



ACTUALIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE LIMA

Zenón AGUILAR¹, Fernando LÁZARES², Silvia ALARCÓN³, Selene QUISPE⁴, Rocío URIARTE⁵,
Diana CALDERÓN⁶

SUMMARY

The preliminary seismic microzonation map of Lima City developed by CISMID (2004) was updated with new soil mechanical and geophysical data obtained from the “Vulnerability and Risk Assessment for Six Districts of Lima City” project, supported by the Ministry of Housing and the SATREPS project “Enhancement of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technology” supported by JST and JICA. New information regarding soil exploration tests was gathered and geophysical tests were carried out to obtain the deep soil profile of representative sites of the study area. Furthermore, a ten station seismic network was deployed in five places of the city to monitor ground motion seismic activity. Tsunami inundation map was also developed and was included to the seismic microzonation map. Results show important advances on the seismic hazard estimation for Lima Metropolitan Area.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Lima se encuentra ubicada en una zona de alta actividad sísmica. En el pasado esta ciudad fue devastada por grandes terremotos, como el de 1746, cuya magnitud es estimada en Ms 8.8 (Silgado, 1978). Posteriormente han ocurrido importantes terremotos, como los de 1966 y 1974, que han generado grandes daños en la ciudad de Lima; sin embargo, hasta la fecha no se ha registrado un evento de magnitud similar a la de 1746. El análisis de la información sísmica histórica y de mediciones geodésicas ha permitido modelar probables fuentes sismogénicas frente a la ciudad de Lima, que podrían generar un evento con magnitud entre 8.8 a 9.0 Mw (Pulido, et al, 2011). Esta realidad sísmica hace evidente que Lima necesita contar con un plan de prevención ante este tipo de fenómenos naturales.

El CISMID, a lo largo de sus 25 años, ha venido realizando una serie de trabajos de investigación orientados a definir el comportamiento sísmico del suelo y elaborando mapas de microzonificación sísmica en los diferentes distritos que conforman Lima Metropolitana. En el año 2004, por encargo de la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG), se desarrolló un mapa preliminar de microzonificación sísmica de la ciudad de Lima, el cual incluye a 42 distritos de esta metrópoli. En los años 2011 y 2012, por encargo del Programa de Gestión Territorial del Ministerio de Vivienda se realizó la evaluación detallada de los distritos de La Molina, Villa el Salvador, Chorrillos, Puente Piedra, Comas y San Juan de Lurigancho. Así mismo, en el marco del Proyecto SATREPS, “Enhancement of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technology”, se han desarrollado investigaciones en gran parte del área de Lima Metropolitana, lo cual ha permitido actualizar el mapa de microzonificación sísmica de esta ciudad, que incluye las zonas de inundación por tsunami. En este artículo se presenta un breve resumen de los trabajos realizados para elaborar el estudio de microzonificación sísmica de la Ciudad de Lima.

¹ Sub director académico del CISMID, Universidad Nacional de Ingeniería, zaguiar@zergeosystemperu.com

² Profesor auxiliar, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, flazares@uni.edu.pe

³ Profesor auxiliar, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, silvia_marisela@hotmail.com

⁴ Investigadora asociada del CISMID, Universidad Nacional de Ingeniería, challengernative@gmail.com

⁵ Asistente de Investigación del CISMID, Universidad Nacional de Ingeniería, ruriarteb@uni.pe

⁶ Profesor auxiliar, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, dianalucc@gmail.com;



GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGIA Y SISMICIDAD

Geología y Geomorfología.

El área metropolitana de Lima y Callao, se encuentra localizada dentro de los límites de influencia del cono de deyección de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, que se encuentran enmarcados en rocas sedimentarias del jurásico inferior al cretáceo inferior y rocas intrusivas del batolito andino (cretáceo superior –terciario inferior). El abanico de deyección original del río Rímac, se desarrollaba según la línea Vitarte-Quebrada de Armendáriz, a lo largo de lo que hoy se conoce como río Surco, pasando por una apertura en los cerros Agustino y Monterrico con una generatriz de 17 km de largo y una cuerda actual de 10 km (Morro Solar- Magdalena). El actual abanico de deyección del río Chillón es muy pequeño y se circunscribe al área de la Hacienda Márquez. El abanico original de éste tenía una generatriz de 12 Km. de largo, según la línea Cerro Mulería-Callao, con una probable cuerda original de unos 10 Km. (CISMID, 2004). En las zonas periféricas, al norte y sur de la ciudad, se encuentran depósitos de suelos eólicos de gran potencia, así como depósitos de suelos de origen coluvial al pie de las laderas de los cerros.

La Figura 1 muestra el mapa de geología de la ciudad de Lima, desarrollado en el marco del proyecto APESEG (CISMID, 2004)

Sismicidad.

Lima metropolitana, a lo largo de su historia, ha sufrido una serie de impactos sísmicos devastadores, siendo la principal fuente generadora de éstos la zona de subducción definida por la interacción de la Placa de Nazca y la Placa Continental. Esta fuente puede generar eventos de gran magnitud, los que en la zona de la costa central pueden alcanzar magnitudes de hasta 8.8 grados en la escala de Kanmori. Así mismo, la relativa proximidad del área urbana a esta fuente sismogénica hace que la intensidad del movimiento sísmico sea bastante considerable.

En los sismos ocurridos en los años 1966 y 1974, los daños observados en las diferentes partes de la ciudad de Lima han puesto en evidencia la influencia del comportamiento dinámico del suelo en el nivel de daños ocasionados por el sismo. Las zonas donde se concentraron los mayores daños fueron los distritos de Chorrillos, Barranco, La Molina, La Punta y El Callao, a diferencia de centro de la ciudad, donde los daños fueron menores.

El análisis de peligro sísmico probabilístico desarrollado para la ciudad de Lima muestra que las aceleraciones máximas (PGA) para un evento de 475 años de periodo de retorno (10% de probabilidad de excedencia en 50 años de exposición sísmica) varían entre 0.46 g a 0.48g en suelo firme o roca blanda (Suelo tipo C según el IBC 2006).

EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Las características físicas y mecánicas de los suelos fueron determinadas mediante la información obtenida de estudios de mecánica de suelos recopilados y de los trabajos de exploración de campo realizados para los proyectos de microzonificación sísmica. La información básica fue obtenida del estudio de microzonificación realizado para APESEG (CISMID, 2004), disponiéndose hasta la fecha información de más de 1200 calicatas y 130 sondeos con ensayos SPT, los cuales han permitido identificar los diferentes tipos de suelo presentes en la ciudad de Lima. La Figura 2 muestra la distribución de las calicatas, así como de los ensayos SPT recopilados y ejecutados para este estudio.

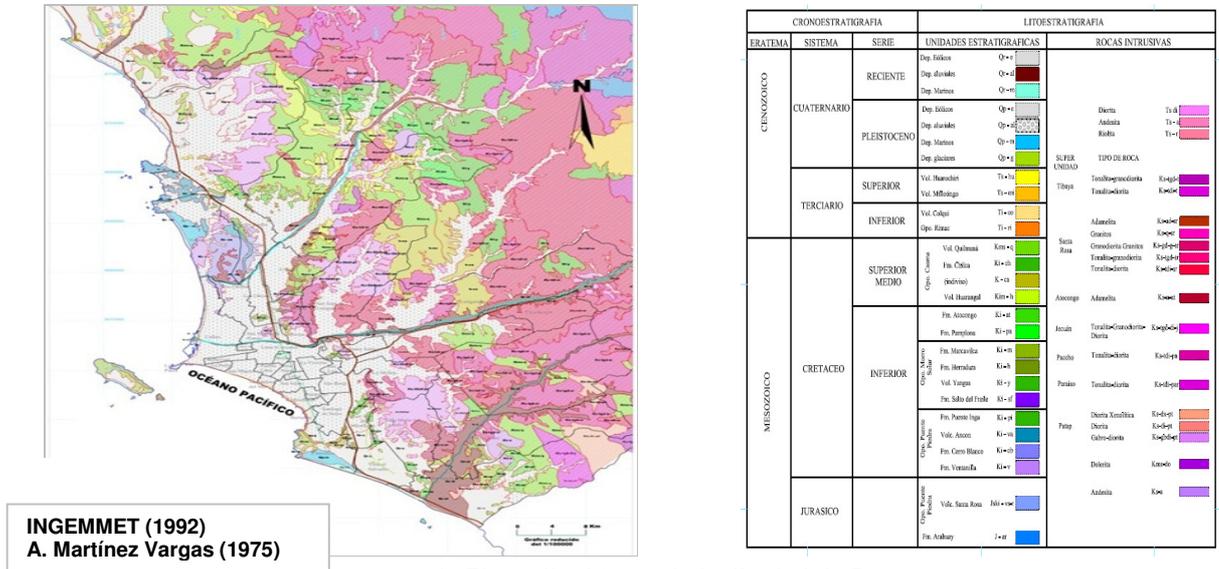


Figura 1: Plano Geológico de la Ciudad de Lima.

El análisis de esta información ha permitido definir áreas con tipos de suelos específicos, en función a sus características y conformación geológica. La Figura 3 muestra el Plano de Tipo de Suelos (CISMID, 2004), donde se observa que la mayor parte del suelo de Lima está conformado por grava aluvial, proveniente del cono aluvial de río Rímac, que presenta buenas características mecánicas y dinámicas. Sin embargo, en los conos norte y sur, se encuentran también zonas de suelos pantanosos, especialmente en los distritos de Ventanilla y Chorrillos, los cuales son suelos altamente compresibles y con baja capacidad portante para cimentaciones superficiales. Se encuentran también zonas asentadas sobre potentes estratos de arenas eólicas, mal graduada, especialmente en los distritos de Villa El Salvador, La Molina, Ventanilla y Ancón. Aisladamente, se encuentran zonas conformadas por depósitos de desmonte o basura, que antiguamente fueron áreas de rellenos sanitarios y que en la actualidad han sido urbanizados.

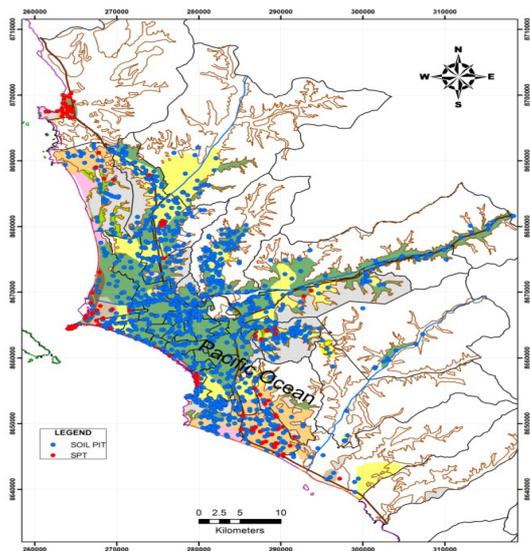


Figura 2: Ubicación de exploraciones geotécnicas.

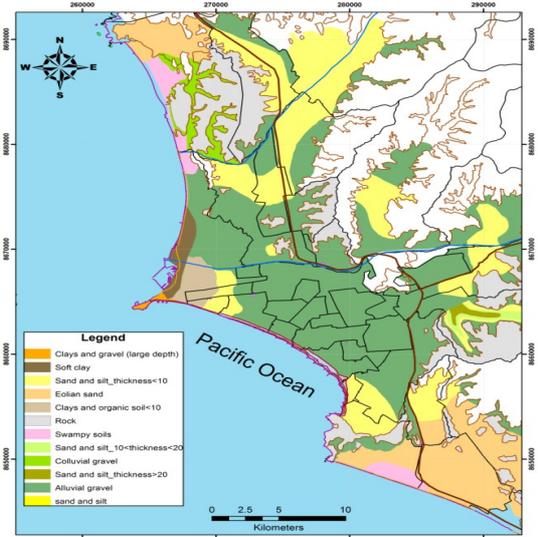


Figura 3: Plano de Tipo de Suelo (CISMID, 2004)

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS SUELOS

Las características dinámicas de los suelos han sido determinadas mediante métodos geofísicos. En la actualidad, el uso de estos métodos se ha incrementado grandemente, debido principalmente a su facilidad de ejecución, así como a la gran cantidad de información que éstos brindan. Su mayor aplicación está dirigido a determinar el periodo de vibración natural del suelo, el cual se realiza mediante la medición de microtrepidaciones en la superficie del terreno; sin embargo actualmente el uso de métodos de medición de ondas superficiales en arreglos se ha hecho popular para determinar los parámetros dinámicos del suelo, lo cual es de mucha utilidad para los estudios de microzonificación sísmica y el modelamiento dinámico del suelo para analizar su respuesta ante sollicitaciones sísmicas.

Medición de Microtrepidaciones:

La medición de microtrepidaciones consiste en registrar las vibraciones ambientales generadas por fuentes naturales o artificiales, en la superficie del suelo. Las microtrepidaciones presentan períodos que fluctúan generalmente entre 0.05 y 2 segundos y amplitudes que varían de 0.1 a 1 micrones. Esta técnica fue propuesta por Omori (1908) y desarrollada por Kanai (1946) para determinar el comportamiento dinámico del suelo. Actualmente, esta técnica es ampliamente aplicada en los estudios de microzonificación sísmica y para su procesamiento se utiliza con frecuencia la metodología establecida por Nakamura (1989), que consiste en determinar la relación espectral de las componentes horizontales con respecto a la componente vertical. Este procedimiento permite eliminar el efecto de la fuente en la respuesta del suelo y de esta forma determinar con mayor propiedad su comportamiento dinámico en el sitio de análisis.

En la ciudad de Lima, a lo largo de las diversas campañas de mediciones de microtrepidaciones, se han logrado acumular un gran número de mediciones puntuales, tal como se muestra en el Mapa de Ubicación de Ensayos de Microtrepidaciones, que se presenta en la Figura 4. El procesamiento y análisis de esta información ha permitido elaborar el Mapa de Isoperiodos de la Ciudad de Lima, que se muestra en la Figura 5, en el cual se han definido zonas de suelos con comportamientos dinámicos similares en función del periodo de vibración natural determinado por el método de Nakamura.

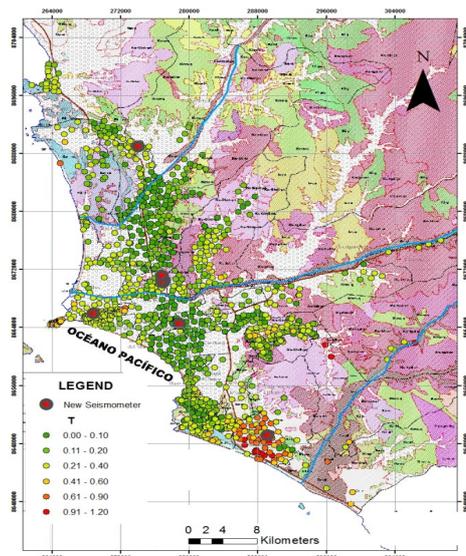


Figura 4: Plano ubicación de puntos de microtremores en la Ciudad de Lima.

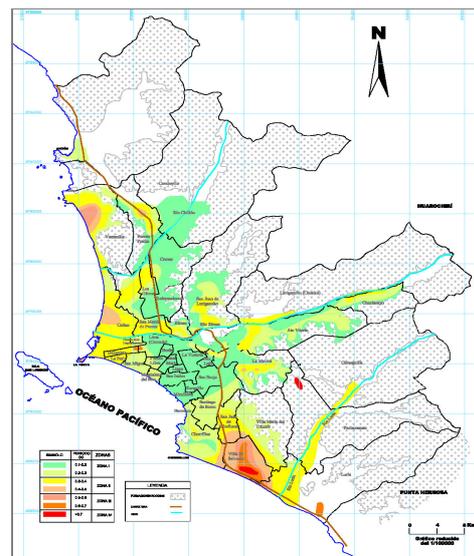


Figura 5: Mapa de zonas de isoperiodos en la Ciudad de Lima.(CISMID,2004)

Los resultados de los periodos de vibración natural obtenidos con este procedimiento muestran una buena correspondencia con las características geológicas, tal como se muestra en la Figura 6, donde se pueden observar los resultados de dos mediciones de microtrepidaciones, uno en terreno firme, cerca de la ladera de un cerro y otro en un depósito de arena de gran potencia, localizado en el cerro Lomo de Corvina de Villa el Salvador.

Determinación de los Perfiles de Ondas de Corte

Para la determinación de los parámetros dinámicos del suelo en la actualidad se utilizan métodos geofísicos pasivos o activos, que se basan en la medición de las ondas superficiales. La mayoría de estos métodos involucran a las ondas Rayleigh para su análisis, utilizando para ello la teoría de dispersión de ondas en medios estratificados. Uno de los pioneros de estos métodos es Aki (1957), quien propuso el método de Autocorrelación Espacial (SPAC), posteriormente, Capón (1969) propuso el método del Análisis Espectral de Alta Resolución Frecuencia – Número de onda (F-K), así mismo, Nazarian et al. (1983) con el método llamado Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW).

Tokimatsu (1992) contribuyó al estudio de los métodos activos de ondas superficiales y Park et al., (1999a; 1999b), tomando como base el método activo de ondas superficiales de Tokimatsu, propuso el método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW). Finalmente, Okada (2003) planteó el método de Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanales (MAM) utilizando las microtrepidaciones de periodo largo.



Figura 6: Puntos de microtrepidaciones medidos en Villa El Salvador. Se observa una clara relación de la geología con los valores obtenidos.

En la ciudad de Lima, con la finalidad de obtener el perfil de ondas de corte, se realizaron una serie de ensayos de medición de microtrepidaciones en arreglos, los cuales tuvieron radios de hasta 1000m de longitud, que permitieron explorar el suelo hasta una profundidad de 1000 m. Las Figuras 7 y 8 muestran respectivamente el plano de ubicación y los perfiles de ondas de corte determinados.

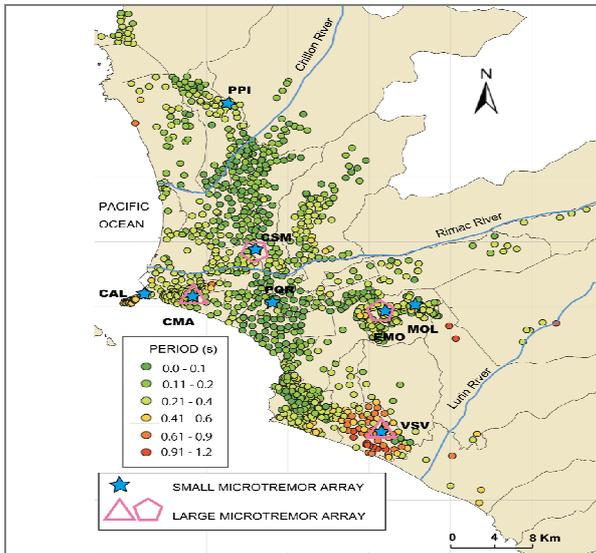


Figura 7: Plano ubicación de arreglos de microtremores en la Ciudad de Lima.

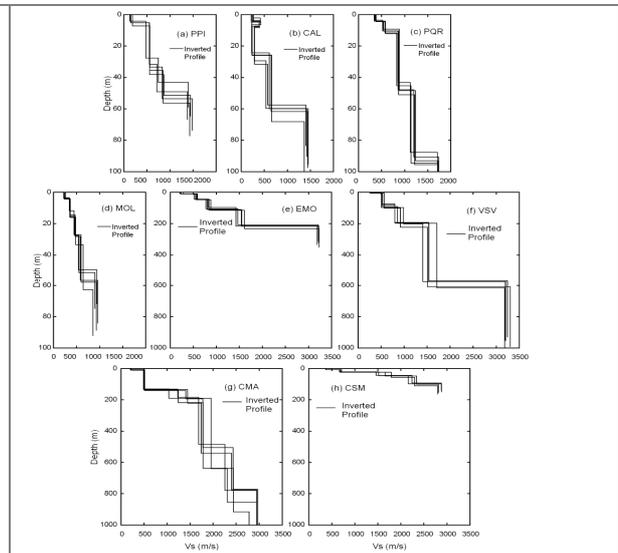


Figura 8:Perfiles de ondas de corte obtenidos en la ciudad de Lima. (Calderón, 2011)

ÁREAS DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI

La ciudad de Lima ha sido afectada por grandes tsunamis a lo largo de su historia. De acuerdo a la información histórica de los grandes terremotos que han afectado esta ciudad, el terremoto de 1746 ha generado olas de hasta 13 m de altura (Silgado, 1978). En consecuencia, este fenómeno constituye un importante factor que incrementa la amenaza sísmica de la ciudad de Lima.

Para evaluar el nivel de peligro que representa la ocurrencia de un tsunami en el litoral de la ciudad de Lima, CISMID (2011) realizó una evaluación de las áreas de inundación por Tsunami considerando tres escenarios sísmicos, con magnitudes de Mw8.0, Mw 8.5 y Mw8.7. Los parámetros sísmicos de localización y profundidad fueron estimados en base a la información sísmica del periodo de 1973 a 2010. Los resultados muestran que para el sismo más severo, la altura de la ola que puede generar el tsunami alcanza hasta 10.0 m. La Figura 7 muestra el área de inundación que genera esta ola en el litoral, donde se observa que las zonas más afectadas son los distritos de Ventanilla, Callao, Chorrillos, Villa El Salvador y Lurín. En la zona de los acantilados de la costa verde, si bien no existe peligro de inundación, se pueden generar derrumbes e inestabilidad de taludes, fenómeno que no ha sido considerado en este estudio.

ZONIFICACIÓN SÍSMICA

Se ha identificado cuatro zonas en el mapa de microzonificación sísmica. Las zonas I, II, III y IV reflejan el comportamiento geotécnico y sísmico del suelo. También se observa la Zona de Inundación por Tsunami con olas de hasta 10 m.

ZONA I: Conformada por afloramientos rocosos y estratos de grava potentes que integran los conos de deyección de los ríos Rímac y Chillón, y estratos de grava coluvial-eluvial de los pies de las laderas, que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. La capacidad de carga admisible para una cimentación corrida de 0.60m de ancho varía de 2.0 a 4.0 Kg/cm² a la



profundidad de cimentación de 0.80 a 1.20m. El comportamiento dinámico del material es adecuado, no se espera que incremente el nivel de peligro sísmico estimado. Los periodos de oscilación del suelo varían de 0.10 a 0.20s.

ZONA II: Está conformada por materiales arenosos finos y/o alternancias de suelos finos cohesivos y no cohesivos, cuyas potencias varían entre 3.0 y 10.0m. Subyaciendo a estos estratos se encuentra la grava aluvial o grava coluvial. Considerando una cimentación corrida de 0.60m de ancho se obtienen valores de capacidad portante de 1.20 a 2.0kg/cm² a la profundidad de cimentación de 0.80 a 1.50m. En esta zona se espera un incremento moderado del nivel de peligro sísmico estimado por efecto del comportamiento dinámico del suelo. Los periodos dominantes del suelo tienen valores de 0.20s a 0.50s.

ZONA III: Está conformada por arcillas altamente plásticas y arenas eólicas de gran potencia que se encuentran en estado suelto. El terreno de cimentación está conformado por suelos finos y suelos arcillosos de alta plasticidad y arenas finas medio sueltas. Los valores de capacidad de carga de 0.90 a 1.20kg/cm², considerando una cimentación corrida de 0.60m de ancho a la profundidad de cimentación de 0.80 a 1.50m. Se espera un incremento severo del nivel de peligro sísmico estimado por efecto del comportamiento dinámico del suelo. Los periodos dominantes del suelo tienen valores de 0.50 a 0.70s.

ZONA IV: Está asociada a suelos que presentan un comportamiento especial, como alta comprensibilidad en las zonas pantanosas, licuación de suelos en las arenas sueltas saturadas. Se incluye las aéreas así con taludes de fuerte pendiente que se localizan en las laderas de los cerros. En esta zona existe un potencial alto de peligro de deslizamiento de detritos y lodos, derrumbes y caídas de rocas que están condicionadas a las precipitaciones pluviales y a la ocurrencia de sismos. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos son mayores que 0.70s.

ZONA DE INUNDACION POR TSUNAMI: Zona de probable inundación con olas de hasta 10metros de altura. Se recomienda la rápida evacuación a zonas altas y/o identificación de edificaciones para la evacuación vertical.

CONCLUSIONES

- Se ha logrado un importante avance en el desarrollo de la microzonificación sísmica de Lima, incorporando una valiosa información de la conformación de la estructura superficial del suelo, generada en el marco del proyecto SATREPS “Enhancement of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technology”, que vienen desarrollando el CISMID con la Universidad de Chiba, Japón y otras instituciones.
- En la actualidad se viene incrementando la calidad de la información mediante estudios de detalle que se están elaborando mediante convenios con el Ministerio de Vivienda, a través de su programa Mis Ciudades. Los resultados de estas investigaciones se irán incorporando al mapa de microzonificación sísmica en el futuro.
- El mapa de microzonificación sísmica desarrollado, muestra que en la ciudad de Lima existen zonas con suelos que presentan comportamientos anómalos ante las sollicitaciones de las fuerzas sísmicas, donde se espera un mayor nivel de daño a las edificaciones; en consecuencia, este mapa debe ser considerado por las autoridades locales para elaborar sus planes de gestión y ordenamiento territorial.

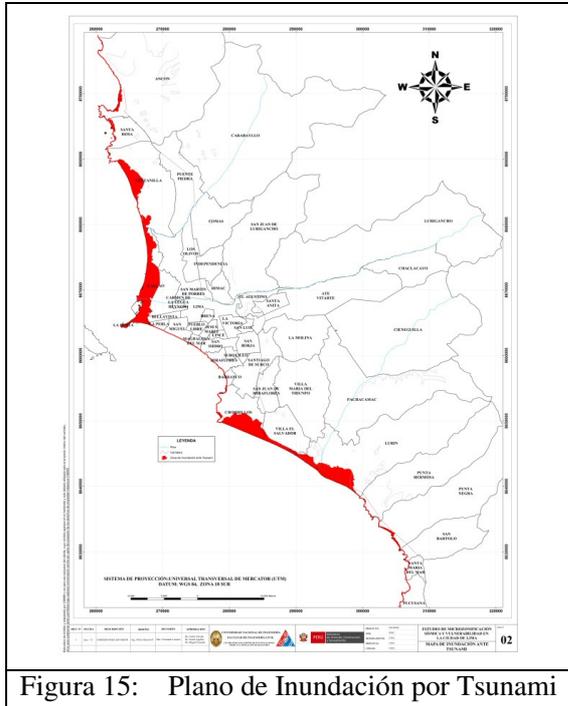


Figura 15: Plano de Inundación por Tsunami

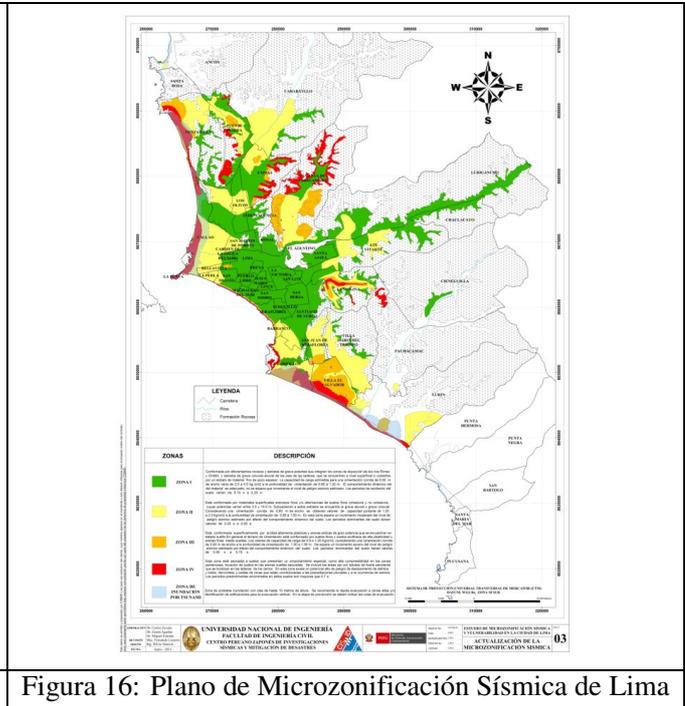


Figura 16: Plano de Microzonificación Sísmica de Lima

REFERENCIAS

- Bard, P. (1998), "Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation? The effects of Surface Geology on Seismic Motion", Irikura, Kudo, Okada y Sasatani (eds), 1251-1279.
- Calderon, J., Sekiguchi, T., Aguilar, Z., Lazares, F. y Nakai, S., (2011), "Dynamic Characteristics of the Surface Soils in Lima", Proc., Eighth International Conference on Urban Earthquake Engineering. Tokyo, Japan.
- CISMID (2004), "Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de 32 distritos de Lima y Callao". Informe Técnico, Lima, Perú.
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface". Quarterly Report Railway Technology. Research Institute, Vol. 30. N°3. pags. 25-30.
- Park, C., Miller, R. y Xía, J. 1999, "Multichannel analysis of surface waves". Geophysics. Vol. 64. N° 3. p: 800-808.
- Park, C., R. D. Miller, and J. Xia, Julian M. (1999), "Multichannel Analysis of Surface Waves to Map Bedrock", Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, U.S.
- Silgado E. (1978), "Historia de los Sismos más Notables Ocurredos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minería, Boletín N°3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.
- Tokimatsu K., Miyadera Y. and Kuwayama S. (1992a), Determination of Shear Wave Velocity Structures from Spectrum Analyses of Short-Period Microtremors, Proc., 10th World Conf. on Earthquake Engrg., 1, , 253-258.