta de ambos pulsos.

La diferencia evidenciada entre los pulsos del registro de El Callao tendría su origen en el suelo blando sobre el cual está instalada la estación. El mecanismo probable que originó esta respuesta es el debilitamiento del suelo durante el primer pulso, para luego comportarse de manera bastante más flexible durante el segundo pulso. Éste está probablemente asociado a la disminución de las tensiones efectivas, producto de la acumulación del exceso de presiones de poro, y posiblemente a la deformación angular inducida durante el primer pulso. Producto de esta pérdida de rigidez del estrato blando subyacente, la velocidad de propagación de la onda media habría disminuido para dar paso a la amplificación de frecuencias bajas (en torno a un segundo).

2 http://gees.usc.edu/GEER/Peru_2007/Peru_2007_WebPage/Seismology.htm

LICUACIÓN DEL SUELO

El 15 de agosto de 2007, el sismo de Pisco trajo consigo una amplia variedad de fallas por licuación. Daños significativos por licuación incluyen un desplazamiento lateral masivo que se extendió aproximadamente 3 km, un deslizamiento de talud de 400 m de largo inducido por licuación en el pie, fallas espectaculares de cimentaciones superficiales de edificios pequeños resultando en asentamientos de hasta 0.90 m, numerosos daños en terraplenes de carreteras por desplazamientos laterales, colapso de postes de tendido eléctrico cimentados en suelo que licuó, rompimiento de ductos de agua y alcantarillado, y daños importantes en instalaciones portuarias por licuación y desplazamiento lateral. La ocurrencia de licuación del suelo en cada uno de estos sitios fue confirmada por la presencia de numerosos conos de arena, en algunos casos con la presencia de finos en superficie de cono y por la presencia de grietas con conos de arena dentro.

La distribución espacial de las evidencias de licuación observadas y reportadas en la costa central del Perú comprende la zona que se extiende desde el distrito de Chorrillos, en la zona de Villa (Av. Los defensores del Morro), al sur de Lima, y aproximadamente 90 km al norte del plano de ruptura (según la definición de Ji y Zeng, 2007), Paracas (Terminal Marítimo General San Martín), aproximadamente 24 km desde el plano de ruptura hasta la Laguna de Huacachina en la ciudad de Ica, alrededor de 40 km del plano de falla. La evidencia de licuación más al norte que se pudo comprobar se encuentra ubicada en los humedales de Villa, en el distrito de Chorrillos. Un área de humedales similar ubicada más al norte, en el distrito de Ventanilla, aproximadamente 128 km desde el plano de ruptura, no mostró evidencia de licuación (Figuras 6 y 7).

La ocurrencia de licuación a lo largo de la costa está asociada con rellenos artificiales, y depósitos marinos, eólicos y aluviales del holoceno, compuesto de arenas y arenas limosas de forma y granulometría variables. Los depósitos marinos son terrazas escalonadas cubiertas por sedimentos aluviales a medida que progresan hacia el interior desde la costa. Los depósitos aluviales están asociados con abanicos y llanuras de la descarga de ríos en el océano. El espesor de estos depósitos varía desde unos pocos metros hasta cientos de metros. Los depósitos eólicos varían en espesor y están generalmente compuestos de arena que va desde gris oscuro a claro, con granulometría de gruesa a fina.

Caso I: Villa, avenida Defensores del Morro (antes Huaylas)

La avenida Defensores del Morro (antes av. Huaylas) es una vía de dos sentidos, pavimentada con asfalto y construida sobre un terraplén de 0.80 m de alto y 38 m de ancho; la vía tiene un separador central. Los suelos de la zona están compuestos por arcillas orgánicas superficiales y arenas finas mal graduadas, variando a arenas limosas con la profundidad, desde muy sueltas a medianamente densas. El suelo licuó un tramo de aproximadamente 50 m, causando una falla del terraplén por desplazamiento lateral de 26 m de longitud. La falla se encuentra ubicada aproximadamente a 800 m al sur de la Planta Lucchetti. Se observó un claro desplazamiento lateral de 0.30 m en ambos lados del terraplén (Figura 8) con abundante evidencia de licuación por la presencia de conos de eyección de arena y finos (Figura 9). Las grietas en el terraplén presentan de 0.10 a 0.30 m de ancho, una profundidad variable entre 0.65 y 1.36 m (Figura 10). En la zona del pavimento, las grietas presentaron un ancho de 0.10 m y una profundidad de 0.68 m. La diferencia de nivel entre los bordes de la grieta fue de 0.12 m (Figura 11). Los postes del tendido eléctrico colapsaron al fallar la cimentación por licuación (Figuras 8 y 10a).

Caso II: Las Lagunas de Puerto Viejo

Las Lagunas de Puerto Viejo es un complejo de casas en la playa, ubicado a 70.8 km al sur de Lima y, aproximadamente, a 51 km del plano de ruptura. Esta área está ubicada en un depósito del holoceno marino reciente con humedales fuera del límite este de propiedad del complejo. Este conjunto consiste en viviendas de uno y dos pisos, en su mayoría construidas de albañilería confinada y algunas con muros prefabricados ligeros ("drywall"). El daño estructural fue de ninguno a severo, y estaba bien correlacionado con el grado de asentamiento de las cimentaciones y el desplazamiento lateral asociado con la licuación del suelo subyacente (Figura 12).

Muchas de las casas fueron construidas alrededor de lagunas artificiales creadas por excavación del suelo arenoso natural y dejando que el agua subiera a su nivel freático natural. Los bancos de las lagunas eran taludes cubiertos de pasto, con una pendiente estimada de 1.5:1 (H:V). En ellos, se registraron evidencias claras de desplazamiento lateral de casas hacia las lagunas o hacia el océano, que van desde unos pocos centímetros, para las casas junto a la playa, a casos que envuelven 3.90 m de movimiento hacia las lagunas interiores (Figuras 13 y 14). Algunas casas se asentaron hasta 0.20 m (Figura 15). Los desplazamientos laterales también se observaron en los taludes de la laguna ubicada al este del complejo, en una zona en las que no había edificaciones cercanas. Adicionalmente, varias casas ubicadas en la zona afectada por la licuación no mostraron evidencia alguna de movimiento y tuvieron un buen comportamiento sísmico, aun cuando estaban ubicadas cerca de la orilla del talud de una de las lagunas. En varios lugares, principalmente a lo largo de grietas en el terreno, hubo presencia de arena eyectada, formada por arena mal graduada, color gris, con algo de limos no plásticos.

Caso III: Falla de un talud de 400 m en Jahuay

Cerca del kilómetro 189 de la carretera Panamericana, justo al sur de la garita de peaje (aproximadamente a 40 m del plano de ruptura), en Jahuay, se observó la falla de un talud de aproximadamente 60° de pendiente y 30 a 50 m de alto, de 400 m de largo, inducida por la licuación en el pie del talud. En este lugar, la carretera corre a lo largo de la interfase entre la terraza de un depósito marino del holoceno y la formación Cañete del pleistoceno (un conglomerado de areniscas, limolitas, y lutitas, con cementación débil a media). El material del talud fallado está formado por depósitos eólicos de arenas limosas (SM) sueltas y no plásticas, que cubrían los materiales compactos de la parte superior de la formación Cañete (en la Figura 16, se presentan los ensayos de clasificación de los suelos encontrados). La terraza marina, pantanosa y plana se extiende aproximadamente 500 m desde la orilla del mar, en el límite sur de la carretera Panamericana Sur (Figura 17). La berma y el pavimento de la calzada norte fueron levantados 3 m, aproximadamente (Figura 18); se cree que esto ocurrió a causa de que parte del material fallado se habría enterrado bajo el terraplén de la carretera. Gran cantidad del suelo fallado cayó entre la carretera y el borde del talud, sobre los 400 m de longitud de la falla. Un lugareño informó que la autopista, al sur de la falla del talud, había sido recientemente reparada y apropiadamente compactada, lo que parece haber impedido que la falla se extendiera hacia el sur.

Se encontraron conos de arena a ambos lados de la carretera y otro lugareño (que vivía justo al sur del deslizamiento) reportó que, durante el terremoto, salió gran cantidad de agua y arena del suelo, que alcanzaron alturas de hasta 1 m. Asimismo, se encontró un gran cono de arena en el extremo sur de la falla de talud, que mostraba grietas de contracción en el perímetro, indicando la presencia de finos plásticos (Figura 19). Los finos fueron encontrados solo en una capa fina en lo más alto del material eyectado. Pruebas de laboratorio realizadas al material de este cono indicaron su clasificación como arena arcillosa (SC); contenían aproximadamente 43% de finos (11% de partículas del tamaño de arcilla) con un IP de 8 y un LL de 25. Sin embargo, hasta que no se realicen investigaciones detalladas en el sitio, permanecerá poco claro si el material fino plástico fue parte de la capa licuada o si fue mezclado con el material licuado en su camino hacia la superficie. Material de un cono de arena en el lado opuesto del camino fue clasificado como arena mal graduada (SP), con menos de 3% de finos no plásticos.

Caso IV: Gran desplazamiento lateral en Canchamaná

En Canchamaná, 2.5 km al norte de Tambo de Mora, ocurrió un importante desplazamiento lateral de una terraza marina en dirección hacia el mar, provocado por licuación. El área desplazada aproximada fue de 1 km de ancho por 3 km de largo (Figuras 20 y 21). El límite este del desplazamiento fue la interfase entre la terraza del holoceno marino y la formación del pleistoceno de Cañete. El límite sur parece estar definido por la interfase de la terraza marina con un depósito de arena aluvial del holoceno. El límite norte no se pudo definir claramente, pero parece haber sido influido por la presencia de construcciones efectuadas en una curva de la carretera Panamericana (Figura 22). El desplazamiento lateral puede haberse extendido más al norte, pero esto no fue verificado. La elevación de la formación Cañete es de aproximadamente 10 a 20 m sobre la terraza marina. La superficie de los depósitos de la terraza marina parece estar compuesta por una capa de suelo no licuable (arena débilmente cementada) y una capa inferior de suelo licuable (arena limosa). El espesor de la capa superior va desde, aproximadamente, 6 m en el lado este, a una delgada capa en la playa. La profundidad del nivel freático era variable en los dos lugares donde fue medida. Ambas mediciones fueron hechas en el lado este de la terraza marina cerca de la formación Cañete. En un pozo existente ubicado aproximadamente al centro (de norte a sur) del área desplazada, el nivel freático fue de 5.2 m de profundidad, y en un agujero abierto a aproximadamente 0.7 km al norte de este pozo, el nivel freático se registró a 2.0 m de profundidad. La pendiente hacia el oeste de la superficie de la terraza marina era de aproximadamente 1.6 a 2.1%.

A lo largo de una parte importante de la interfase entre la formación Cañete y la terraza marina, se registró un quiebre vertical en la topografía de magnitud variable. El desplazamiento relativo vertical máximo medido fue de aproximadamente 2.90 m, en la vecindad del camino rural denominado la Bajada del Socorro (Figura 23). Además de este importante desplazamiento vertical, se registraron numerosas grietas paralelas a la línea de costa en la terraza marina, algunas de ellas de hasta 1 m de ancho (Figura 24). En general, el tamaño de las grietas (tanto en ancho como en profundidad) decrecía desde la interfase formación Cañete - terraza marina a la línea de costa. En algunos lugares, se constataron grietas perpendiculares a la costa o de geometría circular, lo que dejaba en evidencia los efectos topográficos (Figura 22).

En el extremo norte del desplazamiento, un terraplén de relleno artificial de aproximadamente 8.0 m de alto fue construido sobre un drenaje natural; como consecuencia de ello, se observó licuación y desplazamiento lateral asociado de la terraza marina, provocando la falla del terraplén y de las estructuras de concreto que se apoyaban sobre él. Se encontraron conos de eyección de arena más de 3 m de largo o 2 m de diámetro cerca de la base de este terraplén. Las grietas fueron encontradas en la base de la formación Cañete, solo a 2 km de distancia, por lo que se estima muy probable que ambas fallas estén asociadas con la licuación del mismo material (Figura 25), ya que entre los dos lugares se encontró gran cantidad de conos de eyección y pequeñas distorsiones topográficas.

Con la información recabada hasta el momento, es muy difícil estimar el desplazamiento total del desplazamiento lateral de la terraza marina, porque ocurrió sobre un área muy extensa. Sin embargo, pescadores locales mostraron

marcas del nivel del mar en la playa antes y después del evento, sugiriendo que la línea del agua se movió alrededor de 25 m hacia el oeste (mediciones preliminares posteriores sobre la base de fotografías satelitales muestran un desplazamiento aproximado de 12 m; este estudio está aún en proceso de análisis). Esta medición no es una estimación del desplazamiento del desplazamiento lateral, pero se cree que el desplazamiento lateral contribuyó a este cambio del paisaje. También se observó un levantamiento a lo largo de la playa, indicando que esto pudo haber contribuido al movimiento de la línea de costa.

Caso V: Fallas de las cimentaciones superficiales en Tambo de Mora

En la parte noroeste de Tambo de Mora, distante aproximadamente a 0.5 km de la línea de costa y a 38 km del plano de falla, se documentaron fallas espectaculares de cimentaciones superficiales provocadas por licuación de suelo, que llevaron a la falla del 75% de las viviendas. Tambo de Mora está ubicado sobre depósitos eólicos y aluviales del holoceno, con nivel freático relativamente superficial. En la Figura 26, se presentan los resultados de los ensayos de clasificación.

En la mayor parte de la zona noroeste de la ciudad, se encontraron evidencias de licuación, tales como conos de eyección pequeños y asentamientos menores; sin embargo, las casas de uno y dos pisos de la calle Alfonso Ugarte se vieron particularmente afectadas por asentamientos excesivos. La zona afectada en esta calle tiene una extensión de 300 m, en los cuales prácticamente todas las edificaciones tuvieron asentamientos iguales o mayores a 0.30 m, registrándose varias con asentamientos entre 0.70 y 0.90 m (Figura 27).

En la Figura 28, se presenta las partes exterior e interior de la vivienda ubicada en la calle Alfonso Ugarte N° 195, en la que se efectuó una perforación hasta 15.45 m, realizándose SPT cada metro (el análisis de esta perforación se encuentra en proceso). Otro caso especial es el de una casa con paredes de madera y techo de esteras con torta de barro, que también se hundió a causa de la licuación (Figura 29). Se encontró material de eyección en grandes cantidades en las grietas que se produjeron en la calle y dentro de las edificaciones con pisos de concreto simple no reforzado; en ellas, el suelo licuado hundió la edificación y destruyó completamente los pisos, levantándolos hacia dentro de las edificaciones hundidas (Figuras 28 y 29). El material de eyección encontrado, en la mayoría de los casos, correspondió a arenas grises, no plásticas, mal graduadas (SP a SM). Una excepción fue un limo plástico (ML, LL = 48) encontrado al interior de una de las casas afectadas. La profundidad del nivel freático fue de 0.30 m, en el momento de la visita del equipo GEER; sin embargo, lugareños reportaron que antes del sismo se encontraba entre 0.50 y 1.00 m de profundidad. Los mismos lugareños indicaron que una mezcla de agua y arena salió expulsada del suelo durante el segundo pulso del movimiento, que alcanzó alturas de hasta 1.30 m.

Caso VI: Terminal Marítimo General San Martín, Pisco

El Terminal Marítimo General San Martín tiene capacidad para barcos de hasta 25,000 toneladas de peso muerto. Está localizado en Punta Pejerrey, en el extremo norte de la península de Paracas, en Pisco, departamento de Ica, a 30 km de la falla, aproximadamente. El puerto está rodeado de pórfido granítico (roca intrusiva), que es parte del batolito San Nicolás. El pórfido granítico tiene una matriz que va desde fina a gruesa, con colores desde rosado a rojo oscuro. Las instalaciones portuarias fueron construidas en terreno ganado al mar, como muestra la Figura 30a. El embarcadero tiene una cubierta de concreto armado, que está cimentada sobre 780 pilotes tubulares de acero. El área de suelo ganada al mar se ha asentado con el correr de los años, lo que ha traído como resultado un movimiento diferencial entre las edificaciones soportadas por pilotes y el terreno circundante. La solución típica a este problema fue poner más relleno hasta nivelar.

El sismo produjo la licuación del relleno, como evidenciaron los conos de arena encontrados (Figura 31) y el desplazamiento lateral con grietas significativas de hasta 0.25 m de ancho y distorsiones verticales de hasta 1.20 m (Figura 30b). La cubierta soportada por pilotes se inclinó levemente hacia el mar y las separaciones horizontales en las juntas de la cubierta fueron de hasta 0.50 m de largo (Figura 32a). Las grietas del terreno se desarrollaron en forma paralela a la cubierta en la zona de suelo ganado al mar y fueron más severas cerca de la orilla (Figura 32b).

En el área de maniobras del terminal, la licuación generó un asentamiento que causó el punzonamiento del pavimento asfáltico por un grupo de pilotes enterrados en la zona (Figura 33). Una tubería que corría a través del puerto, dentro de una caja de concreto, no resultó dañada por el sismo, a pesar de que el terreno circundante se asentó sustancialmente. Se presume que la caja de concreto estaba soportada por pilotes. No se observaron grietas en la zona de la caja construida sobre el suelo natural.

Caso VII: Ingreso a la ciudad de Pisco

Entre el km 218 y km 221 de la Carretera Panamericana Sur, al ingreso de la ciudad de Pisco, también se encuentran humedales formados por depósitos de arcillas limosas color marrón claro y arenas finas color marrón claro, pertenecientes al cuaternario reciente (holoceno). En esta zona, el sismo causó licuación, lo que produjo grietas de

tamaño variable entre 0.20 y 1.00 m; también se observaron asentamientos variables entre 0.10 y 0.30 m. Los postes del tendido eléctrico colapsaron al fallar la cimentación por licuación (Figura 34). La zona se encuentra aproximadamente a 30 km del plano de ruptura.

Caso VIII: Malecón de Pisco

El malecón de Pisco está situado en la zona antigua de la ciudad, en la que se ha presentado licuación con desplazamiento lateral, que ha causado grietas en el pavimento del malecón, la falla del muro de contención (Figura 35a) y el colapso de una vivienda ubicada también en la zona del malecón, la que presenta hundimientos por licuación del orden 0.15 a 0.20 m (Figura 35b). La zona de la playa en la que se encuentra un complejo deportivo también presenta evidencia de licuación.

Caso IX: Laguna de Huacachina

La laguna de Huacachina está situada en el departamento de Ica. Los suelos de la zona son arenas finas de origen eólico; la laguna forma un oasis entre las dunas de arena. El sismo causó grietas por licuación, tal como se aprecia en la Figura 36. Esta es la zona más al sur, en la que se observó el fenómeno de licuación que generó el sismo del 15 de agosto de 2007.

FALLAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Los deslizamientos de talud, desencadenados por el sismo, fueron descritos durante los viajes realizados por el segmento Lima-Ica de la carretera Panamericana (orientada Norte-Sur) y en la Vía Los Libertadores (orientada Este-Oeste). El trayecto por la Vía Los Libertadores comienza en la costa cercana a Pisco y continúa hacia el este por, aproximadamente, 110 km, y hasta una elevación de aproximadamente 4500 m. Se estima que, en total, el sismo provocó miles de deslizamientos de tierra; la mayoría de estos deslizamientos fueron finitos, incluyendo caídas de rocas, deslizamientos de roca, fallas de taludes de suelo, avalanchas de suelo y deslizamientos de suelo interrumpidos. Reportes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones indican que las caídas de roca ocurrieron sobre una extensa región y alcanzaron zonas tan al norte como Chachapoyas, en el departamento de Amazonas, a 700 km desde el plano de falla, aproximadamente. Como fue expuesto anteriormente, se registraron numerosos desplazamientos laterales inducidos por licuación, mayoritariamente a lo largo de la costa de la región epicentral.

La Figura 37 muestra una avalancha de suelo mixto que, se piensa, fue inducida por licuación, lo que habría producido pérdida de rigidez del suelo o movimiento cerca del pie del talud. El deslizamiento ocurrió cerca de Jahuay, a un costado de la carretera Panamericana Sur, km 189, la cual fue parcialmente bloqueada en este lugar después del sismo. Esta falla es discutida con mayor detalle en la sección de licuación.

La caída masiva de rocas mostrada en la Figura 38 tuvo lugar en la Vía Los Libertadores, a aproximadamente 44 km del plano de falla, a una elevación de aproximadamente 500 m. Durante la visita al sitio, el 23 de agosto de 2007, el deslizamiento de rocas, que cerró completamente la carretera por 3 días, estaba en el proceso de ser removido. El personal de la carretera estimó que ya se había removido 8,000 m³ de material; el volumen total del deslizamiento se estima superior a 20,000 m³. El macizo rocoso involucrado en la falla posee fracturas sin relleno y con orientación desfavorable. Las rocas de la zona pertenecen al Cretáceo Inferior. La mayoría de las rocas falladas consistían en bloques entre 0.2 y 2.0 m de diámetro, aunque también fueron encontrados en el camino bloques de hasta 3.5 m de diámetro. Después de cubrir la carretera, cayeron detritos sobre un acantilado localizado al sur de la misma, los que terminaron por bloquear un canal de agua. Durante la visita y con el afán de restaurar el flujo en el canal, fueron dinamitados detritos que incluían bloques de varios metros de diámetro. Vale la pena destacar que, aparte de los cortes muy verticales, la roca que evidenciaba poco o ningún signo de inestabilidad durante el terremoto era de pendiente moderada (estimada entre 35 y 50 grados).

La Figura 39 muestra la parte superior de uno de los dos deslizamientos de rocas adyacentes, que ocurrieron en terreno natural (sin cortes), a lo largo de la Vía Los Libertadores, con una elevación aproximada de 2,250 m, y a aproximadamente 65 km del plano de falla. El cono de detritos fue de 40 m de ancho, en su base, y se extendió a una altura estimada de 150 m. El macizo consiste de roca ígnea con fracturamiento moderado, no persistente. Los detritos de la roca fallada, que consistían en bloques de hasta 4 m de diámetro, cayeron a un río grande, lo que restringió un poco (sin causar bloqueo) el flujo de agua.

El deslizamiento interrumpido de suelo y rocas, mostrado en la Figura 40, fue encontrado a una elevación de 2,020 m, a lo largo de la Vía Los Libertadores. La distancia más próxima al plano de falla se estimada en 65 km. Una cantidad significativa de detritos del deslizamiento cubrió completamente la superficie del camino después del sismo, lo que causó el cierre de la carretera en este lugar. Los restos fueron removidos para permitir el paso de una línea de

tráfico antes de que el equipo de reconocimiento visitara el sitio. El talud estaba constituido por un depósito sedimentario de rocas ígneas grandes (hasta 1 m), semiredondeadas en una matriz de suelo limo-arenoso. Cortes cercanos y estables en este mismo material tenían inclinaciones entre los 60 y 65 grados. En contraste con muchos de los deslizamientos de tierra vistos en la región, este deslizamiento de roca y suelo tuvo significativamente más escorrentía para, finalmente, caer sobre el camino y el cañón, ubicado a la derecha del camino. Es importante notar que, en el interior del cañón, una falla similar ocurrió en el mismo material sobre un talud natural.

REFERENCIAS

Aguilar B., Z., y Alva H., J. (2007). *Microzonificación sísmica de Lima*. Presentación en la Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. http://www.cismid-uni.org/d_conf_int.php

Atkinson, G. M. y Boore, D. M. (2003). *Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions*. BSSA 93(4) 1703-1729. http://quake.wr.usgs.gov/~boore/pubs_online/subduction_equations.pdf

Fernández, M. (1993) *Geología de los cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Córdova: hojas 28-K, 28-L, 29-K, 29-L, 29-M*. Boletín del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Serie A: Carta Geológica Nacional, Lima.

Fierro, E. et al (2007) *The Learning from Earthquakes: The Pisco, Peru Earthquake of August 15, 2007* Preliminary Reconnaissance Report by EERI team http://www.eeri.org/lfe/pdf/peru_pisco_eeri_preliminary_reconnaissance.pdf

Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI): http://sinadeci.indeci.gob.pe/UploadPortalSINPAD/COEN_Noticia/CUADRO%2067%20MOVIMIENTO%20SISMICO%2013NOVT07%201300hrs.pdf

Ji, Z. y Cheng, Y. (2007). *Preliminary Result of the Aug 15, 2007 Mw 8.0 Coast of Central Perú Earthquake*. http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2007/us2007gbcv/finite_fault.php

Keefe, D. K. (1984). *Landslides caused by earthquakes*. Geological Society of American Bulletin, v. 95, p. 406-421.

Lazares, F., Almora, J.P., López, J., Cabrejos, J.J. y Piedra, R. (2007). *Análisis de acelerogramas del terremoto de Ica del 15 de agosto del 2007* Presentación en la Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. http://www.cismid-uni.org/d_conf_int.php

Martinelli, M. (2007) *Estudio de Mecánica de Suelos de la Playa Las Lagunas de Puerto Viejo* <http://www.playalasalagunas.com/doc/M2799.pdf>

Palacios, O.; Caldas J.; Vela C. (1992). *Geología de los cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica: hojas 25-I, 25-J, 24-I, 24-J* Boletín del Instituto geológico minero y metalúrgico. Serie A: Carta Geológica Nacional, Lima.

Rodriguez Marek et al (2007). *Preliminary Reconnaissance Report on the Geotechnical Engineering Aspects of the August 15, 2007 Pisco, Peru Earthquake. Report of the National Science Foundation-Sponsored Geotechnical Earthquake Engineering Reconnaissance (GEER) Team*. http://gees.usc.edu/GEER/Peru_2007/Peru_2007_WebPage/index.htm

Tavera, H. y Bernal, I. (2005). *Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste del Perú*. Volumen Especial No. 6 Alberto Giesecke Matto, p. 89-102. http://khatati.igp.gob.pe/cns/publi/publi_ult/dist_espacial_rup_lag_boeste.pdf

Tavera, H., Bernal, I., y Salas, H. (2007). *El terremoto de Pisco del 15 de agosto 2007. Volumen especial. (Versión Preliminar)* Boletín Sociedad Geológica, Instituto Geofísico del Perú. http://khatati.igp.gob.pe/Vwebs/cns06/pisco2007/terremoto_pisco_2007.htm

Trifunac, M.D. y Brady, A.G. (1975). *A study of the duration of strong earthquake ground motion*. BSSA 66(4), 139-162.

Tabla I: Estaciones acelerográficas que registraron el sismo de Pisco

Organización ^(a)	Código	Ubicación	Ciudad	PGA UD (cm/s ²)	PGA NS (cm/s ²)	PGA EO (cm/s ²)	PGA ^(g)	Distancia más próxima (km) ^(b)	Tipo de Suelo ^(c)
IGP	<u>PCN</u>	Parcona	Ica	301.0	455.0	488.0	0.498	39.4	Suelo
IGP	<u>MAY</u>	Mayorazgo	Lima	31.2	59.7	55.0	0.061	103.0	Suelo
IGP	<u>ANC</u>	Ancón	Ancón	27.8	54.7	58.4	0.060	137.5	Suelo
IGP	<u>LMO</u>	La Molina	Lima	14.2	21.2	25.3	0.026	100.3	Roca
IGP	<u>NNA</u>	Ñaña	Lima	21.6	18.7	22.1	0.023	105.4	Roca
CISMID	<u>ICA2</u>	Universidad	Ica	192.2	334.1	272.3	0.341	36.7	Suelo
CISMID	<u>CISMID</u>	Rímac	Lima	32.9	45.1	73.9	0.075	111.1	Suelo Firme
CISMID	<u>CDL-CIP</u>	San Isidro	Lima	33.1	58.8	54.1	0.060	103.7	Suelo Firme
CISMID	<u>La Molina</u>	La Molina	Lima	56.8	69.1	78.7	0.080	96.8	Suelo
CISMID	<u>DHN</u>	Callao	Callao	31.6	101.0	95.8	0.103	111.1	Suelo
PUCP	<u>PUCP</u>	U. Católica	Lima	39.7	59.6	67.0	0.068	106.7	Suelo Firme
CERESIS	<u>RIN</u>	Rinconada	Lima	57.7	115.0	111.0	0.117	99.3	Suelo
CERESIS	<u>ANR</u>	A. Nac. Rectores	Lima	73.5	65.2	85.3	0.087	100.1	Suelo Firme
CERESIS	<u>CER</u>	Ceresis	Lima	37.3	58.0	58.7	0.060	102.4	Suelo Firme
Sedapal	E1 ^(d)	Atarjea	Lima	30.4 ^(d)	50.0 ^(d)	54.9 ^(d)	0.056	106.2	Suelo
Sedapal	E2	Atarjea	Lima	11.8	12.7	20.6	0.021	105.9	Roca

(a) IGP: Instituto Geofísico del Perú (<http://www.igp.gob.pe/>).
 CISMID: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (<http://www.cismid-uni.org/>).
 PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú (<http://www.pucp.edu.pe/>).
 CERESIS: Centro Regional de Sismología para América del Sur (<http://www.ceresis.org/new/es/index.html>).
 Sedapal: (<http://www.sedapal.com.pe/>).

(b) Medido desde el plano propuesto por Ji y Zeng (2007).

(c) Inferido de mapas de zonificación local (Aguilar y Alva 2007) y de Tavera et al. (2007), pueden ser consideradas sólo una estimación. Las estaciones en suelo firme son aquellas ubicadas en el llamado "Conglomerado de Lima", un depósito de grava denso con algo de cementación.

(d) La estación E1 está en la ubicada en la cresta de un terraplén.

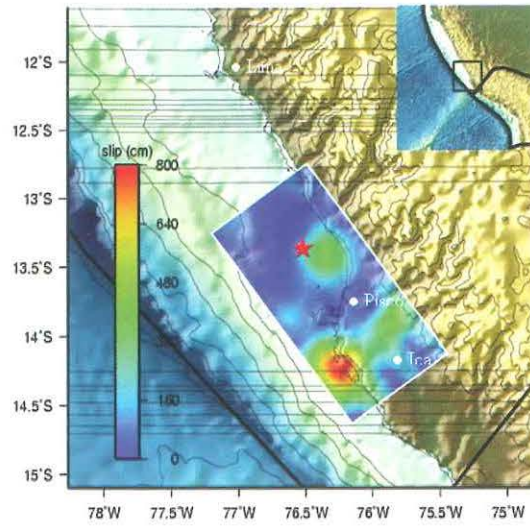


Figura 1.- Solución de falla finita de Ji and Zeng (2007). Ubicación aproximada de principales ciudades.

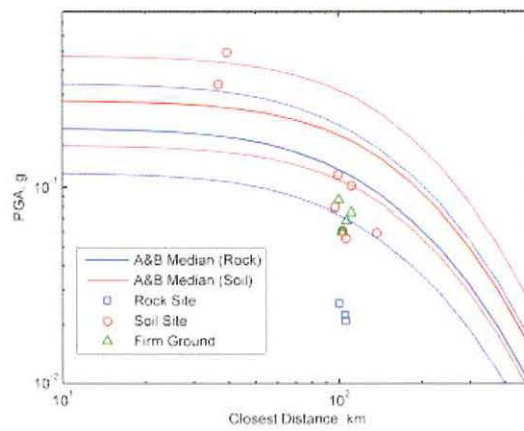


Figura 2.- PGA versus distancia más próxima al plano de falla.

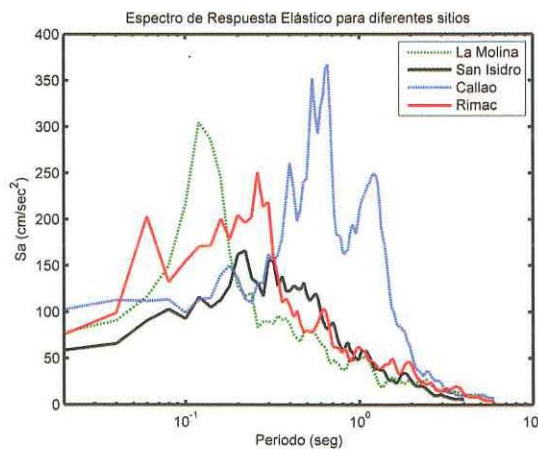


Figura 3.- Aceleraciones espectrales registradas para varios registros ubicados a distancias similares.

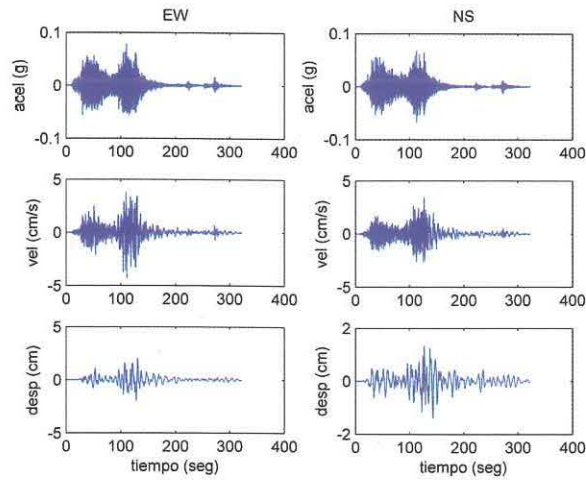


Figura 4.- Historia de aceleraciones, velocidad y desplazamiento para el registro La Molina (suelo firme).

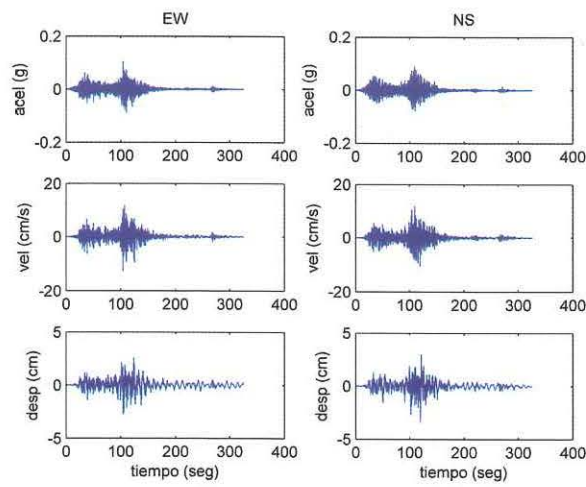


Figura 5.- Historia de aceleraciones, velocidad y desplazamiento para el registro de El Callao (suelo blando).

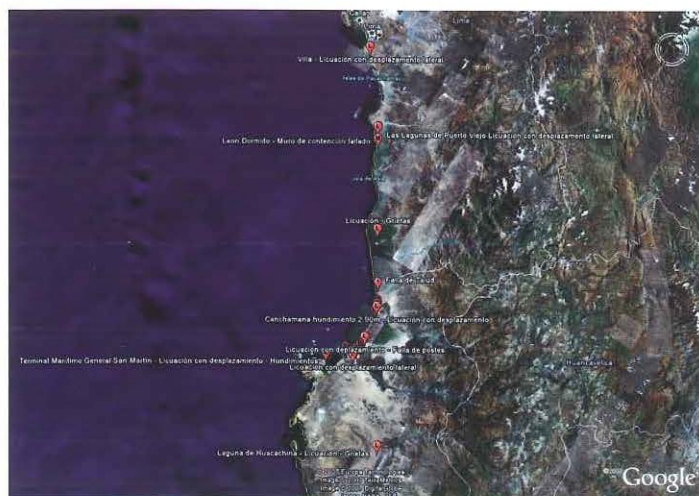


Figura 6.- Distribución espacial de las evidencias de licuación.



Figura 7.- Acercamiento de la zona de Pisco y sus evidencias de licuación.



Figura 8.- Av. Defensores del Morro (Chorrillos, Lima).- Vistas de la licuación con desplazamiento lateral (0.30 m en ambos lados) (a) Sentido Noroeste Sureste. (b) Sentido Sureste Noroeste.



Figura 9.- Av. Defensores del Morro (Chorrillos, Lima).- Conos de eyección en la zona de la Av. Defensores del Morro (Chorrillos, Lima). Nótese los finos en la foto de la izquierda.



Figura 10.- Av. Defensores del Morro (Chorrillos, Lima).- Vistas de las grietas causadas por el desplazamiento lateral por licuación, las que presentaron profundidades variables entre 0.65 y 1.36 m (a) Sentido Noroeste Sureste. (b) Sentido Sureste Noroeste.

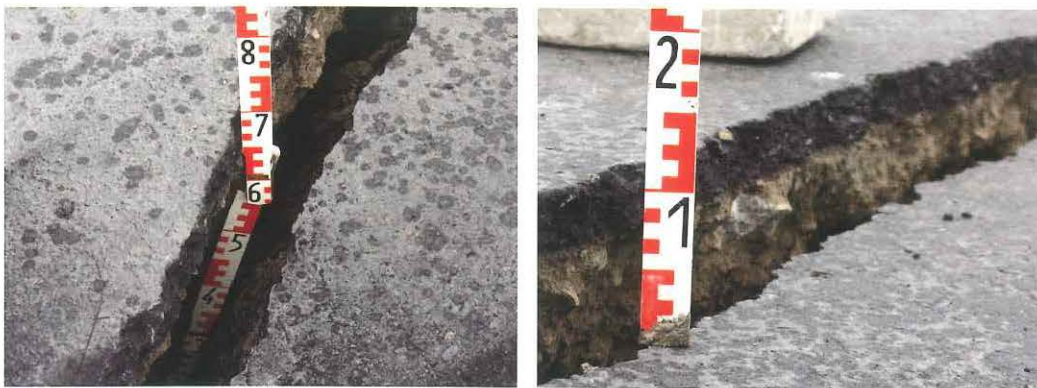


Figura 11.- Av. Defensores del Morro (Chorrillos, Lima).- (a) Grieta en el pavimento de 0.68 m de profundidad, 0.10 m de ancho. (b) Desnivel de 0.12 m en el pavimento.



Figura 12.- Las Lagunas de Puerto Viejo.- Colapso de viviendas causadas por la licuación y el desplazamiento lateral.



Figura 13.- Las Lagunas de Puerto Viejo.- (a) Desplazamientos laterales y fallas asociadas. (b) Desplazamiento lateral por licuación de 3.90 m



Figura 14.- Las Lagunas de Puerto Viejo.- Desplazamientos en la zona de las lagunas artificiales.

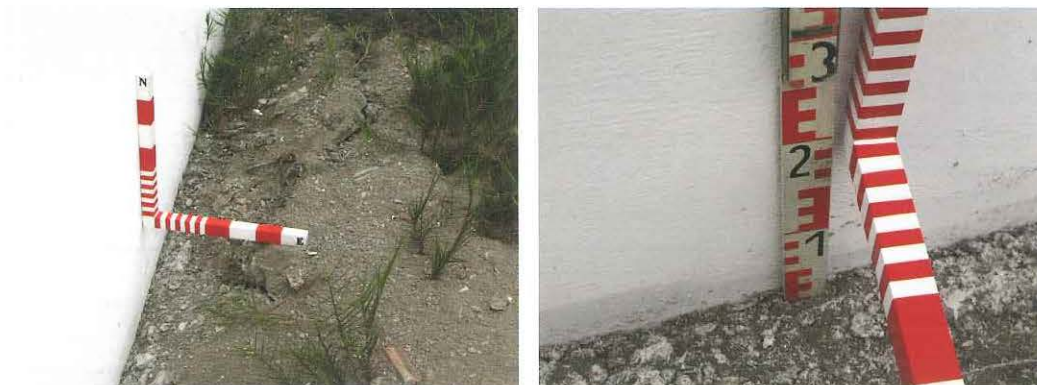
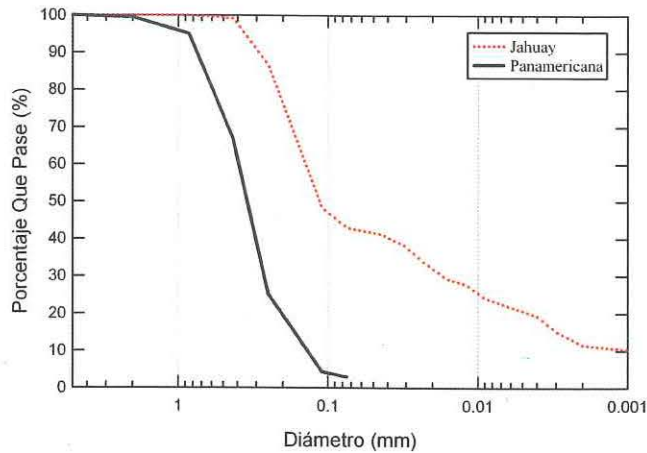


Figura 15.- Las Lagunas de Puerto Viejo.- (a) Asentamiento de 0.20 m. (b) Desplazamiento de 0.20 m.



Suelo eyectado	SUCS	% Finos	LL	LP	IP
Jahuay (LMS-540)	SC	43	25	17	8
Panamericana (LMS-504)	SP	2.9	NP	NP	NP

Figura 16.- Talud en Jahuay.- Granulometría y límites de Atterberg de suelos obtenidos de material de los conos de eyección en la zona de Jahuay.



Figura 17.- Talud en Jahuay.- Vista de la carretera Panamericana en la zona de la falla del talud de 400 m. (a) Se aprecian depósitos de la terraza marina en frente y la formación Cañete en la parte posterior. (b) Eyección de arena por la licuación.



Figura 18.- Talud en Jahuay.- (a) Daños en la berma y el pavimento de la calzada norte de la carretera Panamericana. (b) Entre el talud y la berma de la carretera se encontró una eyección de arena limosa y limo.



Figura 19.- Talud en Jahuay.- Gran cono de arena con finos licuados



Figura 20.- Desplazamiento lateral en Canchamaná.- Medida preliminar del desplazamiento: 12 metros.

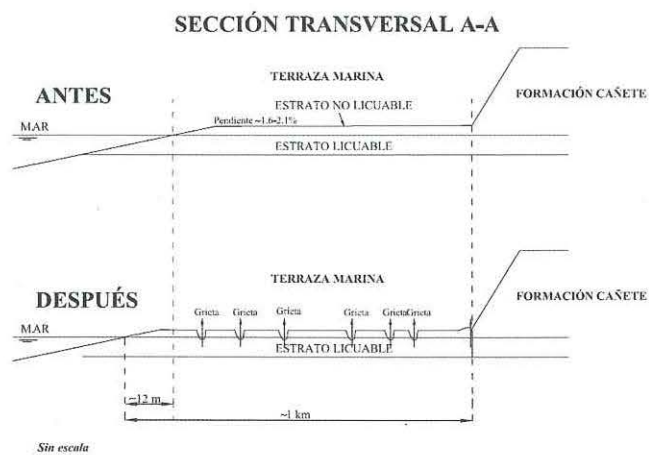


Figura 21.- Desplazamiento lateral en Canchamaná.- Sección transversal del desplazamiento lateral.



Figura 22.- Desplazamiento lateral en Canchamaná.- (a) Curva de ingreso a la Ciudad de Chíncha Alta: falla en el talud la carretera. (b) Grietas en la zona baja del talud, estas grietas son perpendiculares a la costa y se encuentran en la zona norte de Canchamaná.



Figura 23.- Desplazamiento lateral en Canchamaná.- Desplazamiento vertical de 2.90 m, producto del desplazamiento lateral en la zona de la Bajada del Socorro, Canchamaná



Figura 24.- Desplazamiento lateral en Canchamaná.- Grietas paralelas a la costa en la zona de la Bajada del Socorro en la zona sur de Canchamaná



Figura 27.- Tambo de Mora.- Asentamientos de aproximadamente 0.90 m.



Figura 28.- Tambo de Mora.- (a) Exterior de la vivienda ubicada en Alfonso Ugarte N° 195, con asentamientos de aproximadamente 0.90 m. (b) Interior de la misma vivienda de un piso con techo de calamina. Luego de la demolición de la casa se realizó en el medio de la habitación que se muestra una perforación de 15.45 m con SPT @ 1.00m (el análisis de este esta perforación se encuentra en proceso)



Figura 29.- Tambo de Mora.- (a) Vivienda de madera y techo de esteras con torta de barro hundida por licuación. (b) Estado típico de los pisos de las viviendas en Tambo de Mora luego de la licuación, el centro corresponde aproximadamente al nivel del piso antes de la licuación, las paredes se hundieron 0.80 m



Figura 30.- Terminal Marítimo General San Martín.- (a) Suelo ganado al mar. (b) Distorsión vertical de 1.20 m entre embarcadero y el pavimento construido sobre relleno artificial.



Figura 31.- Terminal Marítimo General San Martín.- Eyección de arena limosa en las juntas del pavimento asfáltico del terminal



Figura 32.- Terminal Marítimo General San Martín.- (a) Desplazamiento lateral permanente de 0.50 m en las juntas del muelle. (b) Grietas en relleno y colapso de la torre de vigilancia.



Figura 33.- Terminal Marítimo General San Martín.- La licuación causó en la zona de maniobras del terminal asentamientos que ocasionaron el punzonamiento del pavimento por pilotes enterrados en la zona. En la foto (a) se puede apreciar la arena eyectada por la licuación.



Figura 34.- Ingreso a la ciudad de Pisco.- (a) Postes inclinados al haber fallado la cimentación por licuación (los postes verticales corresponden a una instalación posterior al sismo). (b) Grietas típicas encontradas en esta zona licuada.



Figura 35.- Malecón de Pisco.- (a) Muro en el malecón fallado por licuación con desplazamiento lateral. (b) Casa (en la zona del malecón) colapsada por licuación el asentamiento de esta casa fue de 0.15 a 0.20 m.



Figura 36.- Laguna de Huacachina.- Grietas por licuación en la Laguna de Huacachina (Ica)



Figura 37.- Fallas de estabilidad de taludes.- Avalancha de suelo en la carretera Panamericana.



Figura 38.- Fallas de estabilidad de taludes.- Deslizamiento de rocas en la Vía Los Libertadores.



Figura 39.- Fallas de estabilidad de taludes.- Deslizamiento de rocas en talud natural en la Vía Los Libertadores.



Figura 40.- Fallas de estabilidad de taludes.- Deslizamiento de suelo y roca en la Vía Los Libertadores.