



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto  
Geofísico del Perú - IGP

Ciencias de la Tierra  
Sólida - CTS



## ACTUALIZACIÓN DEL ESCENARIO POR SISMO, TSUNAMI Y EXPOSICIÓN EN LA REGIÓN CENTRAL DEL PERÚ

Hernando Tavera

Lima - Perú

Enero - 2017



*Hernando Tavera*  
*Investigador Científico*  
*Instituto Geofísico del Perú*

*Hernando.tavera@igp.gob.pe*

## RESÚMEN

El presente informe es elaborado a solicitud de CENEPRED y tiene por objetivo analizar los aportes técnicos-científicos realizados a la fecha, sobre el pronóstico y características del posible sismo que podría afectar al borde occidental de la región central del Perú. En general, el análisis espacial de la sismicidad muestra una notable disminución en la frecuencia de ocurrencia de sismos frente a la costa de los departamentos de Lima, Moquegua y Tacna, lo cual sugiere que en dichas áreas de viene acumulando energía a liberarse en algún momento en el tiempo. Por otro lado, los estudios recientes realizados usando datos de GPS, muestran la presencia de áreas de acoplamiento sísmico máximo o aspereza sobre la superficie de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana, coincidiendo su ubicación con las áreas con ausencia de sismicidad. Frente al departamento de Lima, la aspereza tiene un área de 400x150 km<sup>2</sup>. El desplazamiento a producirse y la energía a liberarse podría dar origen a un sismo con magnitud igual o mayor a 8.8 Mw, similar en tamaño al ocurrido frente a la zona costera de la ciudad de Concepción (Chile) en el año 2010.

Considerando las características de este sismo probable, se ha obtenido los registros de aceleración teóricos para las áreas urbanas de Lima Metropolitana y El Callao, y los resultados sugieren que ambas podrían ser afectadas con aceleraciones superiores a 500 cm/s<sup>2</sup> (sacudimiento del suelo). Asimismo, las simulaciones numéricas realizadas para proponer escenarios de tsunami indican que los distritos y/o zonas de alta vulnerabilidad son Ventanilla, El Callao, La Punta, Chorrillos y Lurín.

## ÍNDICE

### RESÚMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- LAGUNAS SÍSMICAS

3.- ÁREAS DE ACOPLAMIENTO MÁXIMO

4.- NIVELES DE SACUDIMIENTO DEL SUELO

5.- RIESGO POR EXPOSICIÓN

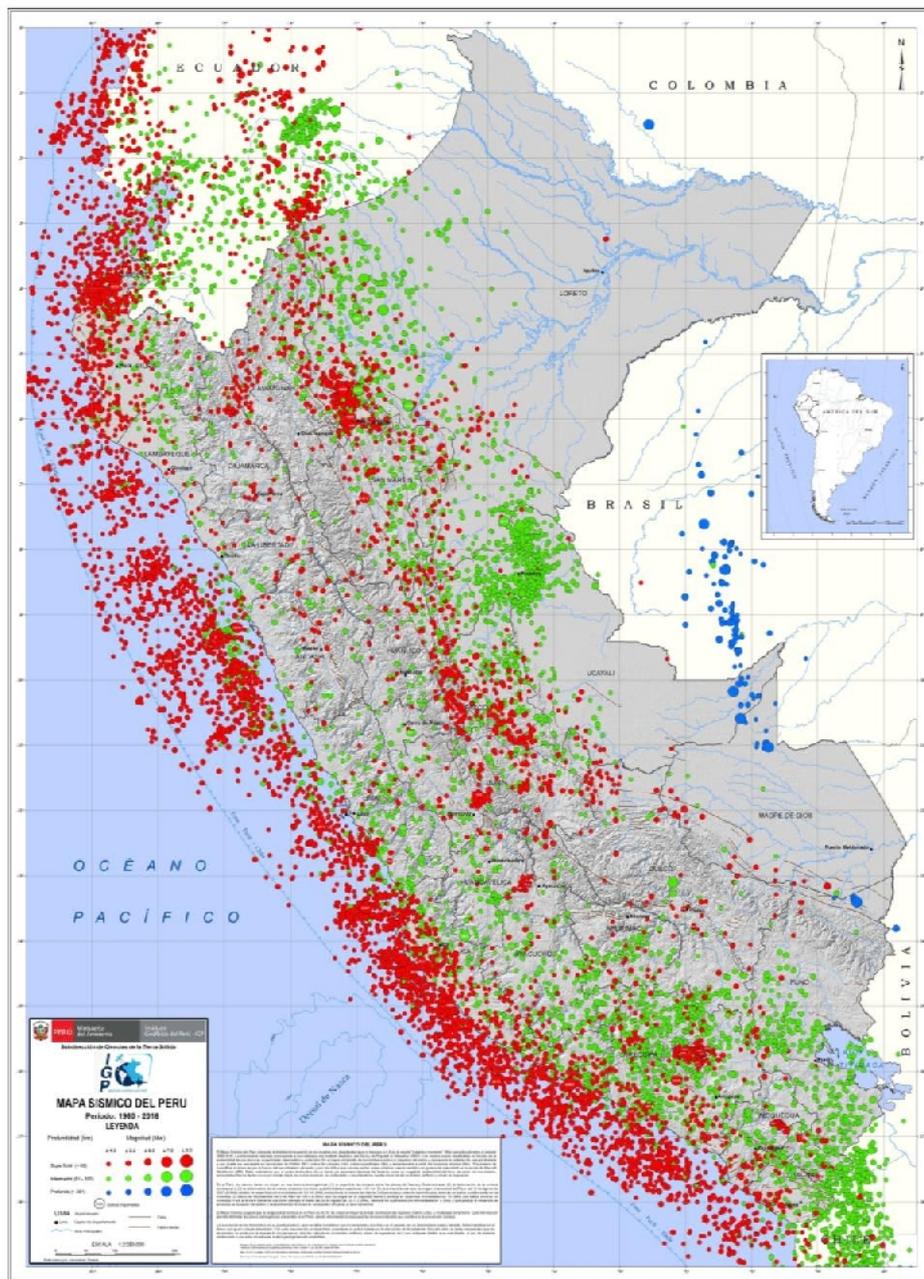
6.- ESCENARIO DE TSUNAMI

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

## 1.- INTRODUCCIÓN

El responsable de la actual geodinámica y geomorfología de todo el territorio peruano es el proceso de convergencia entre la placa de Nazca (oceánica) y la Sudamericana (continental) con velocidades promedio del orden de 7-8 centímetros por año (DeMets et al, 1980; Norabuena et al, 1999). Este proceso genera sismos de diversas magnitudes y focos ubicados a diferentes profundidades, siendo los mayores quienes producen, en áreas urbanas, diversos niveles de daño estructural y pérdida de vidas humanas. En general, se puede afirmar que toda la población peruana ha sido testigo en el tiempo de la ocurrencia continua de estos sismos (Figura 1).



**Figura 1:** Mapa Sismico del Perú para el periodo 1960 - 2016. La magnitud de los sismos es diferenciado por el tamaño de los círculos y la profundidad de sus focos por el color de los mismos. Los círculos con número inscrito en su interior indican la ubicación y año de ocurrencia de los sismos de mayor magnitud e intensidad.

En el Perú, la distribución espacial de los sismos ha permitido definir la existencia de tres principales fuentes sismogénicas (Figura 2):

- *La primera y más importante fuente, la constituye la superficie de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana, presente en el borde occidental del Perú. Esta fuente ha dado origen, en el pasado, a los más importantes sismos ( $M > 7.0$  Mw), en cuanto a su magnitud, intensidad y niveles de destrucción en superficie. Muchos de estos eventos fueron acompañados de tsunamis que incrementaron el daño, principalmente en zonas costeras. Por lo tanto, es de interés conocer los periodos de retorno de estos eventos o en el mejor de los casos, a ubicación espacial de las áreas que se encuentran en actual estado de acumulación de deformación y energía, ya que ellas serían las causantes de un nuevo sismo en el futuro.*

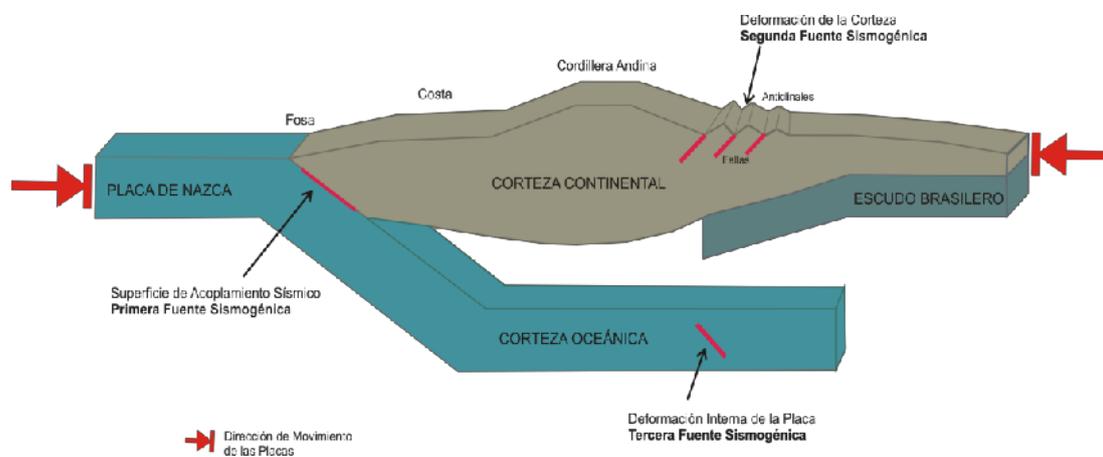


Figura 2: Esquema que muestra la geometría de la subducción y la ubicación de las principales fuentes sismogénicas en el Perú.

- *La segunda fuente, considera la deformación superficial de la corteza continental con la presencia de fallas geológicas de diversas geometrías y dimensiones. Esta fuente genera sismos de magnitud moderada ( $M > 7.0$  Mw), pero estos al ocurrir cerca de las áreas urbanas y ha escasos niveles de profundidad, producen daños y destrucción similar a los grandes sismos con origen en primera fuente sismogénica.*
- *La tercera fuente, corresponde a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo de la cordillera de los Andes a niveles de profundidad del orden de 100 km a más. En general, esta fuente ha dado origen a sismos de magnitudes moderadas que han producido en superficie procesos de licuación de suelos en los valles de las zonas andinas y subandinas ( $M < 7.0$  Mw).*

-----  
Mw= Magnitud momento

Los estudios orientados a conocer la periodicidad de los sismos de gran magnitud en el mundo y sobre todo en América del Sur no son muchos, debido principalmente a la poca disponibilidad de información o en todo caso, a la no ocurrencia de un mayor número de sismos de elevada magnitud y cuya información pueda ser utilizada en dichos estudios. Sin embargo, desde los años 70 la comunidad científica ha propuesto la existencia de métodos de predicción sísmica a corto, mediano y largo plazo, siendo este último el que ha encontrado mayor sustento técnico-científico y amplia aplicación en el mundo para el pronóstico de sismos de gran magnitud.

La predicción a largo plazo (pronóstico) pretende conocer la ubicación geográfica de las áreas en las cuales se tiene ausencia de sismos de gran magnitud en las últimas décadas o siglos, siendo conocidas como "Lagunas Sísmicas". Recientemente, la disponibilidad de datos de GPS (Global Positioning System) provenientes de estaciones de monitoreo instaladas en zonas costeras, han permitido recolectar información sobre la dinámica de las placas tectónicas y con ella, identificar la ubicación de las zonas que no experimentan movimiento, lo cual explicaría la ausencia de sismicidad debido al proceso de acumulación de deformación y energía que sería liberada con la ocurrencia de un sismo de gran magnitud. En este caso, las zonas son conocidas como "zonas de acoplamiento sísmico máximo". Previo a la ocurrencia de los sismos de Chile (2010), Japón (2011) y Ecuador (2016), estas zonas fueron identificadas, restando únicamente conocer la fecha de ocurrencia, parámetro hasta hoy, difícil de determinarse.

En este informe se detalla los avances en el conocimiento del pronóstico sísmico en el Perú, desde la identificación de las lagunas sísmicas hasta la ubicación y geometría de las zonas de acoplamiento sísmico o asperezas que podrían dar lugar al próximo sismo de gran magnitud en nuestro país. Asimismo, se hace uso de la información del CENSO 2007 (INEI) para realizar un estimado el número de distritos, viviendas y población que podrían ser afectadas considerando las isosistas del sismo de 1746. El detalle de las fuentes consultadas se presenta en la lista bibliográfica que acompaña al presente documento técnico.

## 2. - LAGUNAS SÍSMICAS

El concepto de lagunas sísmicas considera aquellas zonas que en el pasado han experimentado la ocurrencia de grandes sismos y que a la fecha, después de haber transcurrido varias décadas o siglos, estos aún no se repiten, situación temporal que incrementa su probabilidad de ocurrencia. Para el caso del borde occidental del Perú, existen estudios iniciales propuestos por Kelleher (1972), Kelleher y McCann (1976), McCann et al. (1979), Nishenko (1985), Kagan y Jacson (1991) utilizando la información histórica. Posteriormente, Tavera y Bernal (2005) recopilan y actualizan la información sobre las áreas de ruptura asociadas a la ocurrencia de grandes sismos en el borde occidental del Perú y Chile, y sus resultados se muestran en la Figura 3.

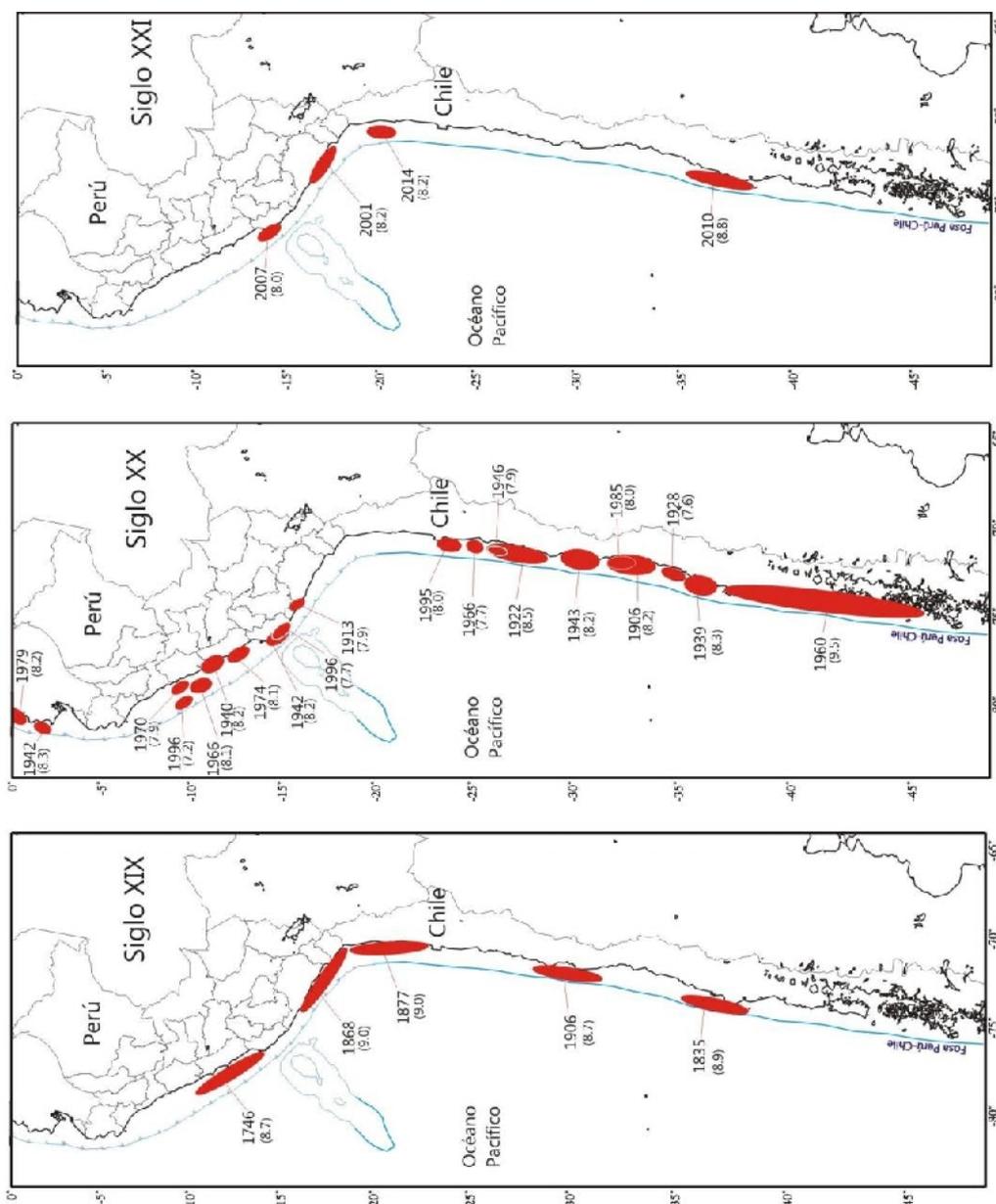


Figura 3: Borde occidental de Perú y Chile, y distribución de áreas de ruptura y lagunas sísmicas durante los siglos XIX, XX y XXI. La magnitud de los sismos está expresada en la escala de magnitud momento (Mw). (Tavera y Bernal, 2005).

De acuerdo a la Figura 3, en la región central del borde occidental del Perú se ha identificado la presencia de una laguna sísmica que viene acumulando energía desde el año 1746 (270 años a la fecha). Los sismos ocurridos en los años 1940, 1966, 1974 y 2007 (magnitudes igual o menores a 8,0 Mw), habrían liberado parcialmente la energía acumulada, restando por liberarse cerca del 70% de esta energía. Para la región sur, la laguna sísmica viene del año 1868 (148 años a la fecha), fecha en que ocurrió el sismo de mayor magnitud que afectó esta región y aún no se repite. El sismo del 2001 (8,2 Mw) habría liberado parte de la energía acumulada en esta región (~60%). Para la región norte del Perú, no existe información histórica sobre grandes sismos, tan solo se menciona al ocurrido en el año 1619 como uno de los mayores, pero no se puede afirmar si falta información o es que realmente no es frecuente la ocurrencia de sismos de gran magnitud en esta región. Para la región norte de Chile, la laguna sísmica está presente desde el año 1877 (139 años a la fecha), siendo el único evento sísmico histórico identificado para esta región. Los recientes sismos ocurridos en los años 2014 y 2015 (8.0 Mw) habrían liberado parte de la energía que se venía acumulando en esta región.

En general, cuando se observa sobre un mapa la distribución de los sismos ocurridos en los últimos 100 años en el mundo, es fácil darse cuenta que más del 80% de ellos ocurrieron alrededor del Océano Pacífico (Figura 4); es decir, que los de mayor magnitud afectaron a todos los países costeros, tal es el caso del Perú (ver Figura 1). Todos estos sismos se producen por la colisión frontal de una placa oceánica con una continental, ambas desplazándose a diferentes velocidades. Por otro lado, si la Tierra es dinámicamente activa, entonces los sismos deben seguir un proceso cíclico; por lo tanto, es de esperarse que los próximos grandes sismos vuelvan a producirse en la misma región y afectando a los mismos países. Según la Figura 4, el otro 20% de sismos ocurre en la zona conocida como "Cinturón Alpino - Himalayo" y abarca a los países de España, norte del África, Italia, Grecia, China, entre otros.



Figura 4: Mapa de sismicidad global y ubicación de las principales fuentes sismogénicas en el mundo

### 3.- ÁREAS DE ACOPLAMIENTO MÁXIMO

Con el desarrollo de la instrumentación geofísica, los nuevos equipos GPS (Global Positioning System) son capaces de registrar con precisión los desplazamientos mínimos de la corteza terrestre. Por otro lado, se han propuesto nuevas metodologías de investigación que han permitido utilizar dicha información en el pronóstico de sismos de gran magnitud con bastante éxito a nivel mundial. Debe entenderse que dentro del proceso de colisión de placas, la Sudamericana se desplaza milimétricamente sobre la de Nazca en dirección Oeste (hacia el mar). En este contexto, si las placas no se desplazan se asume que ellas están trabadas y por ende acumulando deformación y esfuerzos que se liberaran instantáneamente cuando sobrepasan el límite de resistencia de las placas al desplazamiento. Entonces, al saber dónde están las placas trabadas, es conocer dónde ocurrirán los próximos sismos. Pero este escenario solo es válido para sismos que puedan presentar magnitudes superiores a 7.0 Mw debido a que se requiere mayor tiempo de acumulación de esfuerzos y por ende, pueden ser visibles e identificados en el tiempo. Para sismos de menor magnitud, no es posible debido a que los desplazamientos son al milímetro y requieren minutos como periodos de tiempo.

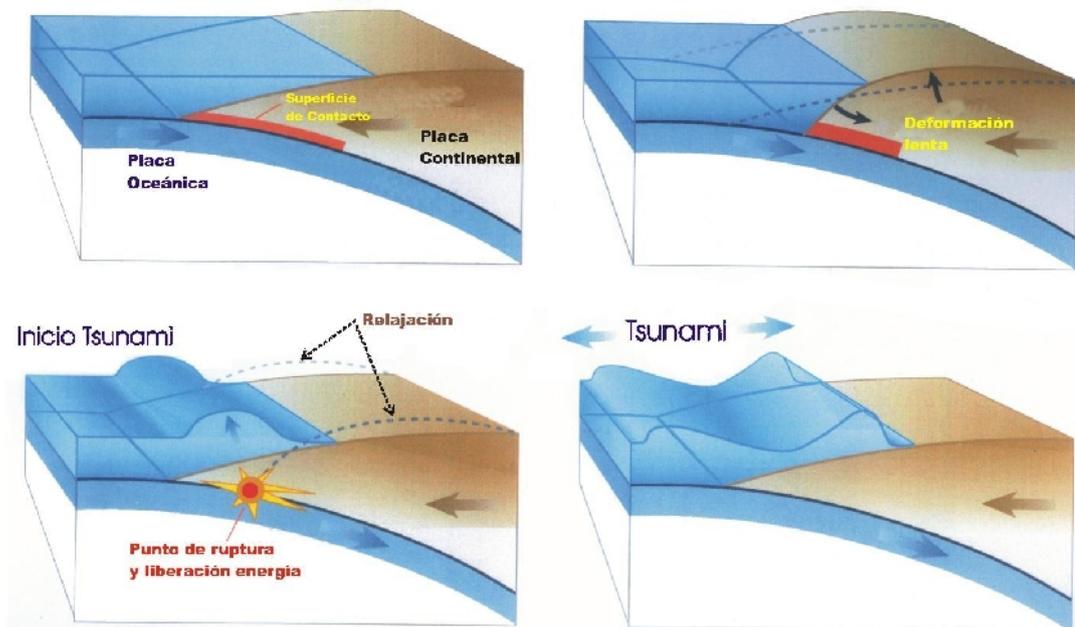


Figura 4: Esquema que muestra la convergencia de placas en el borde occidental del Perú y el proceso de generación de sismos y tsunamis. La línea en rojo representa al área de acoplamiento sísmico o aspereza. El proceso de subducción deforma el borde continental hasta un máximo de resistencia al desplazamiento y la energía acumulada es liberada con la ocurrencia del sismo y posterior tsunami.

La Figura 4, ilustra el proceso de acumulación de deformación y posterior liberación de los esfuerzos acumulados con la ocurrencia de un sismo. De instalarse una estación de GPS en un punto costero del Perú, las mediciones continuas deberían indicar el desplazamiento de la placa continental en dirección Oeste con una determinada velocidad, situación válida dentro el contexto de dinámica de placas. Si en alguna zona, los desplazamientos son nulos o se realizan en dirección contraria, debe entenderse que

las placas están trabadas con la consecuente acumulación de esfuerzos, que al liberarse darían origen a un sismo de gran magnitud y posterior tsunami. En la Figura 4, las placas están trabadas a lo largo de la línea roja que define a la "Zona de máximo acoplamiento sísmico" o aspereza y en donde se producirá el próximo sismo. De acuerdo a las dimensiones de la aspereza, el sismo podría alcanzar menor o mayor magnitud. Asimismo, a mayor periodo de acumulación de deformación, mayor será la energía a ser liberada por el sismo, y por ende el sismo tendría mayor magnitud.

Esta metodología ha sido aplicada en varias regiones del mundo con notable éxito y ha permitido identificar la ubicación de las zonas de mayor acoplamiento sísmico o asperezas que dieron origen a los sismos de Sumatra (2005, 2007), Chile (2010, 2014, 2015), Japón (2011), Pisco (2007) y Ecuador (2016). En el caso del Perú, los primeros estudios fueron realizados por Norabuena et al. (1998), Ocola y Ellis (1998), Ruegg et al. (2002), Ocola (2008) post-sismos de Nazca de 1996 y Arequipa 2001.

Recientemente, Chlieh et al. (2011) recolecta información de diversas campañas de GPS -(1998-2005)- realizadas entre la ciudad de Lima (Perú) y Antofagasta (Chile) a fin de analizarla y proceder a identificar la ubicación de las zonas de acoplamiento sísmico o asperezas asociadas a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana. Los resultados obtenidos por estos autores muestran la existencia de 4 zonas de máximo acoplamiento sísmico en el borde occidental de la región de estudio (Figura 5), todas con variadas geometrías y tamaños, siendo sus principales características las siguientes:

- *En la región central (A-1), existen dos asperezas que en conjunto forman un área cuyo eje mayor tiene una longitud de 350 km. De romperse estas asperezas podrían dar origen a un sismo de magnitud mayor a 8.5 Mw. Esta área de acoplamiento sísmico estaría asociada al terremoto de 1746.*
- *En la región sur (A-2), el área de acoplamiento sísmico se encuentra ubicada frente a la zona costera de las ciudades de Nazca y Yauca, y daría origen a un sismo de magnitud mayor a 7.5 Mw. El área estaría asociada al terremoto de 1913.*
- *En la región sur (A-3), el área de acoplamiento sísmico considera a la zona costera de los departamentos de Moquegua y Tacna, y correspondería a un sismo de magnitud mayor a 8.0 Mw. Esta aspereza estaría asociada al terremoto de 1868.*
- *En la región norte de Chile (A-4), el área de acoplamiento sísmico es mayor, ya que prácticamente considera la zona costera entre las ciudades de Arica y Antofagasta en Chile. El sismo tendría una magnitud superior a 8.5 Mw y estaría asociado al terremoto de 1877. Recientemente, en el extremo norte del área, cerca de la ciudad de Iquique, ocurrieron dos sismos de magnitud 8.0 Mw (2014*

y 2015) que habrían liberado parte de la energía acumulada, principalmente en el extremo norte del área de acoplamiento sísmico.

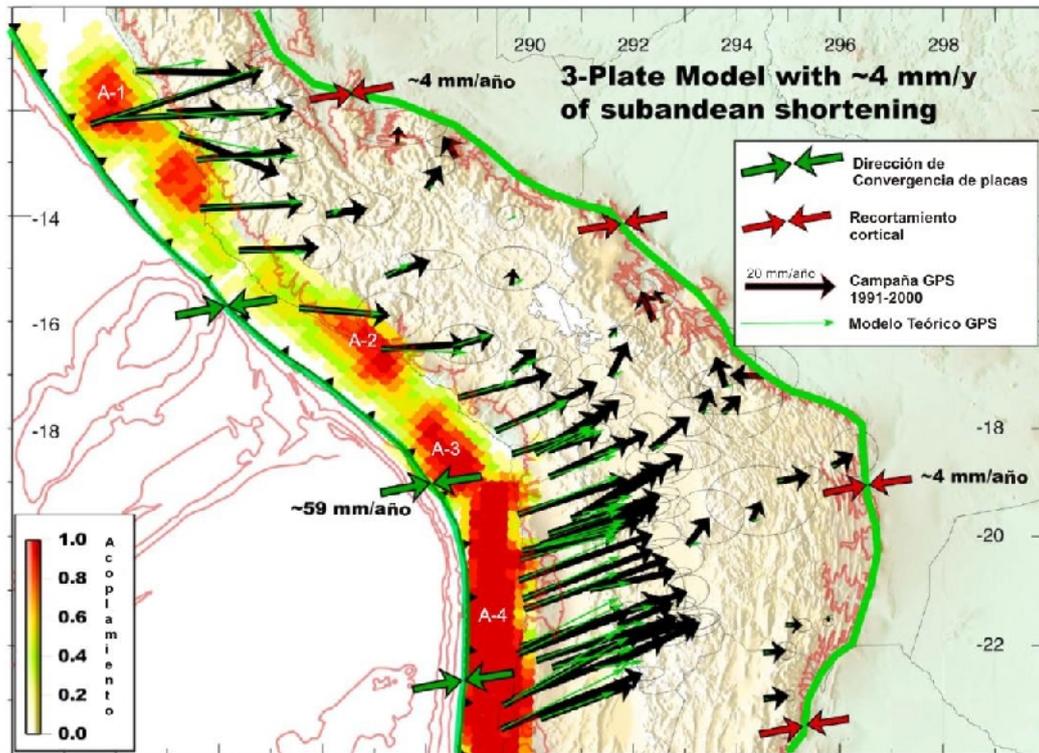


Figura 5: Mapa de zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS. Las flechas negras corresponden a las medidas de GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta 4 zonas de acoplamiento sísmico (Chlieh et al, 2011).

Posteriormente, Villegas-Lanza et al. (2016), realizan un estudio integral para todo el borde costero del Perú utilizando información de GPS recolectados hasta el año 2015, esto como parte de proyectos en cooperación con la Universidad de Nice (Francia). Los resultados obtenidos por estos autores permiten tener una mejor visión de las principales asperezas o zonas de acoplamiento sísmico existente en este momento en el borde occidental del Perú (Figura 6):

- *Región Norte (B-1), los vectores de desplazamiento indican el retroceso de la placa continental con una velocidad del orden de 4 mm/año. Esta velocidad muy baja podría ser debido a que el proceso de fricción de placas no está del todo acoplado y por lo tanto, existe una probabilidad muy baja de que se produzca en la región un sismo de gran magnitud. La inversión de los datos, permite identificar la presencia de una pequeña aspereza ubicada cerca de la fosa y que podría dar origen a un sismo de magnitud 7.0 Mw con la consecuente ocurrencia de un tsunami que llegaría a la zona costera en un margen de tiempo mayor a 1 hora, pudiendo causar daños, tal como ocurrió con el sismo y tsunamis de febrero de 1996.*

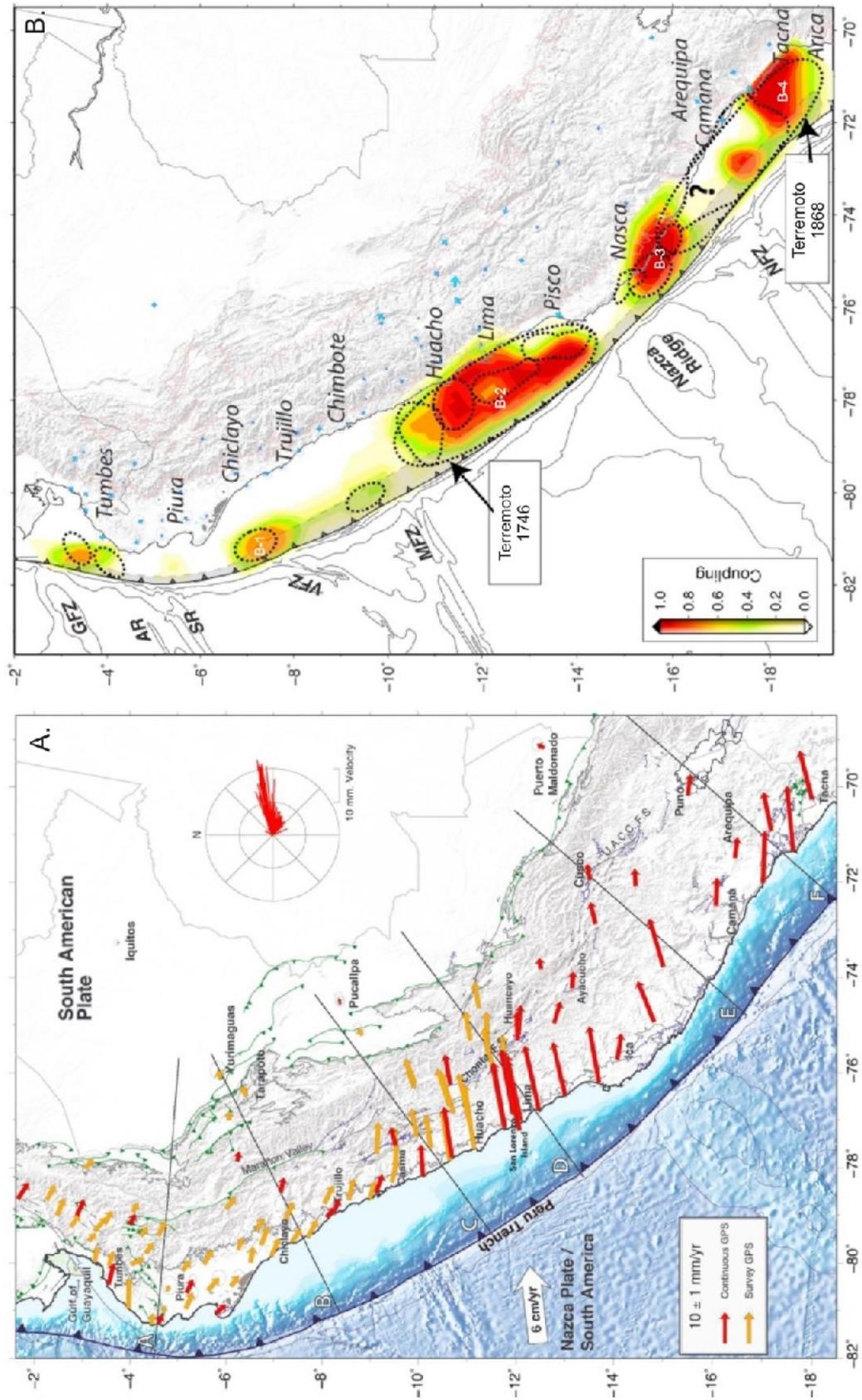


Figura 6: A) Distribución de vectores de desplazamiento obtenidos con datos GPS para el borde occidental del Perú. B) Distribución espacial de zonas de acoplamiento sísmico máximo (asperezas) en el borde occidental del Perú (Villegas-Lanza et al. 2016).

- *Región Central (B-2), aspereza de gran tamaño y cuyo eje mayor abarca desde la localidad de Huacho (Lima) por norte hasta Pisco (Ica) por el Sur, sobre una longitud de aproximadamente 400 km, siendo el área de mayor tamaño ubicada en el extremo norte de la aspereza. Esta zona de acoplamiento sísmico podría dar origen a un sismo de magnitud mayor a 8.5 Mw, similar al sismo ocurrido en el año 1746.*
- *Región Sur (B3 y B4): de estas asperezas, la ubicada al sur de la ciudad de Nazca podría dar origen a un sismo de magnitud 7.5 Mw y correspondería al sismo ocurrido en el año 1913. Por otro lado, la aspereza que se encuentra frente a la costa de Moquegua-Tacna, sería el remanente del sismo ocurrido en el año 2001 y que en conjunto, tendrían relación con el sismo ocurrido en el año 1868. Esta aspereza daría origen a un sismo de magnitud probable de 8.0 Mw.*

#### 4.- NIVELES DE SACUDIMIENTO DEL SUELO

Una vez conocido el escenario del posible sismo a ocurrir en el borde occidental de la región central del Perú, surge la inquietud de saber cuáles serían los niveles de sacudimiento del suelo que podría experimentarse en Lima Metropolitana y El Callao, si este sismo llegaría a ocurrir. En tal sentido, es importante conocer las características físicas de los suelos sobre el cual se encuentran ambas ciudades y para ello, el Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) como parte del proyecto "SATREPS" (Calderón et al, 2012), realizó varios ensayos geofísicos a fin de conocer la velocidad de las ondas sísmicas y los espesores de la capa sedimentaria presente en los distritos de Lima Metropolitana y El Callao. Esta información es por demás importante ya que en suelos blandos, las ondas sísmicas se amplifican y en duros, se atenúan. Entonces, conocer la calidad de los suelos ayuda a identificar en que distritos se podría esperar mayores niveles de sacudimiento del suelo. Para la base rocosa por debajo de Lima, se consideró los valores de velocidad para las ondas sísmicas obtenidos por Krabbenhoft et al. (2004) dentro del proyecto alemán de sísmica marina conocido con las siglas "GEOMAR".

Posteriormente, se construyó una malla teórica con nodos separados cada 5 km en los cuales hipotéticamente se instalaría una estación acelerométrica. Conocida la geometría de la aspereza, la velocidad de desplazamiento de las placas (6 cm/año), la magnitud del posible sismo, las propiedades geofísicas de los suelos y el déficit de desplazamiento acumulado desde el año 1746, se procedió a generar el sismo y evaluar los niveles de sacudimiento del suelo en términos de aceleración. Al final del proceso, los resultados obtenidos permiten conocer la aceleración del suelo considerando sus efectos de sitio. Los valores de aceleración obtenidos para cada nodo de la malla fueron interpolados, a fin de construir el mapa de la Figura 7 y los resultados obtenidos son los siguientes (Pulido et al. 2015):

- *De producirse el sismo frente al departamento de Lima con origen en la aspereza descrita en el capítulo 3, los suelos de la ciudad de Lima Metropolitana podrían demandar niveles de aceleración mayores a  $500 \text{ cm/s}^2$  y en El Callao, desde Ventanilla hasta la zona portuaria, del orden de  $700$  a  $900 \text{ cm/s}^2$ .*

Para tener una idea de estos valores, durante el terremoto de Pisco 2007 (8,0 Mw), en la ciudad de Ica se registraron niveles de sacudimiento del suelo del orden de  $400 \text{ cm/s}^2$  (aceleración) y en Lima se registró en promedio valores de  $80 \text{ cm/s}^2$ ; es decir, entre 6 y 11 veces menor del que podría producirse en Lima y El Callao si ocurriera el sismo indicado en el capítulo 3. En la ciudad de Santiago de Chile, durante el sismo del 2010 (8,8 Mw), las aceleraciones o niveles de sacudimiento del suelo llegaron a  $900 \text{ cm/s}^2$  y en Japón, durante el terremoto del 2011 (9,0 Mw), en algunas zonas se registraron aceleraciones del orden de  $1200 \text{ cm/s}^2$ . Entonces, los valores de aceleración descritos son posibles de producirse de ocurrir un sismo de gran magnitud.

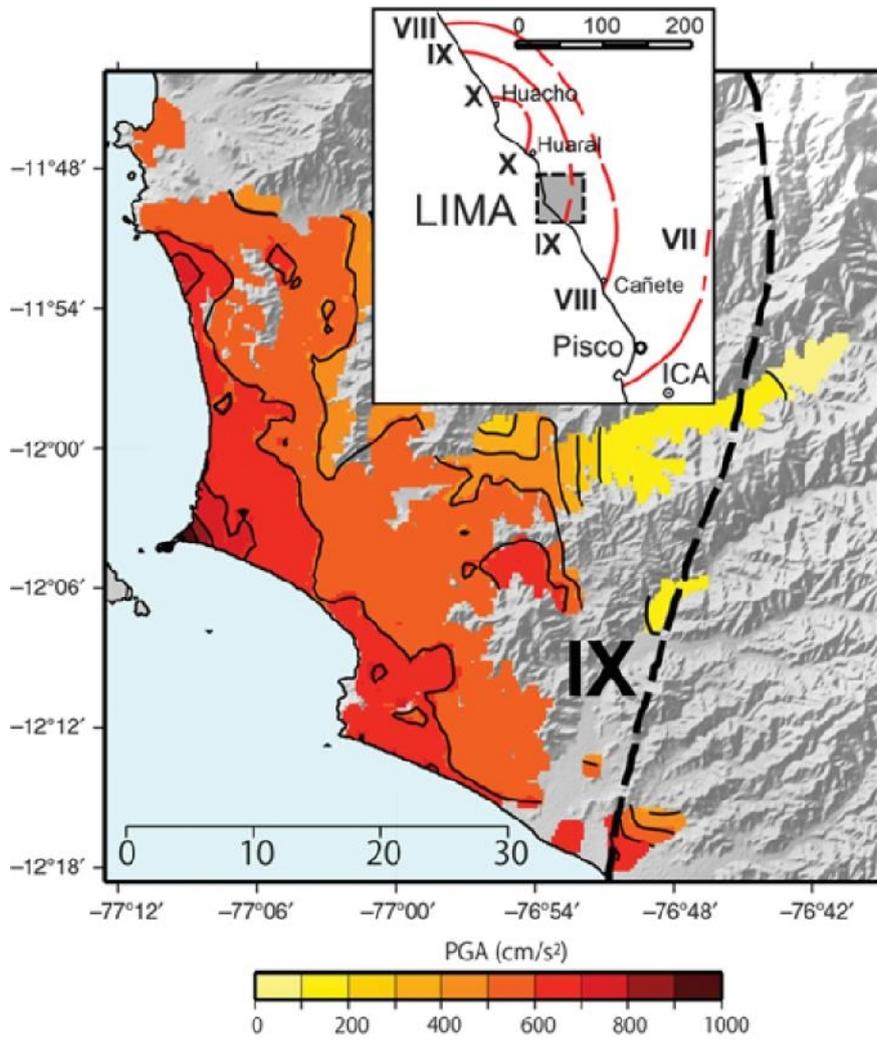


Figura 7: Valores máximos de aceleración para el sacudimiento del suelo en Lima Metropolitana y El Callao obtenido en la simulación numérica y expresados en  $cm/s^2$ . Obsérvese la ubicación del área de estudio con respecto al mapa de isosistas del sismo ocurrido en el año 1746 (Pulido et al, 2015).

## 5. - RIESGO POR EXPOSICIÓN

Tal como se indicó en el capítulo anterior, de producirse el sismo pronosticado en base a los resultados obtenidos con información sísmica y de GPS, los suelos de Lima Metropolitana y El Callao podrían soportar niveles e sacudimiento superiores de 500 cm/seg<sup>2</sup>, estando estos valores dentro de la isosista de intensidad IX (MM) propuesto por Silgado (1978) para el sismo ocurrido en el año 1746, tal como se muestra en la Figura 7 (Pulido et al, 2015). Esta correlación entre aceleraciones e intensidades es coherente con las escalas propuestas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Por otro lado, se puede aceptar que la zona de acoplamiento sísmico o aspereza identificada para la región central del Perú, correspondería al sismo repetitivo del ocurrido en esta región en el año de 1746; por lo tanto, este debería por lo menos generar los mismos valores de intensidad en la zona costera de esta región. Este escenario podría permitir, al menos, proponer el número de distritos, viviendas y población que podrían ser afectadas. En la Figura 8 se ha considerado el mapa de isosistas propuesto por Dorbath et al (1990) para el sismo de 1746 y la aspereza propuesta por Villegas-Lanza et al (2016). Por otro lado, de acuerdo a la experiencia de daños observados en viviendas y población, después de ocurridos los sismos de Arequipa (2001) y Pisco (2007), se puede concluir que estos se han producido en gran porcentaje hasta niveles de intensidad VII, según la escala de Mercalli Modificada (MM). Entonces, conocido el área de ruptura y el tamaño del sismo, así como las isosistas del sismo de 1746, es posible realizar una aproximación al escenario probable a presentarse. Como información complementaria se ha considerado el número de distritos, viviendas y población según el CENSO realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en el año 2007.

Tabla 1: Número de distritos, viviendas y población que podría ser afectados por un sismo de magnitud e intensidad similar al de 1746

Intensidades del sismo de 1746 (Dorbath et al. (1990)		
	VIII (MM)	VII - VIII (MM)
Distritos	161	701
Vivienda	2'330,829	3'770,671
Población	9'307,699	14'368,247

El traslape y correlación de la información antes indicada permite estimar el número de distritos, viviendas y población que podrían ser afectados de ocurrir un sismo con magnitud igual o mayor al del sismo de 1746. Según la Tabla 1, dentro del área de la isosista VIII (MM), podrían ser afectados 161 distritos, ~ 2 millones de viviendas y ~ 9 millones de personas. Al considerar el área de isosistas hasta la intensidad VII (MM), se podrían verse afectados 701 distritos, ~ 4 millones de viviendas y ~ 14 millones de personas. Es importante reiterar que en esta información no se detalla el tipo de daño que podría presentarse, pero como información "referencial" es válida para el tema de gestión del riesgo y debe ser considerada como tal.

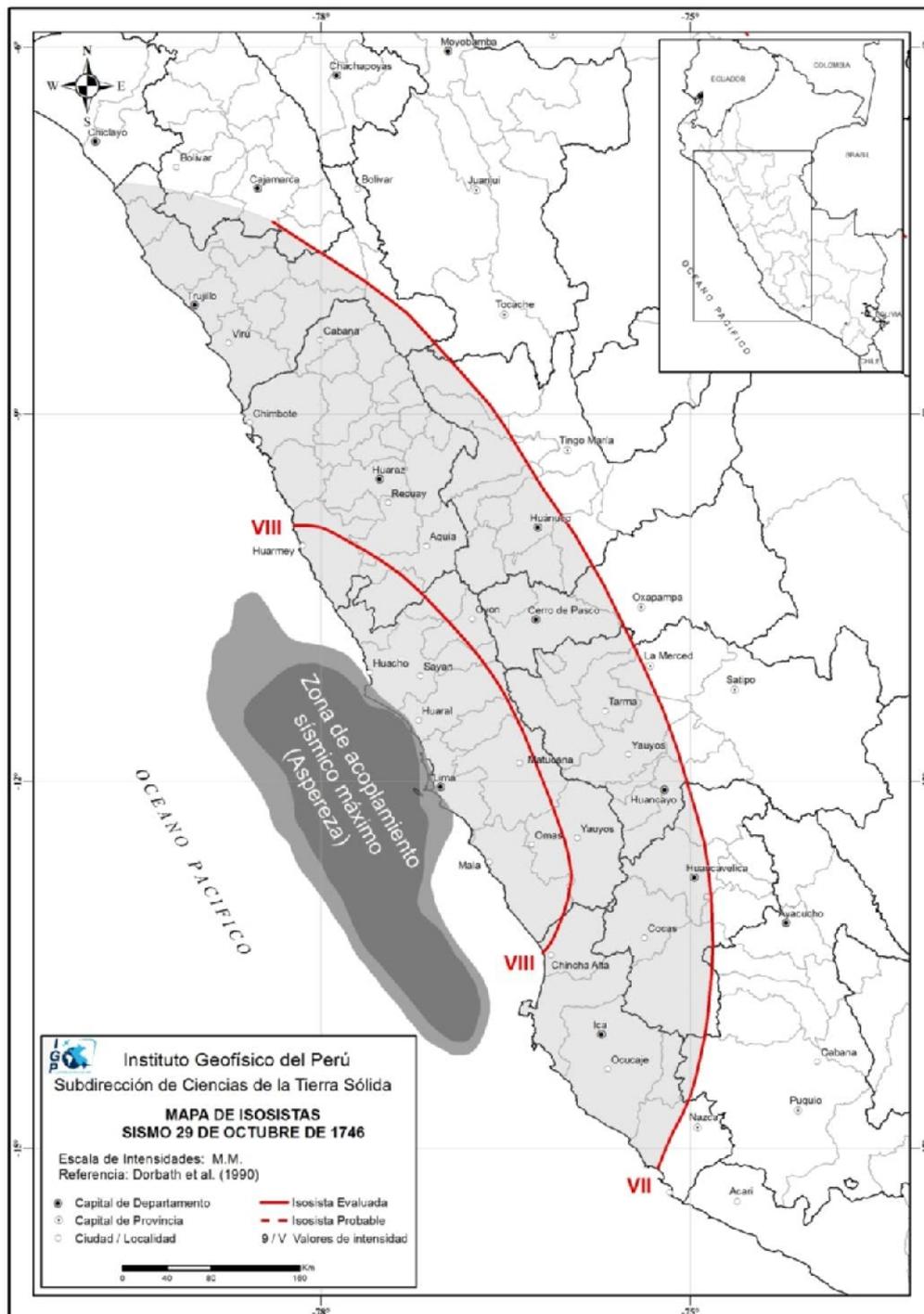


Figura 8: Mapa de isosistas del sismo de 1746 según Dorbath et al (1990). El área en gris corresponde a la Zona de acoplamiento sísmico máximo según Villegas-Lanza et al (2016). En gris claro, el área correspondiente a la intensidad VI (MM). (Fuente: Tavera et al, 2016).

## 6.- ESCENARIO DE TSUNAMI

Ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud con origen en el proceso de convergencia o choque de placas, son 3 los efectos secundarios más importantes que se producen:

- .- Tsunamis en zonas costeras.
- .- Deslizamientos en áreas con pendientes elevadas.
- .- Procesos de licuación en suelos blandos.

De estos efectos, históricamente el más dañino para la población han sido los tsunamis y por ello, es importante conocer las características de los futuros sismos a ocurrir a fin de proponer escenarios para los posibles tsunamis. Para este objetivo es necesario disponer de información básica como es: el modelo de fuente sísmica a considerar y los datos batimétricos y topográficos obtenidos con la mayor resolución posible, lo cual permitirá caracterizar con precisión el comportamiento del mar posterior a la ocurrencia del sismo. En este proceso, el algoritmo de mayor uso en los modelamientos numéricos y posterior construcción del escenario de tsunamis es el TUNAMI-N2 desarrollado y aplicado con éxito por investigadores japoneses.

A la fecha, el escenario de inundación por tsunami para la zona costera del departamento de Lima y El Callao de mayor uso es el propuesto por el Proyecto "Sistema de Información sobre Recursos para la Atención de Desastres (SIRAD) a cargo del INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil) - PNUD (Proyectos de Naciones Unidas para el Desarrollo) - ECHO (Departamento de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Comunidad Europea) y en el cual se consideró la posible ocurrencia de un sismo de magnitud 8.5 y 9.0 Mw frente a la costa central del Perú (Figura 9). Los principales aportes de este proyecto fueron:

- *Los distritos y/o zonas altamente vulnerables a la ocurrencia de un tsunami debido a su topografía y densidad poblacional serían: Ventanilla, Callao, La Punta, Chorrillos y Lurín. En estas zonas la inundación horizontal sería del orden de 1 a 2 km en el caso del tsunami generado por un sismo de magnitud 8.5 Mw. Para un sismo de magnitud 9.0 Mw, el tsunami podría alcanzar distancias máximas de 2 km en Chorrillos y de 3 km en Lurín.*
- *Los distritos y/o zonas medianamente vulnerables ante la ocurrencia de un tsunami serían Ancón, Santa Rosa, Villa El Salvador y Punta Negra. Los niveles de inundación serían menores a 500 metros. La vulnerabilidad podría ser mayor si el peligro se hace presente en verano por el incremento de población visitante.*
- *Los distritos y/o zonas menos vulnerables ante la ocurrencia de tsunami debido a su topografía serían: San Bartolo, Santa María, Pucusana. Este escenario podría variar en temporadas de verano debido al incremento de la población visitante.*

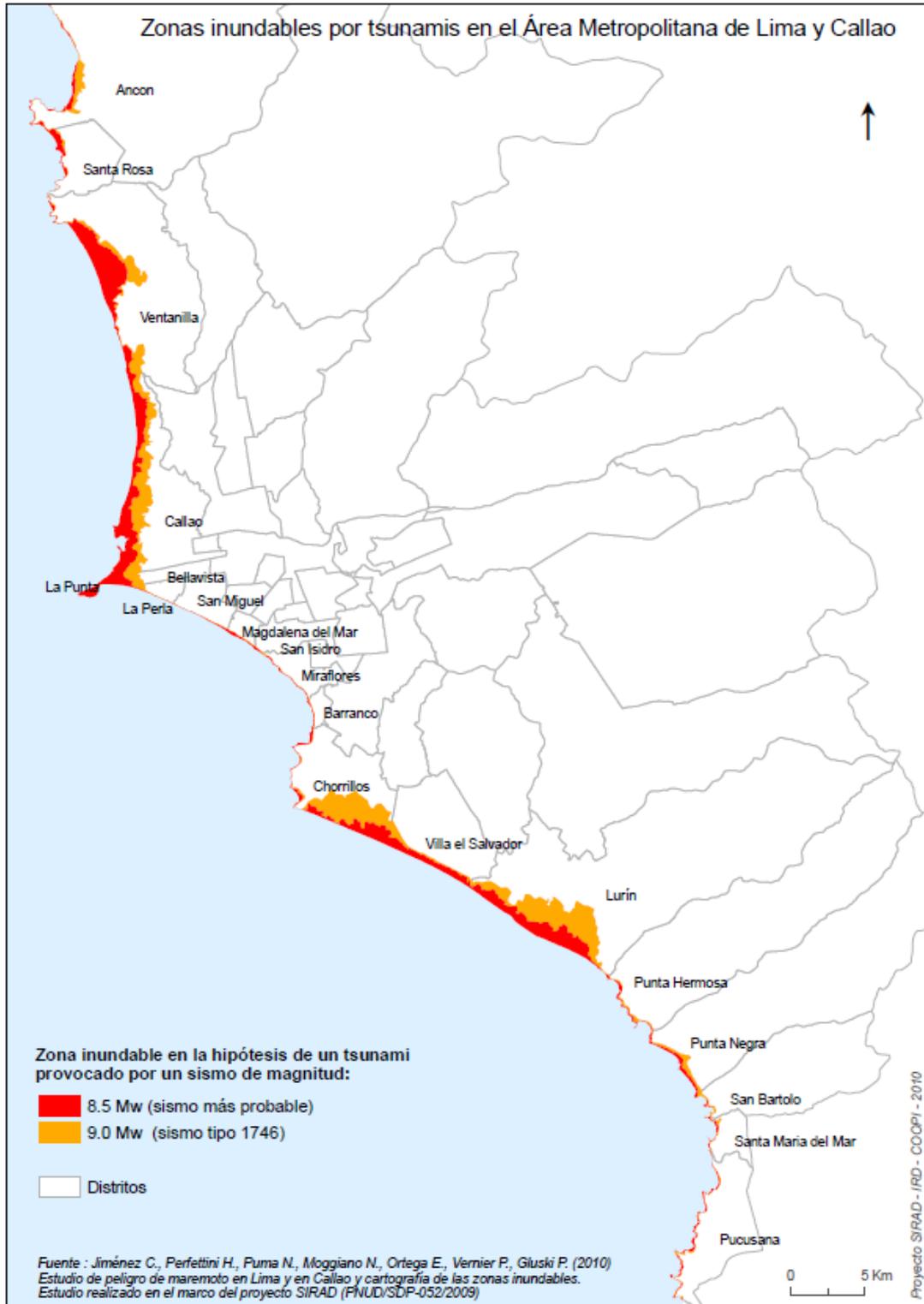


Figura 9.- Mapa de escenario de inundación por tsunami para la zona costera de Lima Metropolitana y El Callao considerando la ocurrencia de sismos de magnitud 8.5 y 9.0 Mw (Proyecto SIRAD).

- Los distritos y/o zonas no vulnerables ante la ocurrencia de un tsunami debido básicamente a su topografía serían: La Perla, San Miguel, Magdalena del Mar, San Isidro, Miraflores y Barranco. Sin embargo, habría que considerar que en las zonas de playa se tiene afluencia de público por la presencia de clubes

*privados, restaurantes, campos deportivos, tránsito en la Av. Costanera y eventualmente afluencia de público en temporada de verano y durante el desarrollo de actividades recreativas. En la zona de playa, el modelo numérico indica que la altura de inundación podría llegar a valores de 12 metros cuando se considera un tsunami generado por un sismo de magnitud 8.5 Mw.*

Por otro lado, en el estudio realizado por Martínez y Tavera (2014) se propuso un nuevo escenario de inundación por tsunami para la zona portuaria del Callao y el río Rímac (Figura 10) teniendo como fuente de origen un sismo de magnitud 8.5 Mw. Los principales resultados obtenidos en este estudio son:

- *La primera ola del tsunami llegaría al puerto del Callao en un tiempo de 18 minutos con olas del orden de 7-8 metros.*
- *La inundación horizontal en la zona portuaria sería del orden de 1400 metros.*
- *Sobre el cauce del río Rímac, el tsunami ingresaría hasta una distancia de 2100 metros produciendo embalses con el material arrastrado por el tren de olas.*
- *La velocidad de propagación del frente de tsunami en la zona portuaria del Callao sería de 36 km/h, sobre el cauce del río Rímac de 32 km/h. En la zona de la Base Naval del Callao la velocidad sería de 27 km/h. En general, estas velocidades, sugieren que el tsunami fácilmente trasladaría hacia la zona costera material pesado como contenedores y barcos.*
- *La topografía de la zona continental controlaría los niveles de inundación. Zonas con topografía cercanas al nivel medio del mar facilitarían el avance del frente del tsunami.*
- *Los efectos del tsunami en estructuras y personas dependerán de la cercanía de ambos a la zona costera, si el índice de población y la precariedad de las construcciones es elevado, el desastre se incrementará en pérdidas de vidas y económicas.*



Figura 10: Escenario de inundación por tsunami producido por un sismo de magnitud 8.5 Mw en la zona portuaria del Callao y el río Rimac (Martínez y Tavera, 2014)

## CONCLUSIONES

Históricamente, la zona costera de la región central del Perú ha sido afectada de manera reiterativa por eventos sísmicos y tsunamis que han causado diversos niveles de daño en las principales ciudades y núcleos urbanos cercanos a la zona costera. Es por ello que surge la inquietud de conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud y posterior tsunami para realizar proyectos orientados a la Gestión del Riesgo de Desastres.

Dentro de este contexto, las investigaciones sismológicas se vieron favorecidas con el desarrollo de otras como la geodesia espacial (GPS). Los aportes hechos por Chlieh et al. (2011) y Villegas-Lanza et al (2016) para el Perú han permitido identificar en la zona costera de la región central del Perú, la presencia de una zona de acoplamiento sísmico máximo o aspereza que podría dar origen en el futuro, a un sismo de magnitud mayor a 8.5 Mw. Este sismo sería el repetitivo del ocurrido en el año 1746; es decir, hace 270 años.

Considerando las características de este sismo y las propiedades geofísicas de los suelos de Lima Metropolitana y El Callao, Pulido et al (2015), estiman los posibles niveles de sacudimiento del suelo. Los autores indican que los suelos podrían experimentar niveles de aceleración mayores a  $500 \text{ cm/s}^2$ .

Por otro lado, considerando la base de datos del CENSO 2007 y el mapa de isosistas del sismo de 1746, el número de distritos que podrían ser afectados sería de 701, el número de viviendas sería ~4 millones y la población sobrepasaría los 14 millones (área de isosistas VIII-VII (MM)). Es importante indicar que en esta información no se detalla el tipo de daño que podría presentarse, pero como información "referencial" es válida para el tema de gestión del riesgo y debe ser considerada como tal.

Finalmente, las simulaciones numéricas realizadas para proponer escenarios de tsunamis producidos por sismos de magnitudes 8,5 y 9,0 Mw en las zonas costeras de Lima Metropolitana y el Callao, muestran que la primera ola del tsunami llegaría a la zona de costa en un tiempo de 18 minutos y con alturas probables de 8 metros. Los niveles de inundación varían, hasta un máximo de 1400 metros frente a la zona portuaria del Callao. Sobre el cauce del río Rímac, el tsunami avanzaría hasta distancias de 2100 metros. En ambos escenarios, la zona portuaria del Callao y el distrito de La Punta serían afectados en mayor porcentaje.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este documento técnico fue elaborado por encargo del CENEPRED y la PCM a fin de actualizar el estado del conocimiento sobre el escenario del sismo que podría afectar a la región central del Perú. Mi agradecimiento a Ademir Cuya por su apoyo en la elaboración de los mapas y figuras que acompañan a este informe.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Chlieh et al. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the central Andes subduction zone; *J. G. R.* vol. 116, doi:10.1029/2010JB008166, 2011
- Condori y Tavera (2012), Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú, a partir de la variación del parámetro b. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 106, 23-36.
- Dorbath, L., Cisternas, A. y Dorbath, C. (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.
- Flores y Tavera (2012). Aplicación del algoritmo M8 en el borde occidental del Perú: Incrementos de probabilidad para la ocurrencia de grandes Terremotos. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 106, 11-21
- Guardia y Tavera (2012). Inferencias de la superficie de acoplamiento sísmico interplaca en el borde occidental del Perú. *Bol. Soc. Geol. Peru*, 106, 36-48.
- Kagan, Y. y Jackson, D. (1991) Seismic gap hypothesis: Ten years after. *JGR*, 96, 21419-21431
- Martinez, J. y Tavera, H. (2014). Dinámica y modelado numérico de tsunami en el terminal portuario del Callao y río Rímac. Dirección de Sismología, Instituto Geofísico del Perú, 50 pag.
- Nishenko, S. (1999). Circum-Pacific seismic potential 1989-1999., *PAGEOPH*, 135, 169-259.
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A. Dixon, T. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America Convergence. *Science*, 279, 358-362.
- Pulido, N., Tavera, H., Aguilar, Z., Calderón, D. (2012). Mega-earthquakes ruptures scenarios and strong motion simulations for Lima, Perú. *International Symposium CISMID, TS-6-2*. Lima, Perú.
- Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., Yamazaki, F. (2015). Scenario Source Models and Strong Ground Motion for Future Megaeathquakes: Application to Lima, Central Peru. *BSSA*, Vol. 105, doi: 10.1785/0120140098
- Pulido et al. (2011). Estimation of slip scenarios for megathrust earthquakes: a case study of Peru. 4<sup>th</sup> IASPEI International Symposium.

- Pulido, N., Tavera, H., Aguilar, Z., Calderón, D. (2012). Mega-earthquake rupture scenarios and strong motion simulations for Lima, Peru. The International Symposium for CISMID 25<sup>th</sup> Anniversary. Lima, Perú.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en Perú, 1513-1974. Inst. Geol. Minero de Perú, 131 pag.
- Tavera y Bernal (2005). Distribución espacial de área de ruptura y lagunas sísmicas en el Borde Occidental de Perú. Volumen Especial N° 6 Alberto Giesecke Matto, Soc. Geolog. Peru, pág. 89-102.
- Tavera, H. (2014). Escenario de Sismo y Tsunami en el borde occidental de la región central del Perú, SCTS - IGP, 30 pag.
- Tavera, H. (2014) Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en Perú, SCTS - IGP, 48 pag.
- Tavera, H. (2016). Mapa Sísmico del Perú periodo 1960 a 2016. SCTS- IGP.
- Tavera, H., Agüero, C., Fernández, E. (2016). Catálogo general de mapas de isosistas para sismos peruanos. SCTS - IGP, 200 pag.
- Villegas-Lanza, J.C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., Nocquet, J-M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *JGR*, 10.1002/2016JB013080