



EVALUACIÓN DEL PELIGRO ASOCIADO A LOS SISMOS Y EFECTOS SECUNDARIOS EN PERÚ

Hernando Tavera

Dr. Manuel Pulgar Vidal
Ministro del Ambiente

Dr. Ronald Woodman
Presidente Ejecutivo IGP

Dr. José Macharé
Director Técnico IGP

Dr. Hernando Tavera
Investigador Científico Principal
Director del Área de Investigación en Sismología

Autor:

Dr. Hernando Tavera

Email: hernando.tavera@igp.gob.pe

Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
IV Etapa - Ate
Teléfono: (511) 3172300

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2014-11704
ISBN: 978-612-45795-9-2



9 786124 579592

Está prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin la autorización expresa del autor

RESÚMEN EJECUTIVO

A fin de conocer la ubicación geográfica de las zonas de mayor riesgo en el Perú, ante la ocurrencia de peligros naturales como los sismos y sus efectos secundarios. Se realiza la revisión y evaluación de la ocurrencia de estos eventos y los niveles de sacudimiento del suelo que ellos producen, así como de tsunamis, licuación de suelos y los deslizamientos de tierra y rocas en zonas de alta pendiente.

Los resultados indican que la zona costera del Perú es la de mayor riesgo ante la ocurrencia de sismos de elevada magnitud con relativa frecuencia. Durante los últimos 500 años de historia, todas las ciudades cercanas a la zona costera han sido afectadas por sismos en menor y mayor grado. A la vez, dependiendo de la morfología de sus costas, los tsunamis se han hecho presentes en zonas puntuales con mayor intensidad. Del mismo modo, la presencia de procesos de licuación han sido más frecuentes en zonas costeras; mientras que, los deslizamientos se hicieron presentes en zonas de acantilados y en las vertientes de la cordillera Andina.

En la zona andina, de manera puntual se presentan sismos de gran magnitud en la zona del Huaytapallana (Junín), Ayacucho, Cusco, Abancay y Arequipa debido a la presencia de importantes sistemas de fallas inversas y normales. En la zona subandina, desde el valle del Alto Mayo hasta la ciudad de Satipo, son frecuentes sismos que muchas veces van acompañados de deslizamientos e importantes procesos de licuación de suelos. En ambas zonas, la frecuencia e intensidad de lluvias contribuyen a la inestabilidad de los suelos.

Recientes eventos sísmicos con epicentros en zonas de selva, han producido procesos de licuación de suelos en las zonas de Bagua y Pucallpa, lo cual demuestra que los sismos de magnitudes moderadas ($\sim 7,0$ Mw) —ocurridos a profundidades intermedias— pueden generar efectos secundarios importantes.

En este escenario, la zona costera representa ser la de mayor riesgo ante la ocurrencia de sismos, tsunamis, deslizamientos y proceso de licuación de suelos. En la zona andina, la ocurrencia de sismos está asociada a la presencia de fallas geológicas con posibles efectos secundarios como los deslizamientos. En la zona subandina, se tiene presencia de sismos, también debido a la presencia de fallas geológicas, y en mayor porcentaje procesos de licuación de suelos.

ÍNDICE

RESÚMEN EJECUTIVO

1. INTRODUCCIÓN

2. EL PELIGRO DE LOS SISMOS

2.1. Distribución espacial de los sismos

2.1.1. Notas del autor

2.2. Intensidades máximas

2.2.1. Notas del autor

3. EL PELIGRO DE LAS LAGUNAS SÍSMICAS

3.1. Áreas de ruptura

3.2. Análisis estadísticos

3.3. Acoplamiento sísmico

3.4. Notas del autor

4. EL PELIGRO DE LOS TSUNAMIS

4.1. Escenarios de tsunamis

4.2. Notas del autor

5. EL PELIGRO DE LOS DESLIZAMIENTOS

5.1. Deslizamientos importantes

5.2. Notas del autor

6. EL PELIGRO DE LA LICUACIÓN DE SUELOS

6.1. Principales procesos de licuación de suelos

6.2. Notas del autor

CONCLUSIONES

AGRADECIMIENTOS

BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

En la década de los 70, la comunidad científica mundial dedicaba todos sus esfuerzos a encontrar la manera más óptima de predecir la ocurrencia de los grandes sismos. El primer logro fue el Mapa de Sismicidad Mundial, el mismo que permitió conocer la ubicación de las zonas de mayor frecuencia de actividad sísmica. Es así que se identificó la existencia de la región hoy conocida como "Cinturón de Fuego del Pacífico". En ella, la Tierra libera más del 80% de la energía acumulada en su interior produciendo sismos y actividad volcánica. El borde occidental de América del Sur y por ende el Perú, es parte de esta región.

Al verse que los esfuerzos por predecir terremotos no daban los frutos esperados, fueron los científicos japoneses quienes comprendieron que el mejor camino era dedicar dichos esfuerzos a desarrollar medidas orientadas a una adecuada gestión del riesgo ante la ocurrencia de peligros como sismos y tsunamis. Hoy en día, dicha tarea cumplió sus objetivos con un adecuado desarrollo estructural y un respetable nivel de cultura de prevención y mitigación de daños, por parte de la población y principalmente por sus autoridades.

Experiencias similares fueron vividas por países vecinos como Chile y México. Fueron los sismos de Valdivia de 1960 y Antofagasta de 1995, los que mostraron a la comunidad chilena el camino a seguir para reducir su vulnerabilidad, partiendo de una adecuada normativa de construcción y un acelerado proceso de educación de la población, hasta la capacitación de autoridades de los más altos niveles. Los resultados de estas acciones fueron puestas en evidencia durante los sismos ocurridos en Concepción en el 2010 e Iquique en el 2014.

En México, fue el sismo del año 1985 que marcó el inicio de una nueva etapa de visionar el futuro de un país menos vulnerable ante sismos. El aporte de la ingeniería sísmica se vio reflejado en cambios radicales en las normativas de construcción, de la mano de una acertada política de educación en la cual se vio inmerso todo el país. Los terremotos del pasado dejaron lecciones que fueron aprendidas por la población y autoridades del país. Sismos recientes han mostrado los resultados de estas acciones.

En el caso del Perú, las políticas de gestión de riesgo fueron dadas recientemente y se han iniciado las acciones a seguir para lograr un país menos vulnerable a peligros naturales como los sismos. Resta conocer la ubicación de las zonas de mayor riesgo y una manera práctica de hacerlo, es revisando la historia. Los sismos son cíclicos, donde ocurrió un sismo, volverá a ocurrir otro en el futuro y traerá consigo similares daños y efectos. En otras palabras, los escenarios del pasado se repetirán, pero quizás ahora este sea más crítico debido al incremento de la población y al desarrollo urbanístico desordenado de las ciudades.

2. EL PELIGRO DE LOS SISMOS

El proceso de convergencia y subducción de la placa de Nazca (oceánica) por debajo de la Sudamericana (continental) con velocidades promedio del orden de 7-8 centímetros por año (DeMets et al, 1980; Norabuena et al, 1999), se desarrolla en el borde occidental del Perú. Este proceso da origen a sismos de diversas magnitudes y focos, ubicados a diferentes profundidades, todos asociados a la fricción de ambas placas (oceánica y continental), a la deformación de la corteza a niveles superficiales y a la deformación interna de la placa oceánica por debajo de la cordillera. La distribución espacial de esta sismicidad ha permitido definir la existencia de tres principales fuentes sismogénicas (Figura 1):

- *La superficie de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana, presente en el borde occidental del Perú (entre la fosa y la línea de costa), da origen a los sismos más importantes, en cuanto a su magnitud ($M_w > 8,0$) e intensidad de sacudimiento del suelo. Muchos de estos eventos fueron acompañados de tsunamis que incrementaron el daño, principalmente en zonas costeras.*

Los recientes sismos de Arequipa del 2001 y Pisco 2007, produjeron importantes niveles de sacudimiento del suelo, llegando a medir aceleraciones del orden de 0.4 g, lo suficiente para producir daños en viviendas frágiles o ubicadas en suelos inestables. Esto sismos produjeron tsunamis con olas de hasta 8 metros que llegaron a la costa en tiempo aproximado de 15 minutos.

- *La segunda fuente, considera la deformación de la corteza continental con la presencia de fallas geológicas de diversas geometrías y dimensiones. Esta fuente da origen a eventos sísmicos con magnitudes de hasta 6,5 M_w , produciendo daños en áreas reducidas, pero con importantes niveles de sacudimiento del suelo. Eventos recientes son los ocurridos en 1990 y 1991 (6,5 M_w) en la región del Alto Mayo (San Martín), acompañados de deslizamiento e importantes procesos de licuación de suelos.*
- *La tercera fuente, agrupa a los sismos que se producen por 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. Esta fuente da origen a eventos sísmicos con magnitudes hasta de 7,0 M_w y en general, producen procesos de licuación de suelos en valles de las zonas andinas y subandinas. Por ejemplo, el evento ocurrido en el año 2005 (7,0 M_w) en Yurimaguas (Loreto).*

ML: Magnitud Local, mejor conocida como "magnitud de Richter"

Mw: Magnitud Momento, escala moderna de magnitud

Fuente Sismogénica: Define la zona en la cual los sismos tienen similar origen y procesos de liberación de energía y ruptura.

g: Aceleración expresada en términos de la aceleración originada por la gravedad, 980 cm/seg².

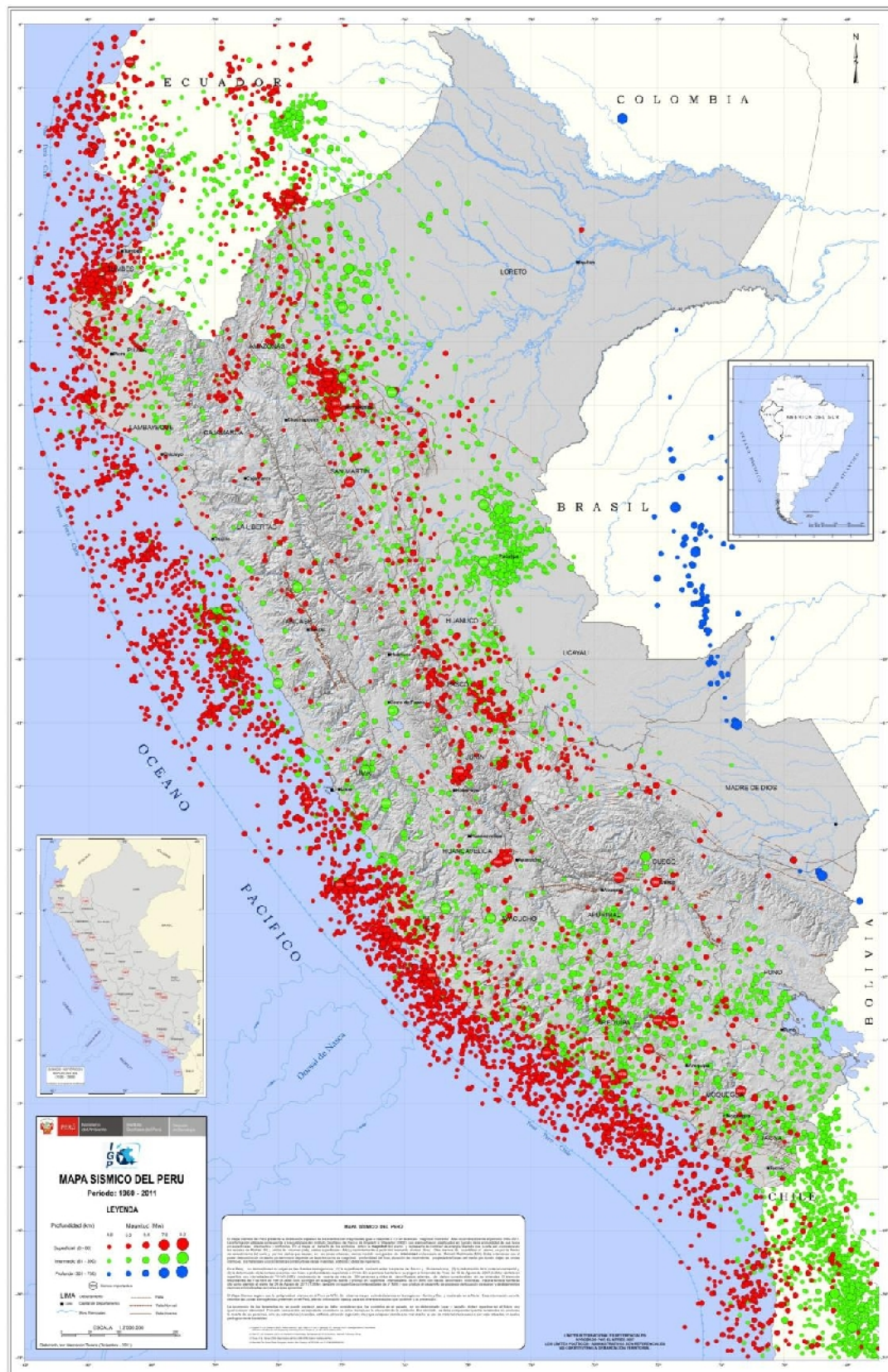


Figura 1: Mapa Sismico del Perú para el periodo 1964 y 2011. La magnitud de los sismos se diferencia por el tamaño de los círculos y la profundidad de sus focos por el color de los mismos (Tavera, 2011).

La Figura 2 muestra un esquema tectónico para las regiones norte-centro y sur del Perú y que explica la interacción de las principales unidades geodinámicas que participan en la continua deformación del territorio peruano. La colisión de las placas Nazca y Sudamericana produce el levantamiento de la cordillera y la ocurrencia de sismos de variada magnitud en la superficie de acoplamiento sísmico. En las regiones norte-centro, el escudo brasilero produce el plegamiento de las capas superficiales para formar anticlinales y fallas geológicas (Figura 3). La placa de Nazca se introduce debajo de la cordillera de manera casi horizontal y por acción de fuerzas internas se fractura y genera sismos, con mayor frecuencia por debajo de la ciudad de Pucallpa. Estos eventos producen frecuentemente en superficie procesos de licuación de suelos.

En la región sur, el modo diferente de producirse la subducción trae como consecuencia la presencia de volcanes. La placa de Nazca lleva en su interior agua que se evapora por el incremento de la temperatura a mayor profundidad, se mezcla con los minerales presente en el manto y por densidad, asciende a superficie para formar los volcanes. Estos últimos representan ser un peligro adicional para las ciudades de la región sur.

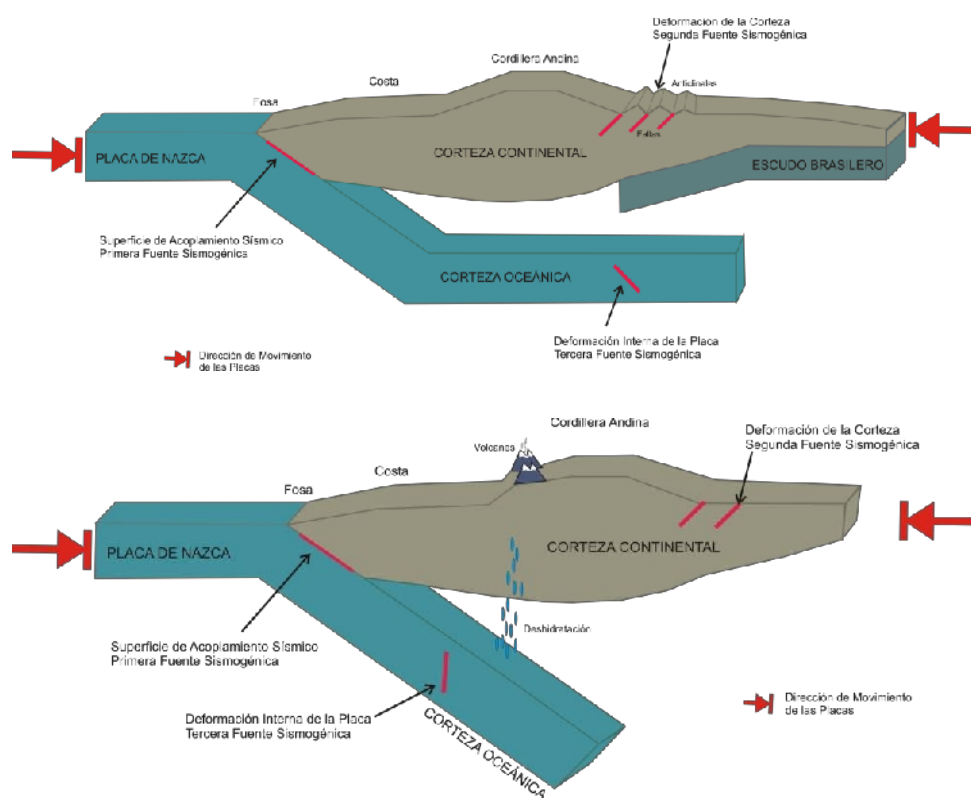


Figura 2: Esquema que muestra la geometría de la subducción y la ubicación de las principales fuentes sismogénicas en el Perú.

Superficie de Acoplamiento Sísmico: Define a la superficie en la cual dos placas tectónicas se encuentran trabadas con la consecuente acumulación de deformación y energía.

Anticlinales: Deformación de las capas del suelo formando pliegues como resultados de esfuerzos tectónicos de compresión.

Licuación de suelos: Describe el comportamiento de suelos, que por acción de una fuerza, pasa de un estado sólido a un estado líquido.

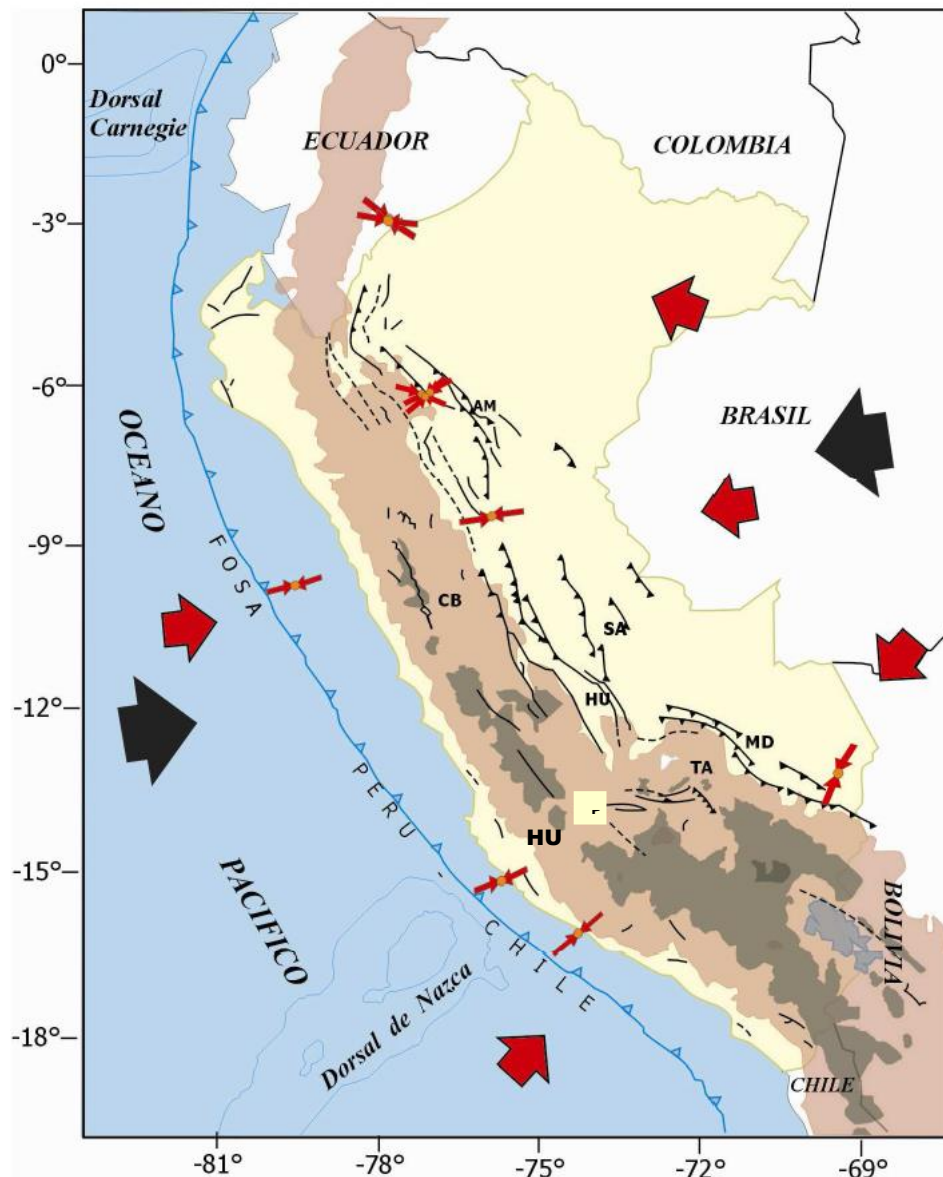


Figura 3: Esquema sismotectónico en superficie y distribución de los principales sistemas de fallas geológicas en Perú. Las flechas rojas pequeñas y grandes indican la dirección de la deformación local y regional. Las flechas negras corresponden a la dirección de convergencia de placas (Nazca y Sudamericana). AM, sistema de fallas del Alto Mayo; CB, sistema de fallas de la Cordillera Blanca; SA, sistema de fallas de Satipo; HU, sistema de fallas del Huaytapallana; MD, sistema de fallas de Madre de Dios y TA, sistema de fallas de Tambomachay.

2.1.- Distribución espacial de los sismos

Cuando se analiza en detalle la distribución espacial de la sismicidad en el Perú (ver Figura 1), se debe dar mayor atención a los sismos de foco superficial (círculos rojos), debido a que ellos, por ocurrir cerca de la superficie, representan ser de mayor peligro para las áreas pobladas. En el caso del Perú, toda la zona costera y en el interior del continente, principalmente la zona subandina.

Según la historia sísmica del Perú, los sismos que han causado mayores daños en superficie, presentaron magnitudes aproximadas mayores a 7,0 Mw y niveles de

sacudimiento superiores a intensidades VII en la escala Mercalli Modificada (MM), ver Anexo 1. De estos sismos, los más importantes, en cuanto a daños producidos en superficie, fueron los de 1586 y 1746 que causaron destrucción en la ciudad de Lima, principal ciudad de Sudamérica en esa época. En la región sur del Perú los eventos de 1604 y 1868 también produjeron daños cuantiosos en las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna y Arica (Chile). En la región norte, el único sismo grande en magnitud parece ser el ocurrido en el año 1619 que produjo importante daño en la ciudad de Trujillo, además de otro ocurrido en el año 1912 que afectó a la ciudad de Piura y daños hasta un radio de 200 km. En la zona andina, los sismos de 1946 y 1950 causaron daños en las ciudades de Quiches (Áncash) y Cusco, siendo el daño mayor en Cusco por estar cerca de la zona epicentral. En la zona subandina, son importantes los sismos de 1990 y 1991 que causaron daños en las ciudades de Rioja y Moyobamba (San Martín), además de procesos de licuación de suelos. Es posible que el sismo de 1970, con epicentro frente a la zona costera la ciudad de Chimbote, sea el causante de la mayor destrucción y mortandad en el Perú en el reciente siglo pasado, pero no por el sismo en sí, sino por el sacudimiento que soportó la Cordillera Blanca que produjo el desprendimiento de un bloque de hielo y el posterior alud de hielo y barro que sepultó a las localidades de Yungay y Ranrahírca, en el Callejón de Huaylas.

En la Figura 4 se muestra el mapa de distribución espacial de los sismos históricos de mayor magnitud ocurridos en Perú. Observándose que el 70% del total de eventos presentan sus epicentros frente a la zona costera, todos asociados al proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana. Estos eventos, en mayor número, se encuentran en las regiones centro y sur, mostrando que ambas regiones presentan mayor riesgo. La región norte, la casi ausencia de sismicidad, sugiere que la misma requiere de mayores periodos de acumulación de energía.

En el interior del continente, todos los sismos están asociados a la formación y reactivación de fallas geológicas presentes a lo largo de la zona andina y subandina. La magnitud del sismo dependerá de la longitud de la falla (Figura 3).

2.1.1.- Notas del autor

La continua ocurrencia de sismos en el Perú es una realidad que no se puede ignorar, de ahí la importancia de disponer de mapas que muestren la distribución espacial de la sismicidad, esto en razón que se debe comprender que los sismos, cualquiera sea su magnitud, son recurrentes en el tiempo. En otras palabras, si una determinada ciudad fue afectada por un sismo en el pasado, en el futuro volverá a serlo con igual o mayor intensidad. De estos sismos, los de mayor peligro son los llamados superficiales debido a que ocurren cerca de la superficie y muchas veces, próximos a las ciudades.

De acuerdo a lo indicado, el mapa de distribución espacial de grandes sismos, por su magnitud e intensidad, muestra con mayor claridad las zonas que han sido y

serán afectadas con mayor frecuencia por sismos y cuáles son las que continúan acumulando energía.



Figura 4: Mapa epicentral de grandes sismos históricos ocurridos en Perú, periodo 1500 a 2014. Imax, indica la intensidad máxima evaluada.

2.2. - Intensidades máximas

A la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud, los suelos son sacudidos con diferentes niveles de intensidad, dependiendo básicamente de su constitución física y geológica, causantes de la amplificación de ondas en diferentes niveles. Suelos poco o nada compactos producen mayor amplificación de las ondas sísmicas y, por ende, el suelo se sacude con mayor intensidad, produciendo daños en viviendas y cambios geomorfológicos en superficie con la ocurrencia de deslizamientos de tierra y piedras y/o procesos de licuación de suelos. Este escenario no se presenta o es menor en suelos rocosos y/o compactos. Desde los inicios de la sismología, esta información fue de mucha utilidad para la elaboración de los mapas de intensidades y recientemente, su aplicación se realiza utilizando la escala de Mercalli Modificada (ver Anexo 1).

De acuerdo a lo indicado, si en el pasado a la ocurrencia de un sismo de magnitud elevada, una determinada zona soportó altas intensidades de sacudimiento del suelo produciendo daños importantes, a la ocurrencia de un próximo evento, será afectada con las mismas o mayores intensidades y los daños —probablemente— sean mayores debido al crecimiento desordenado de las ciudades. En este sentido, es importante analizar los niveles de intensidad producidos por los sismos históricos en el Perú a fin de elaborar planes de gestión del riesgo para el correcto uso de los suelos.

Para identificar las zonas que soportaron altos niveles de intensidad por sismos en el pasado, se ha hecho uso de la información contenida en Silgado (1978), Dorbath et al (1990), así como los catálogos sísmicos publicados por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera y Agüero, 2001), Proyectos SISRA (Huaco, 1985) y SISISAN (Ocola, 1984), además de documentos técnicos publicados por Alva et al. (1984). La información disponible permitió elaborar mapas de intensidades máximas para tres periodos de tiempo, años entre 1500 a 1900, 1900 a 1960 y de 1960 al 2014. En todos se ha tomado como intensidad base de referencia el correspondiente al grado VII (MM), en razón que a partir de la misma se esperan daños considerables en estructuras y en superficie (Anexo 1).

En la Figura 5 se presenta el mapa de intensidades máximas para sismos ocurridos entre los años 1500 a 1900. Destacan las zonas costeras de las regiones centro y sur del Perú con intensidades de IX, X-XI (MM) que afectaron a los departamentos de Lima, Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna. En la zona andina, el valle de la ciudad del Cusco fue afectado con intensidades de IX (MM). De acuerdo a la escala de Mercalli Modificada, los daños consideran el colapso de un gran número de viviendas, licuación de suelos, cambios morfológicos y un gran número de fallecidos. Para este periodo fueron importantes los sismos de 1746 (Lima), 1868 (Arequipa) y 1650 (Cusco). En el caso de las ciudades costeras, ellas fueron además, afectadas por tsunamis.

SISAN: Proyecto de Sismicidad Andina a cargo del Centro Regional de Sismología para América del Sur, CERESIS.
SISRA: Programa para la Mitigación de los efectos de terremotos en la Región Andina a cargo de CERESIS.

En la Figura 6 se presenta el mapa de intensidades máximas para sismos ocurridos entre los años 1900 a 1960. Destaca la zona costera y continental de la región norte del Perú con intensidades del orden de IX y X-XI (MM) que afectaron a los departamentos de Piura, Cajamarca, Lambayeque, Amazonas y San Martín. En esta región, el sismo del año 1912 produjo en el departamento de Piura el colapso de un gran número de viviendas, licuación de suelos, surgimiento de agua del subsuelo, cambios morfológicos en el cauce del río y un gran número de fallecidos.

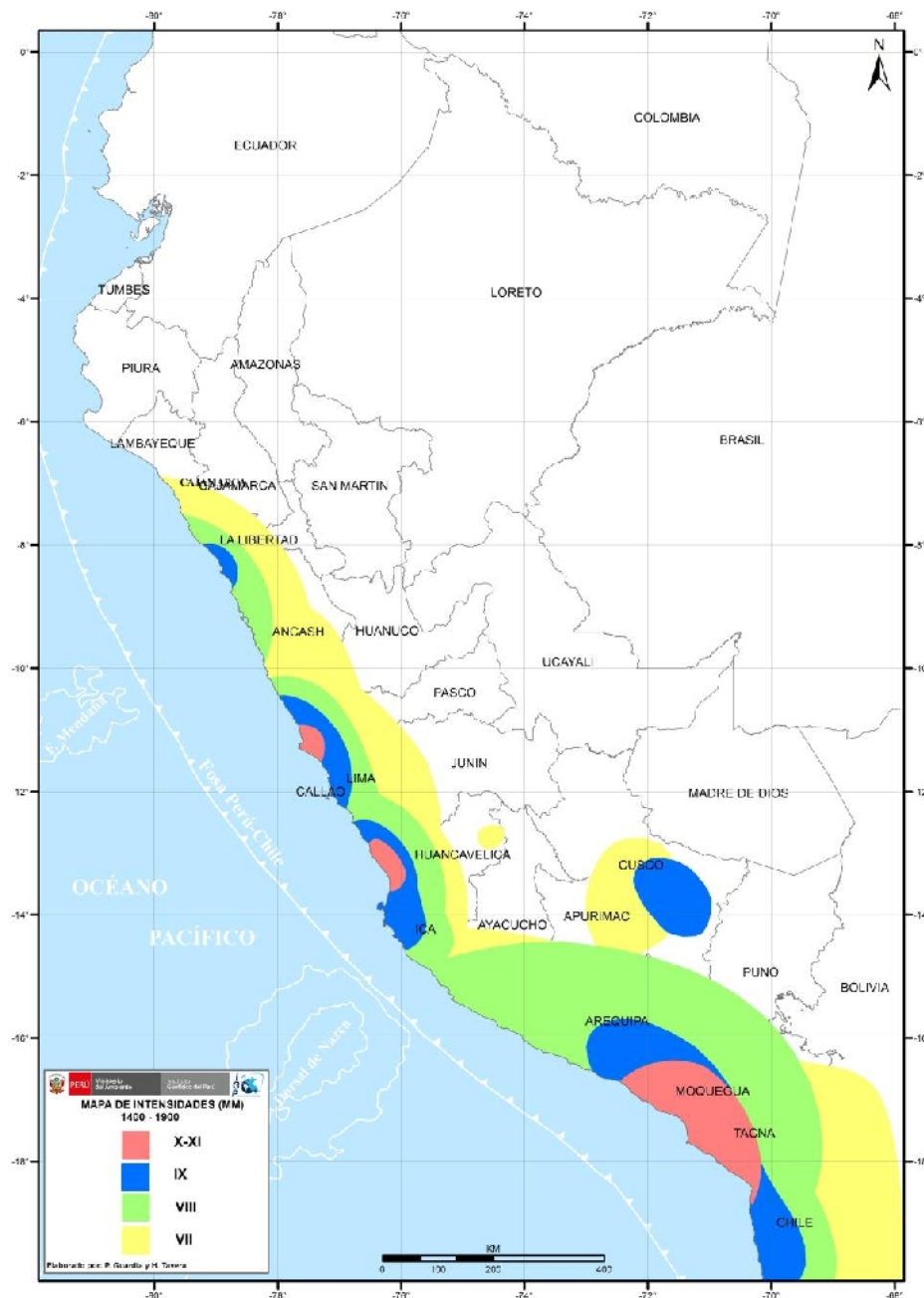


Figura 5: Mapa de intensidades sísmicas máximas en la escala de Mercalli Modificada para sismos históricos ocurridos entre los años 1400 y 1900.

En la Figura 7 se presenta el mapa de intensidades máximas para sismos ocurridos durante el periodo 1960 a 2014. Según la información, toda la zona costera de Perú fue afectada con intensidades máximas de VIII (MM), principalmente en los departamentos de Arequipa, Ica, Lima, Áncash, Tumbes y Piura. En el interior del país, fue afectado el departamento de San Martín y las ciudades de Huancayo, Cusco y la zona andina de Arequipa, valle de Chivay. En la ciudad de Huancayo, específicamente en la zona del nevado Huaytapallana, las intensidades habrían llegado a valores de X (MM). En general, los sismos que produjeron estos niveles de intensidad en el Perú presentaron magnitudes de 8,0 Mw para sismos de subducción y de 6,5 Mw para sismos por fallas geológicas.

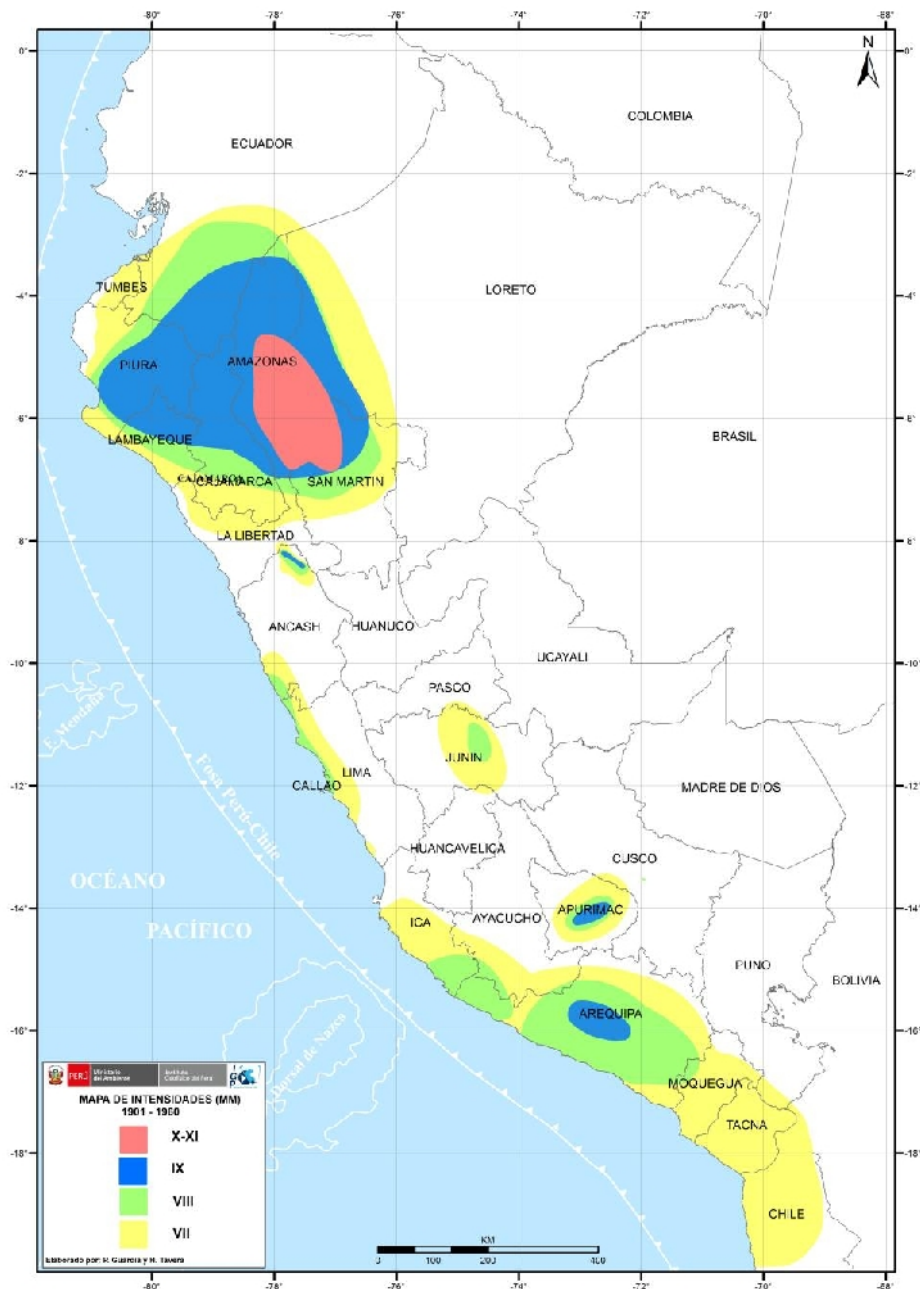


Figura 6.- Mapa de intensidades sísmicas máximas en la escala de Mercalli Modificada para sismos históricos ocurridos entre los años 1900 y 1960.

2.2.1. Notas del autor

La distribución de valores de intensidad máxima evaluada para sismos históricos, muestra que toda la zona costera del Perú es la de mayor riesgo, llegando a soportar niveles de intensidad de hasta X-XI (MM); mientras que, en el interior del país, las zonas de mayor riesgo parecen ser puntuales, departamento de San Martín (Rioja y Moyobamba), Huancayo (zona de Huaytapallana y Satipo), Cusco (desde Zurite, pasando por el Cusco hasta Vilcanota) y Arequipa (Valle de Chivay), a los cuales deben sumarse Ayacucho, Huaraz y Cajamarca.

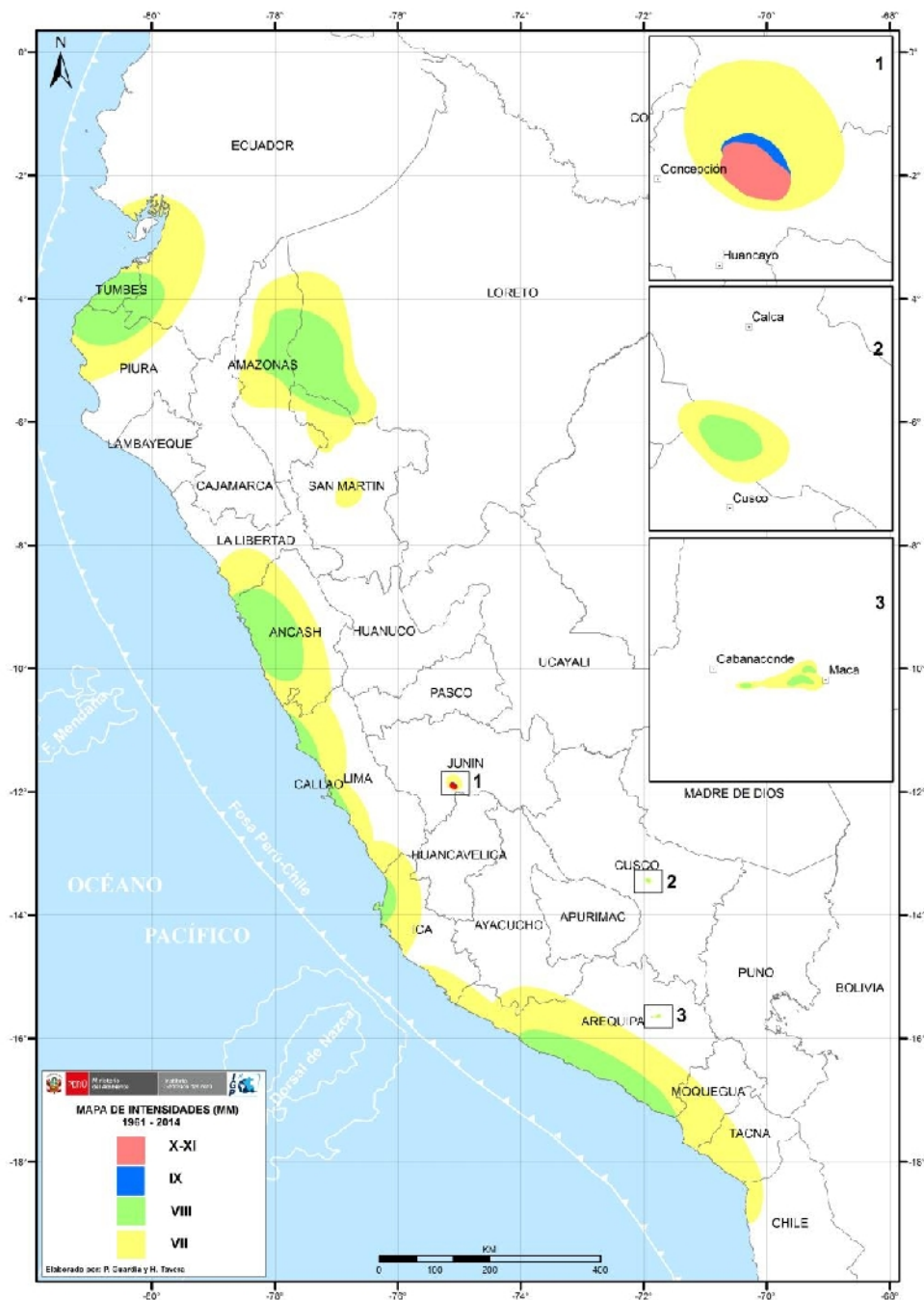


Figura 7.- Mapa de intensidades sísmicas máximas en la escala de Mercalli Modificada para sismos históricos ocurridos entre los años 1960 y 2014.

De presentarse nuevos eventos sísmicos que afecten a estas zonas y ciudades (Figura 8), por lo menos los efectos deben ser los mismos, aunque es posible que los valores de intensidad sean superados debido al crecimiento desordenado de las localidades y ciudades ubicadas dentro o cercanas a las zonas de mayor riesgo.

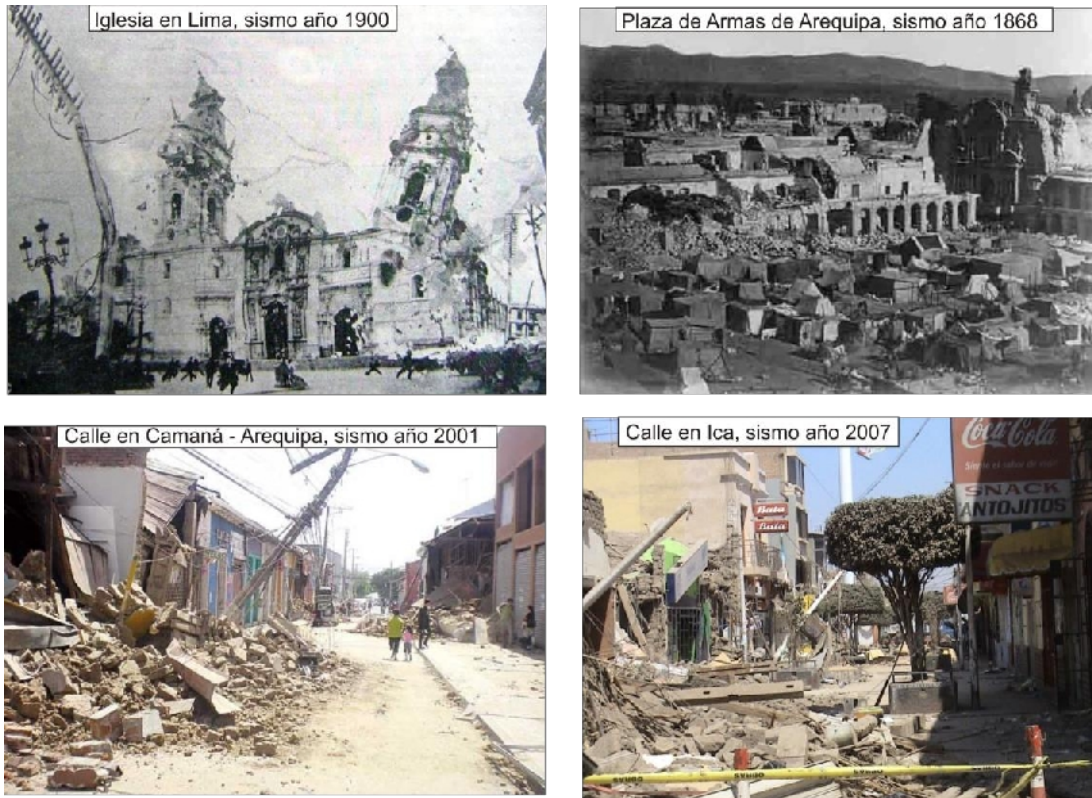


Figura 8: Imágenes de daños producidos por sismos en algunas ciudades del Perú

3.- EL PELIGRO DE LAS LAGUNAS SÍSMICAS

3.1.- Áreas de ruptura

La distribución espacial de las áreas de ruptura de grandes sismos, permiten identificar la presencia de las llamadas lagunas sísmicas; es decir, 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 borde occidental de Perú y Chile, Kelleher (1972), Kelleher y McCann (1976), McCann et al. (1979), Nishenko (1985) y Kagan y Jacson (1991) identificaron la presencia de lagunas sísmicas de diversas dimensiones que en algunos casos, fueron partícipes de eventos sísmicos importantes. Posteriormente, Tavera y Bernal (2005) recopilan y actualizan la información sobre las áreas de ruptura y los resultados obtenidos son (Figura 9):

- *Durante el Siglo XIX, la distribución espacial de las áreas de ruptura de grandes sismos (áreas de color rojo), muestra la existencia de algunas zonas en las cuales no habrían ocurrido sismos, por ejemplo, las zonas sur y centro de Chile, zonas centro y norte de Perú. Estas zonas fueron identificadas como "lagunas sísmicas".*
- *Durante el Siglo XX, en la región sur de Chile, la laguna sísmica de mayor tamaño dio origen al gran sismo de 1960 (9,5 Mw). Luego ocurrieron otros sismos con áreas de ruptura menores desde la ciudad de Concepción hasta Antofagasta (Chile), seguidamente aparece una laguna sísmica que se extiende a la región sur de Perú y que correspondería a los sismos de 1868 y 1877. Al norte de la zona costera del departamento de Arequipa se tienen áreas pequeñas de ruptura distribuidas hasta la zona costera del departamento de Áncash, para luego presentarse una nueva laguna sísmica que viene del siglo pasado y que considera, además, la zona costera de Ecuador.*
- *Durante el Siglo XXI, ocurrieron los sismos de Arequipa del 2001 (8,2 Mw), Pisco del 2007 (8,0 Mw), Chile del 2010 (8,8 Mw) y Chile del 2014 (8,0 Mw), de todos ellos, solo el ocurrido en el año 2010 es considerado como repetitivo del sismo del año 1835. Los eventos restantes solo habrían liberado parcialmente la energía acumulada en cada región desde la fecha de ocurrencia del último evento sísmico importante.*

De acuerdo a la distribución espacial de las áreas de ruptura, para la región centro, se ha identificado la presencia de una laguna sísmica que viene acumulando

Laguna sísmica: Es la zona en quietud en un borde convergente de placas tectónicas en la que, tiene historia de grandes sismos, y aún no se han repetido en los últimos 30 años.

energía desde el año 1746 (268 años a la fecha). Los sismos ocurridos en los años 1940, 1966, 1970, 1970, 1974 y 2007 presentaron magnitudes igual o menores a 8,0 Mw; por lo tanto, no habrían liberado el total de la energía aún acumulada en dicha región.

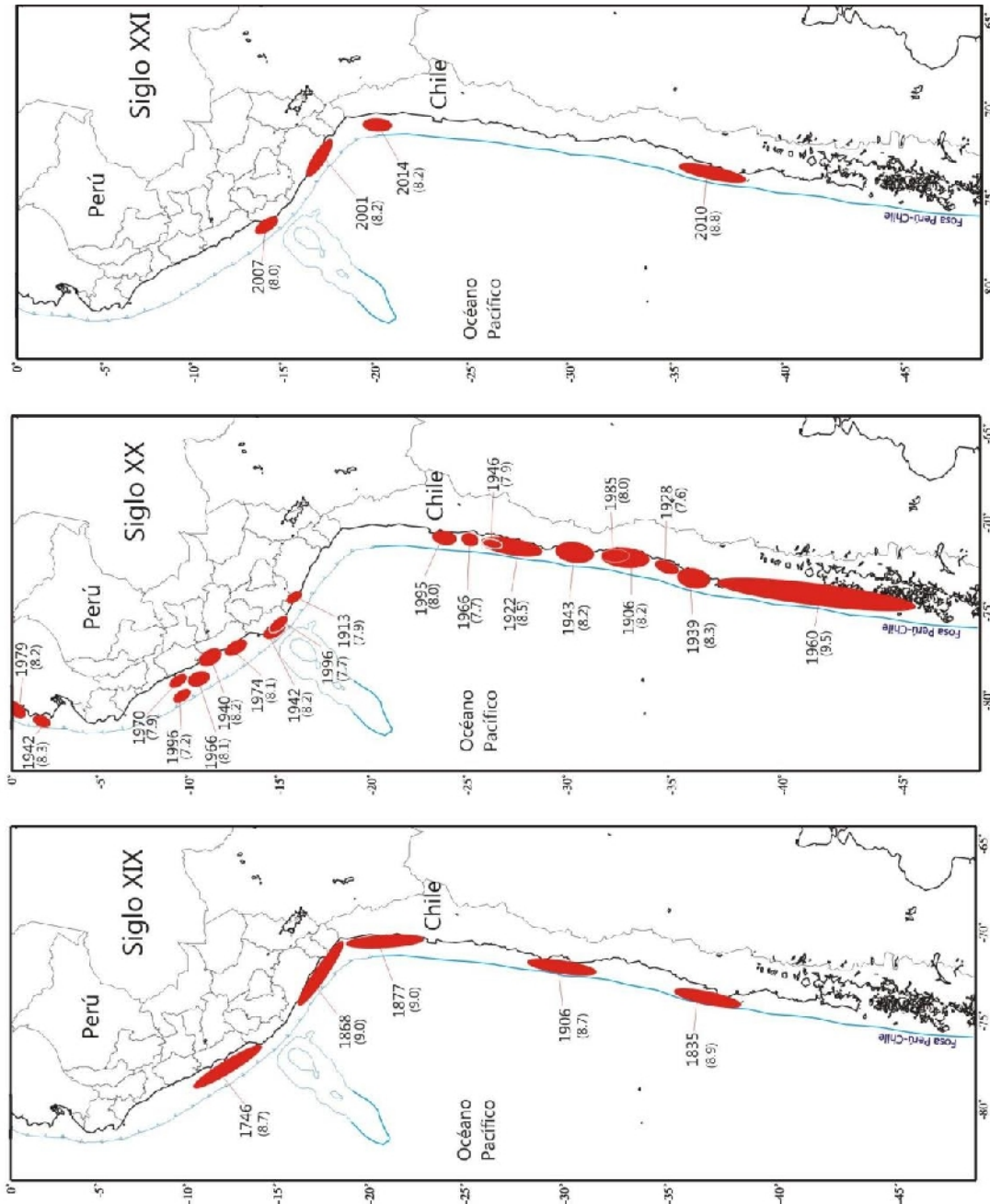


Figura 9: Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas durante los siglos XIX, XX y XXI en el borde occidental de Perú y Chile. La magnitud de los sismos está expresada en la escala de magnitud momento (Mw), (Tavera y Bernal, 2005).

En la región sur, la laguna sísmica viene del año 1868 (146 años a la fecha) y según su historia, éste habría sido el sismo de mayor magnitud 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 de Chile, la laguna sísmica está presente desde el año 1877 (137 años a la fecha), siendo el único evento sísmico histórico identificado para esta región. El reciente sismo del 1 de abril del 2014 (8,0 Mw), habría liberado parte de la energía que se venía acumulando desde el año 1877.

3.2. - Análisis estadísticos

Debe entenderse que la superficie de contacto entre dos placas no se encuentra en un estado uniforme de distribución de esfuerzos y energía acumulada, sino que existe una continua liberación de los mismos en forma de sismos sobre algunas partes de dicha superficie, dejando otras con mayor acumulación de energía llamadas asperezas. El siguiente sismo debe originarse en esta aspereza o zona de mayor acumulación de energía. A raíz de estas observaciones, Wiemer y Wyss (1997) desarrollaron una metodología netamente estadística para identificar la presencia y ubicación geográfica de dichas asperezas haciendo uso de la información contenida en los catálogos sísmicos.

Para la aplicación de esta metodología en Perú, se ha hecho uso del catálogo sísmico publicado por el Instituto Geofísico del Perú para el periodo de 1960 a 2012 y los resultados son presentados en la Figura 10 (Condori y Tavera, 2012). Para el borde occidental del Perú se ha identificado la existencia de hasta cinco zonas anómalas para el valor de "b"; es decir, cinco asperezas cuyas dimensiones permitieron estimar la magnitud de los eventos sísmicos a ocurrir, con una probabilidad del 75% en los próximos 50 años.

- *La aspereza A1 se encuentra en la región sur, frente a la zona costera de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, posiblemente asociada con el terremoto de 1868. De acuerdo a las dimensiones de la aspereza, el sismo podría alcanzar una magnitud de 8,8 Mw. El reciente sismo del año 2001 (8,0 Mw) habría liberado parte de esta energía, siendo la restante posiblemente causante de otro sismo de magnitud del orden de 8,2 Mw.*
- *La aspereza A2, se encuentra ubicada frente a la zona costera del extremo noroeste del departamento de Arequipa (Yauca - Acarí), estando asociada al terremoto de 1913. El área de esta aspereza permite estimar la posible ocurrencia de un sismo con magnitud del orden de 7,5 Mw.*
- *La tercera y cuarta aspereza (A3, A4), se encuentran en la zona costera del departamento de Lima y estarían asociadas al terremoto de 1746. De acuerdo a las dimensiones de dichas áreas, el sismo podría presentar una magnitud de 8,8 Mw.*

Asperezas: Define al área en donde se viene acumulando esfuerzos y energía, siendo el punto de inicio de un evento sísmico.
Valor de "b": Valor constante de la ley de Gutenberg-Richter que define la naturaleza sísmica de una región.

- La quinta aspereza (A5), se encuentra frente a la zona costera de Chiclayo y podría estar asociada al terremoto de 1619. Esta aspereza de menor tamaño correspondería a un sismo con magnitud del orden de 7,5 Mw.

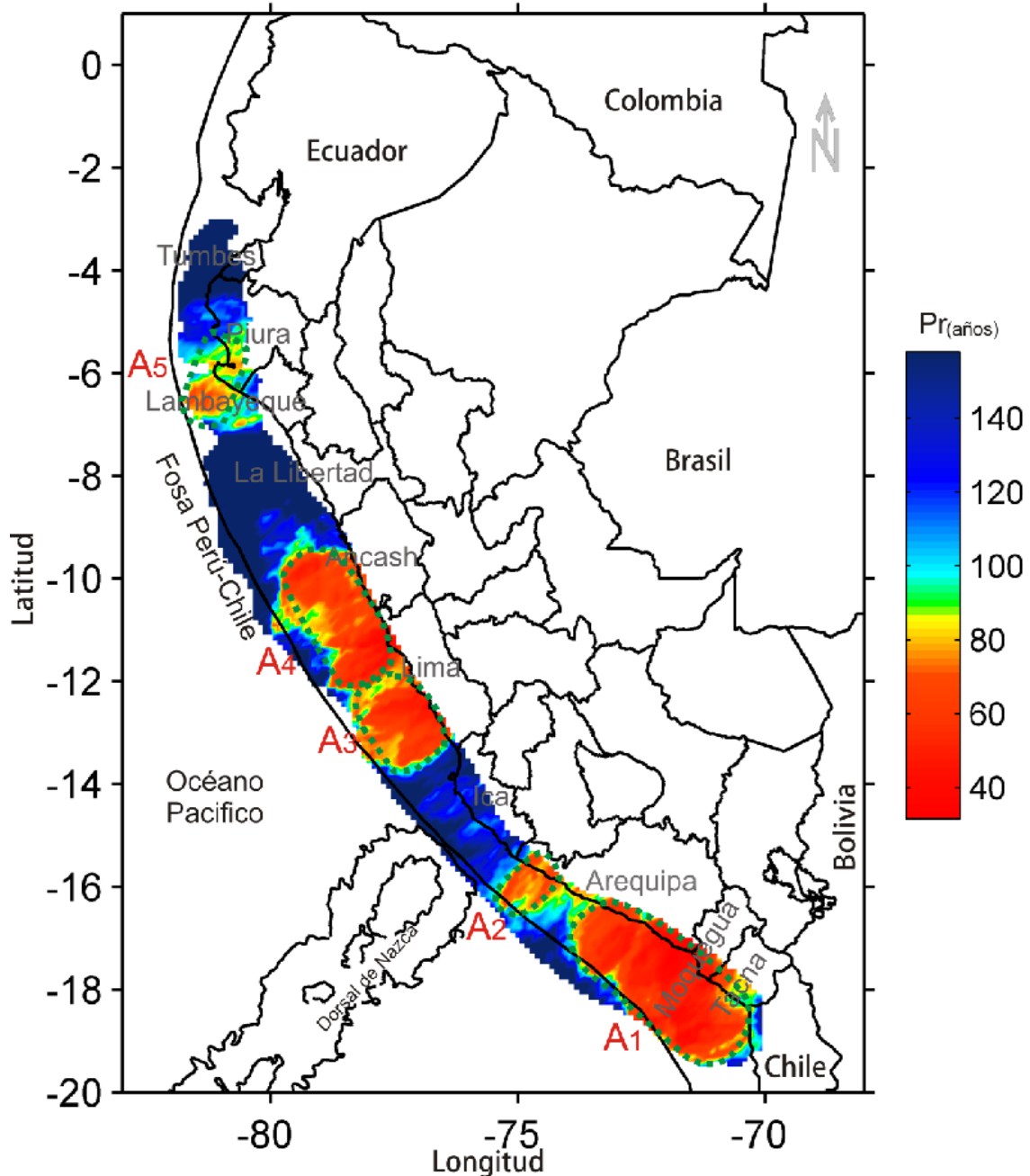


Figura 10: Mapa de periodos de retorno local para las principales asperezas identificadas en el borde occidental de Perú obtenido a partir de la variación espacial del valor de "b" y la metodología propuesta por Wiemer y Zuñiga (1994), (Condori y Tavera, 2012).

3.3.- Acoplamiento sísmico

Con el desarrollo de la instrumentación geofísica se ha logrado diseñar dispositivos que permiten registrar con precisión los desplazamientos de la corteza terrestre. Estos

son llamados Sistemas de Posicionamiento Global o simplemente GPS. La información obtenida con los GPS, al ser analizada permite conocer los movimientos milimétricos de las placas de Nazca y Sudamericana. A la ocurrencia de sismos de gran magnitud, estos desplazamientos son mayores, por ejemplo durante el sismo de Pisco 2007, la zona de Paracas tuvo un desplazamiento horizontal de 150 cm. Entonces, una red densa de estaciones GPS operando a lo largo de la zona costera de Perú, permitirá saber qué zonas evidencian o no desplazamientos. En este último caso, indican que la tensión y la energía se vienen acumulando, y al liberarse darían origen a un sismo de gran magnitud.

La Figura 11 permite tener una mejor ilustración de lo descrito anteriormente. Ambas placas, Nazca y Sudamericana, se encuentran en convergencia y acumulando energía y esfuerzo de deformación en las asperezas que se encuentran en su superficie de fricción. Estas asperezas estarían evitando que las placas se desplacen (línea roja). Al no existir desplazamientos, la zona costera se repliega y se incrementa la acumulación de deformación y energía que busca vencer la resistencia de la aspereza. Logrado este objetivo, simplemente la corteza salta sobre la placa oceánica produciendo el sismo y el consecuente tsunami. Entonces, al conocer la ubicación de las asperezas y/o zonas de acoplamiento máximo (línea roja), se sabe dónde ocurrirá el próximo evento sísmico. Las dimensiones de las asperezas son proporcionales al tamaño de los sismos a ocurrir. Asimismo, a mayor periodo de acumulación de esfuerzos, mayor será la energía liberada, y por ende el evento tendría mayor magnitud.

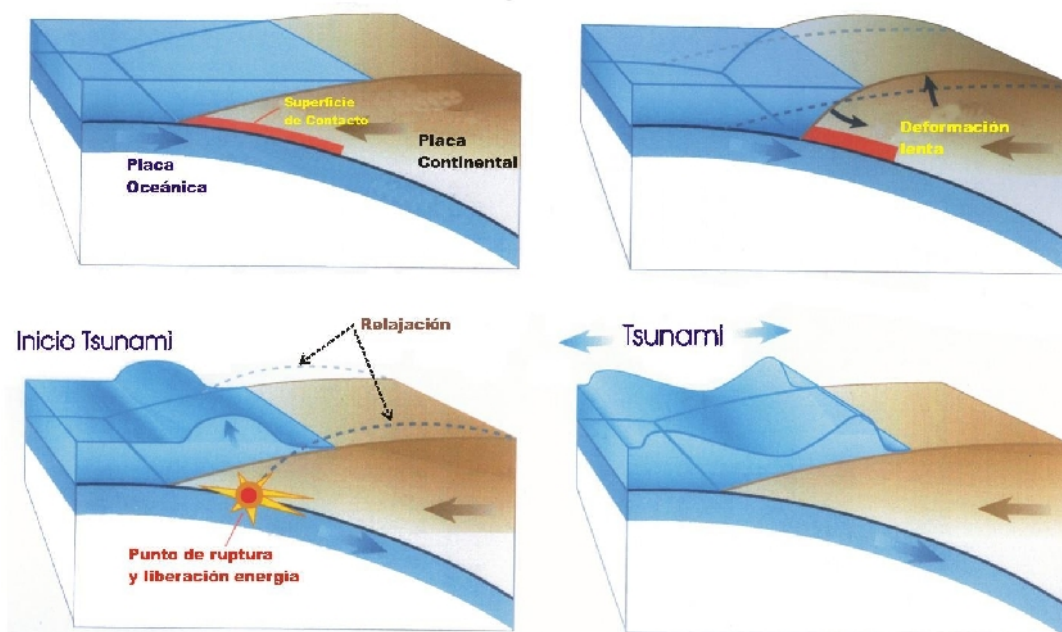


Figura 11: Esquema que muestra la convergencia de placas en el borde occidental del Perú y proceso de generación de sismos y tsunamis. La línea roja representa a la aspereza y/o zona de acoplamiento sísmico. El proceso de subducción deforma el borde continental hasta un máximo de acumulación de energía que luego es liberada produciendo el sismo y tsunami.

Las metodologías que hacen uso de datos de GPS, han sido aplicadas en varias regiones del mundo con notable éxito. Por ejemplo, Ruegg et al. (2009) propuso el escenario sísmico a presentarse en la zona costera de la ciudad de Concepción, prácticamente un año antes de que ocurra el terremoto del año 2010 (8,8 Mw). En el Perú, los primeros estudios sobre GPS se realizaron en 1998 (Norabuena et al. 1998) y recientemente, Chlieh et al. (2011) recolectaron 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 en su borde occidental la posible presencia de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico. Los resultados obtenidos muestran la existencia de cuatro asperezas, todas con variadas geometrías y tamaños, siendo sus características las siguientes (Figura 12):

- En la región central del Perú (A-1), existen dos asperezas, siendo la ubicada en su extremo norte, la de mayor tamaño y ambas son parte de otra, cuyo eje mayor, paralelo a la costa, tiene una longitud de 350 km. La magnitud del sismo sería mayor a 8,0 Mw. Las asperezas estarían asociadas al terremoto de 1746.
- En la región sur del Perú (A-2), la aspereza se encuentra ubicada frente la zona costera de las ciudades de Nazca y Yauca, y daría origen a un sismo de magnitud mayor a 7,5 Mw. La aspereza estaría asociada al terremoto de 1913.

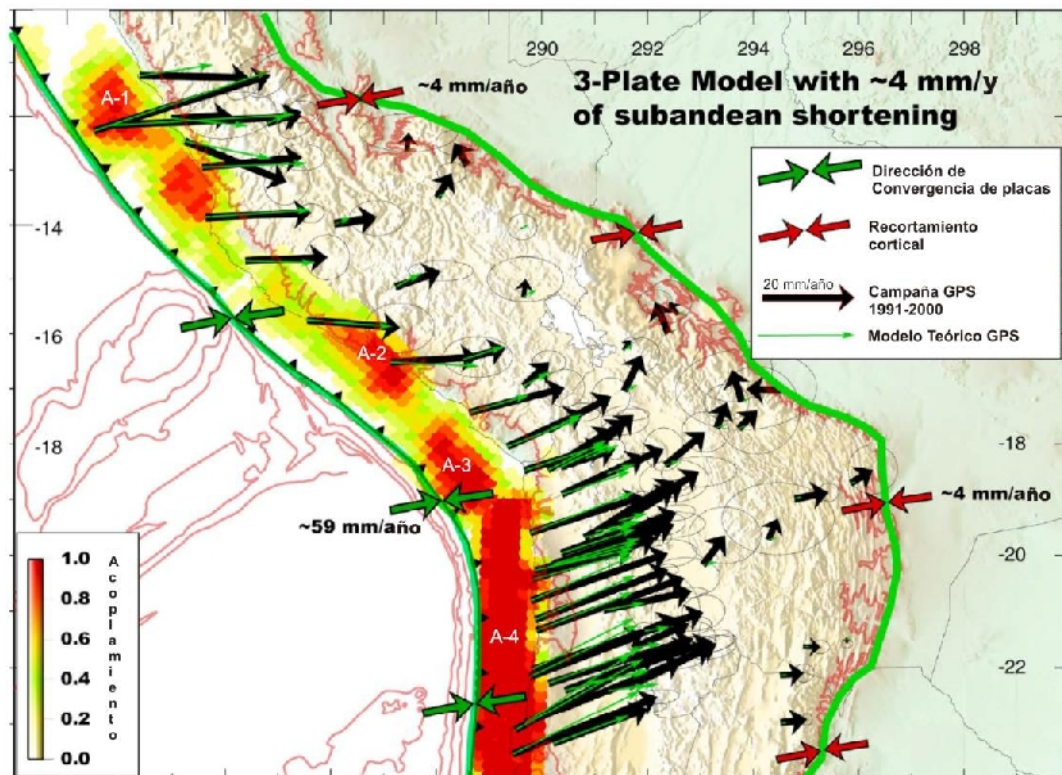


Figura 12: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta cuatro asperezas (Chlieh et al, 2011).

- En la región sur del Perú (A-3), la aspereza considera a la zona costera de los departamentos de Moquegua y Tacna, y correspondería a un sismo de magnitud mayor a 8,0 Mw. El terremoto ocurrido en el 2001, habría liberado parte de la energía acumulada. Esta aspereza estaría asociada al terremoto de 1868.
- En la región norte de Chile (A-4), la aspereza es de mayor tamaño y considera la zona costera entre las ciudades de Arica y Antofagasta en Chile. La aspereza debería dar origen a un sismo de magnitud mayor a 8,5 Mw y estaría asociado al terremoto de 1877. Recientemente, el extremo norte de la aspereza, cerca de la ciudad de Iquique, dio origen a un sismo de magnitud 8,0 Mw (abril del 2014), dicho evento habría liberado parte de la energía acumulada.

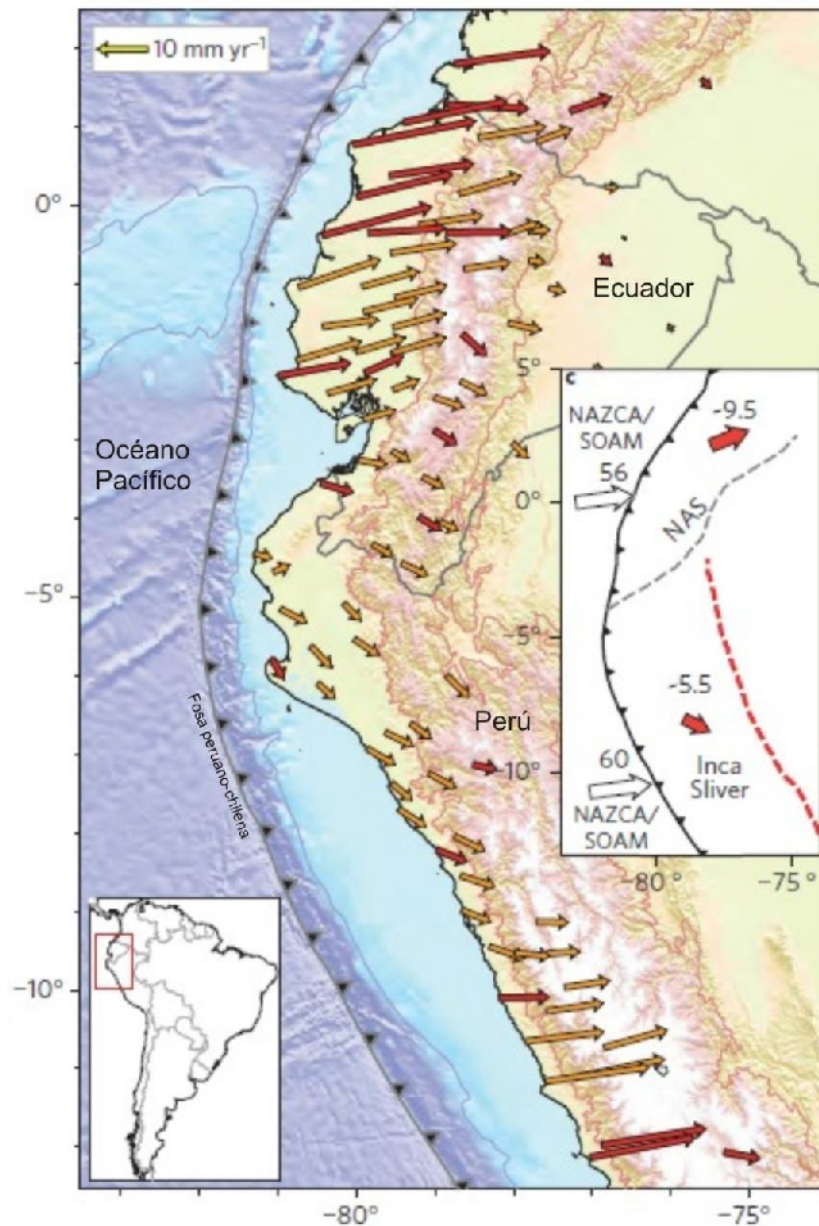


Figura 13: Distribución de vectores de desplazamiento de placas en el borde occidental de la región centro-norte de Perú y Ecuador obtenidos con medidas de GPS.. Obsérvese la longitud de los vectores de la región norte de Perú en comparación con las regiones centro de Perú y norte de Ecuador (Nocquet et al, 2014).

En la región norte del Perú, existe una incipiente historia sísmica y los datos de GPS sugieren que las placas se desplazan a velocidades del orden 4.5 mm/año (Figura 13); es decir, un 90% menor a lo observado en las regiones centro y sur del Perú (Nocquet, et al. 2014). Esto se correlaciona con un acoplamiento débil o insignificante, asociado a la presencia de un deslizamiento continuo asísmico. Asimismo, Nocquet et al. (2014) sugieren que la zona de acoplamiento se encuentra a niveles muy superficiales, cerca de la fosa peruano-chilena y a profundidades menores a 20 km. Este escenario haría improbable la ocurrencia de sismos grandes (magnitudes $M_w > 8.0$) y también poco probable la ocurrencia de tsunamis locales de importancia.

3.4. - Notas del autor

El análisis espacial de las áreas de ruptura, la aplicación de métodos estadísticos a bases de datos sísmicos y la cuantificación del desplazamiento de las placas tectónicas (asperezas), muestran claramente que en el borde occidental de la costa peruana y región norte de Chile, existen zonas con más de 100 años de acumulación de energía que debe ser liberada con sismos de gran magnitud con mayor probabilidad que otras. Estas zonas están prácticamente, una en cada región del Perú, asociadas probablemente a los sismos recurrentes de 1619, 1746 y 1868, a las cuales se suma la región norte de Chile que no experimenta eventos sísmicos mayores desde el año 1877. Según la historia, estos sismos produjeron elevados niveles de sacudimiento del suelo que ocasionaron daños importantes en estructuras, y otros efectos secundarios como deslizamientos, licuación de suelos y sobre todo, tsunamis. De repetirse estos eventos sísmicos, todo indicaría que los daños serían mayores en consideración a que las ciudades costeras han crecido y se han desarrollado de manera desordenada y sobre zonas de riesgo (suelos inestables, ladera de cerros, orilla de los ríos, viviendas antiguas y/o construidas con material inadecuado).

4.- EL PELIGRO DE LOS TSUNAMIS

Los sismos de gran magnitud generan frecuentemente tres efectos secundarios importantes: 1) Tsunamis cuando los epicentros del sismo están en el mar, frente a la zona costera; 2) Deslizamientos de tierra y piedras en zonas de mediana a alta pendiente, sea cerca de la costa o en el interior del continente; y 3) Procesos de licuación de suelos en zonas con superficies inestables y con presencia de agua.

De estos tres efectos, los tsunamis han resultado ser los de mayor peligro; por lo tanto, es importante conocer su historia en el Perú a fin de lograr tener escenarios reales de lo que podría acontecer si estos mismos peligros se repiten en el futuro.

La información detallada de los principales tsunamis ocurridos en el Perú puede ser consultada en informes técnicos básicos como los de Pararas-Carayannis (1968, 1972, 1974), Silgado (1978), Kuroiwa (2004), Dorbath et al. (1990) y Gusiakov (2002). Asimismo, Carpio y Tavera (2002), basados en el trabajo de Gusiakov (2002), construyen una base de datos que incluye todos los tsunamis que ocurrieron y afectaron la costa peruana (Figura 14), ver Anexo 2. De estos tsunamis, los más importantes por su tamaño y daños producidos en la zona costera de las regiones norte, centro y sur del Perú fueron los ocurridos en los años 1746, 1868 y 1960.

Región Norte:

El tsunami mayor fue debido al sismo ocurrido el 20 de noviembre de 1960, magnitud $\sim 6,8$ Ms y epicentro ubicado 115 km en dirección Oeste con respecto a la ciudad de Chiclayo ($6,72^{\circ}\text{S} - 80,90^{\circ}\text{O}$). Después de varias horas de ocurrido el sismo, la zona costera del departamento de Lambayeque fue afectada por un tsunami cuya primera ola alcanzó 9 metros de altura, produciendo daños severos en los puertos de Eten y Pimentel, Caletas de Santa Rosa y San José. Este tsunami logró inundar completamente las islas de Lobos ubicada a unos 16 km frente al puerto de Pimentel.

Región Centro:

El tsunami de mayor tamaño ocurrió después del sismo del 28 de octubre de 1746, de magnitud $\sim 8,6$ Mw y epicentro frente al departamento de Lima. Media hora después de ocurrido el evento sísmico, se generó un gran tsunami que golpeó la costa de la región central del Perú causando la destrucción absoluta del puerto. El Callao fue impactado por olas de 24 metros que inundaron distancias de hasta 5 km. De los 23 barcos anclados en el puerto, 19 fueron hundidos y cuatro trasladados tierra dentro. En total, las víctimas del terremoto y tsunami alcanzaron el número de 4000 personas. En el puerto solo quedaron cascajos y arenas que se depositaron sobre los escombros dejados por el sismo y tsunami.

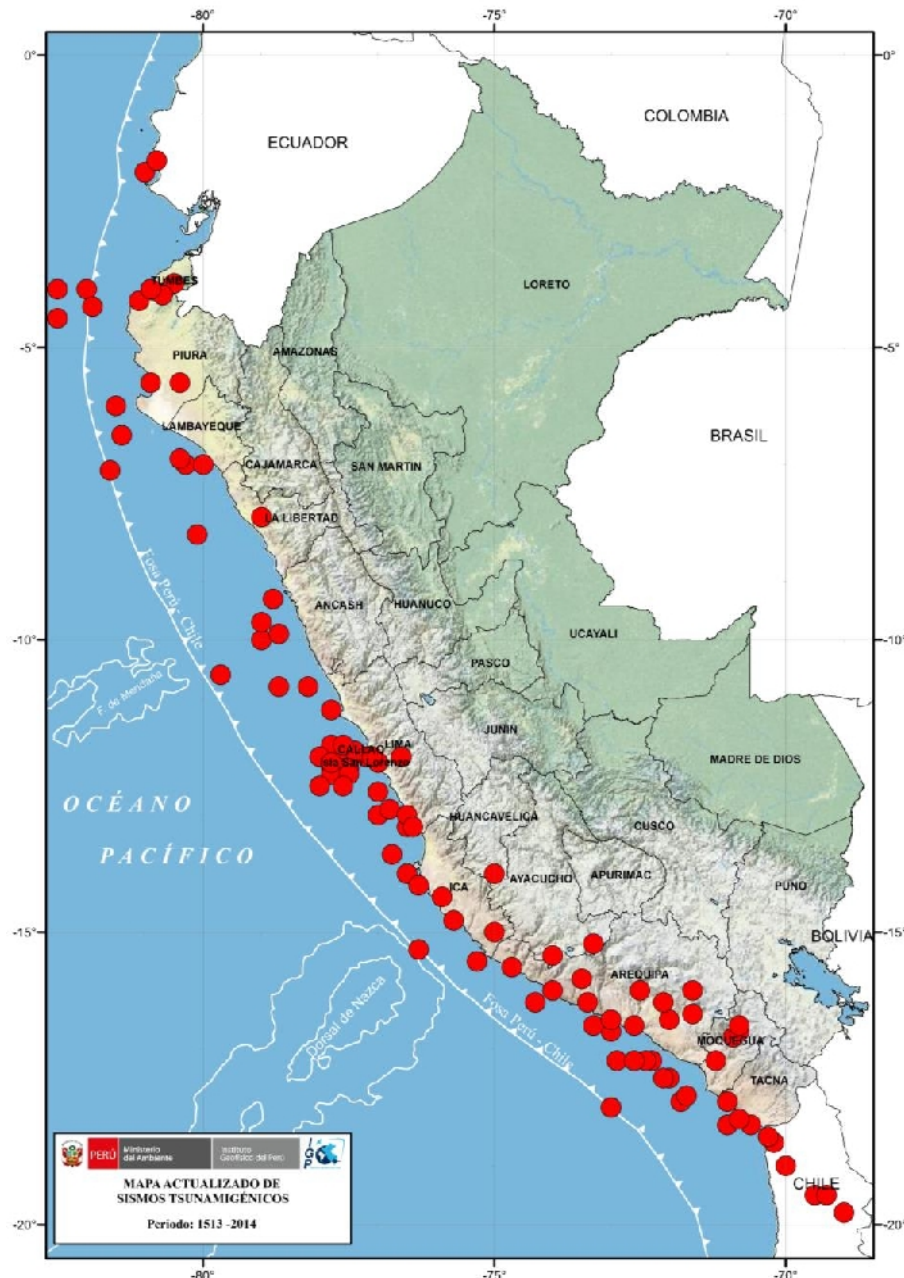


Figura 14: Mapa de eventos sísmicos tsunamigénicos ocurridos entre los años 1500 y 2014 (Carpio y Tavera, 2004).

Región Sur:

El tsunami más importante se presentó después de ocurrido el sismo del 13 de agosto de 1868 con magnitud ~ 8.8 Mw y epicentro entre las ciudades de Tacna y Arica. Después de 45 minutos de ocurrido el sismo, llega a la zona costera una primera ola de 12 m de altura que inunda el puerto de Arica. Después de una hora y 45 minutos, se produjo un nuevo movimiento sísmico que generó un tsunami con olas de 16 m de altura. Después de dos horas y 25 minutos del inicio del primer movimiento sísmico, llegó una tercera gran ola de 18 m de altura que varó la corbeta América de 1560 toneladas y al USS Wateree de los Estados Unidos a unos 500 m de la playa tierra dentro. Las olas gigantescas destruyeron gran parte del litoral peruano y chileno, muriendo en Arica unas 300 personas y en Arequipa

otras 30. La altura máxima del tsunami fue de 21 m en Concepción (Chile). El tsunami afectó la zona costera desde Pisco (Perú) hasta Iquique (Chile). Este tsunami produjo inundaciones en California, Hawái, Yokohama, Filipinas, Sydney y días después, ocasionó gran destrucción en las costas de Nueva Zelanda, Australia, Hawái y Samoa. Horas después, en la oscuridad se indica que se percibieron tres oleajes adicionales, pero de menor intensidad.

En la Figura 15 se muestran algunas imágenes de tsunamis que afectaron la costa peruana.



Figura 15: Algunos tsunamis que afectaron la costa peruana.

4.1.- Escenarios de tsunamis

Los mapas de escenarios por tsunami para la costa peruana han sido contruidos por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN), todos disponibles en su página web y que al presente, vienen siendo actualizados utilizando técnicas modernas de modelado numérico:

https://www.dhn.mil.pe/app/menu/tsunami/cartastsunamis/tsunamis_preencion/tsunamis_inundacion.htm,

La región costera para la cual existe un mayor número de estudios de tsunamis, es la costa central, y todos asumen la ocurrencia de sismos con magnitudes de 8,5 y 9,0 Mw. El detalle de estos estudios, por ejemplo, pueden ser consultados en PNUD (2011), Adriano et al. (2013) y Martínez y Tavera (2014). Para el resto de la zona costera, se están incrementando este tipo de estudios.

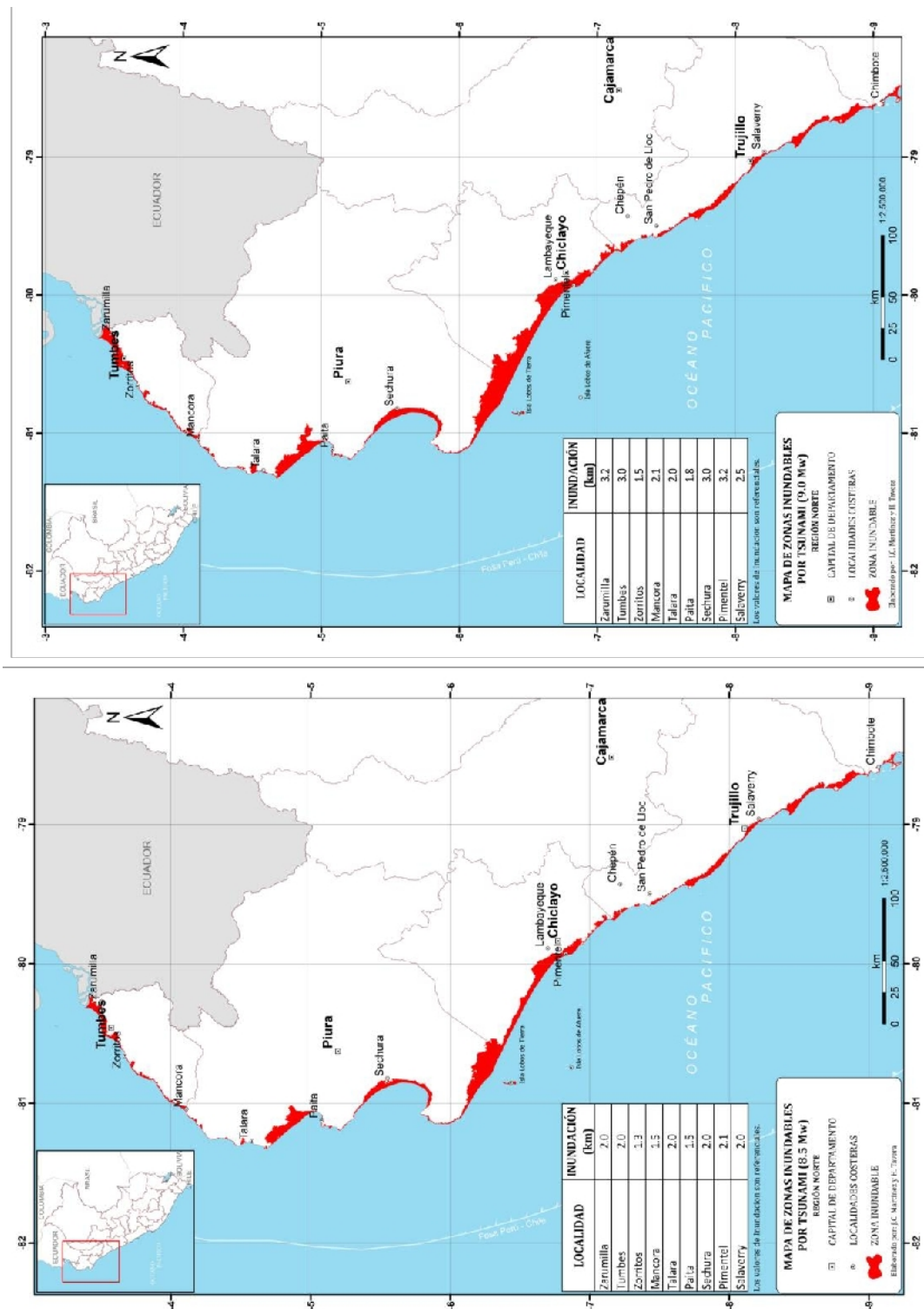


Figura 16: Simulación numérica para inundación por tsunami para la región norte del Perú considerando la ocurrencia de sismos con magnitudes de 8,5 y 9,0 Mw.

En general, para proponer escenarios de tsunami, es importante disponer de información básica como es: el modelo de fuente sísmica a emplear, 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 terremoto. 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 (Goto y Ogawa, 1992). Por otro lado, es importante comprender que el comportamiento de los tsunamis en zonas costeras dependerá directamente de factores como la batimetría del fondo oceánico, la morfología de la zona costera y la topografía de la misma, de ahí que ante la ocurrencia y presencia de tsunamis, algunas zonas son más afectadas que otras, a pesar que se encuentran a cortas distancias.

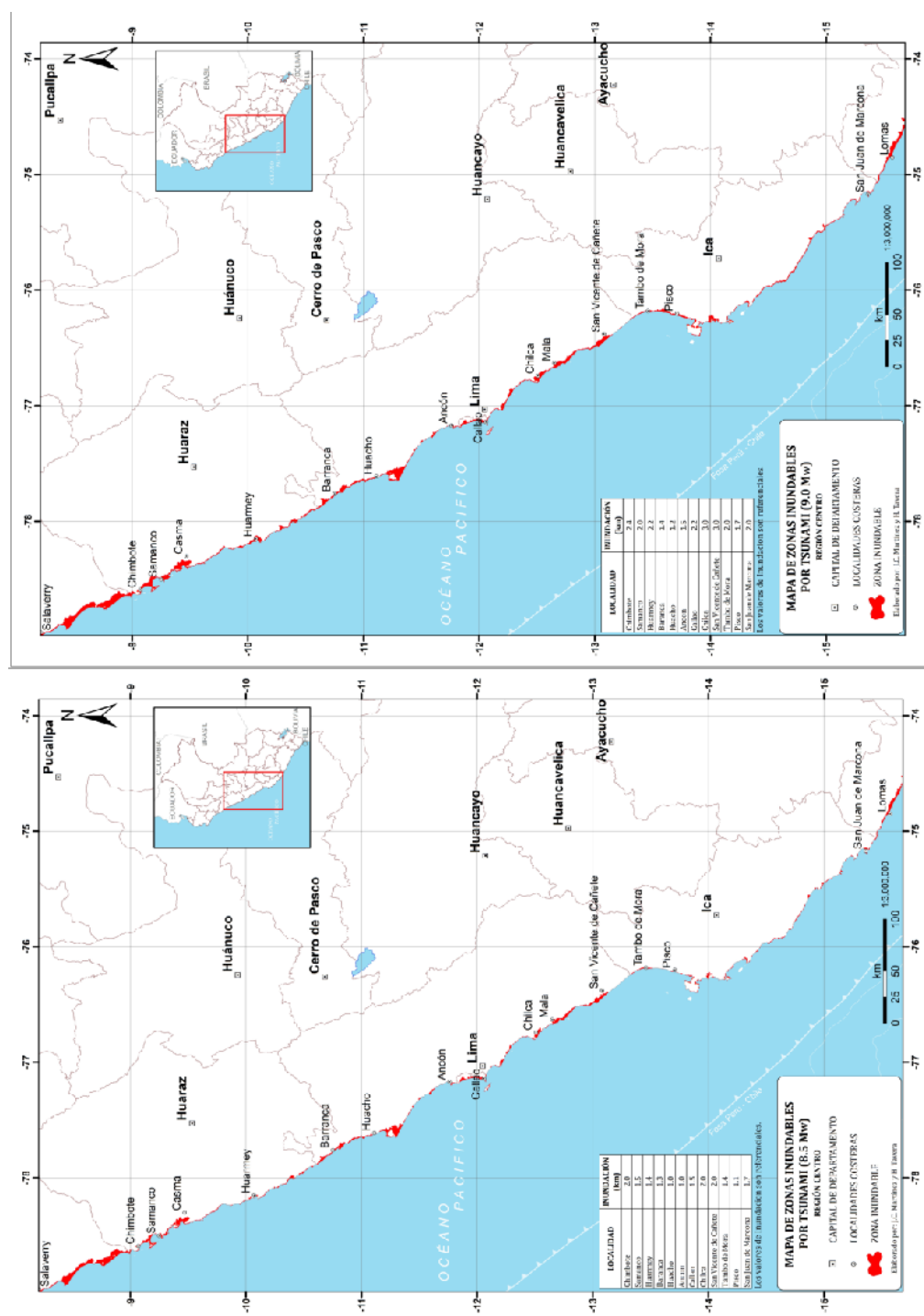


Figura 17: Simulación numérica para inundación por tsunami para la región centro del Perú considerando la ocurrencia de sismos con magnitudes de 8.5 y 9.0 Mw.

En la Figura 16 se muestra el resultado obtenido para la región norte del Perú, observándose que las inundaciones por tsunami hasta distancias de 2 a 3 km se podrían presentar en las zonas costeras de las ciudades de Zarumilla, Tumbes, Talara-Paita, Sechura, Pimentel y frente a las Islas Lobos de Tierra.

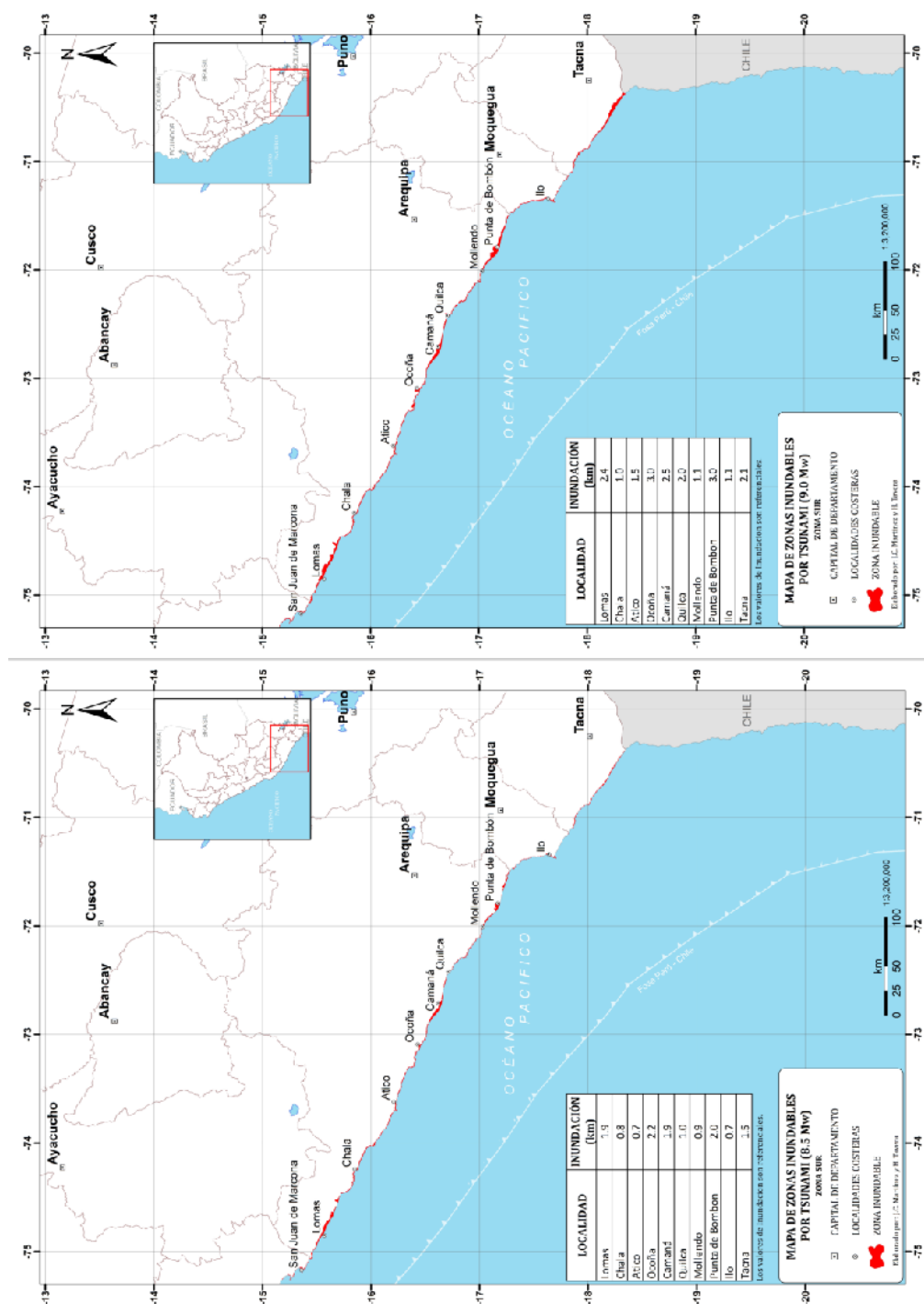


Figura 18: Simulación numérica para inundación por tsunami para la región sur del Perú considerando la ocurrencia de sismos con magnitudes de 8,5 y 9,0 Mw.

STRM: Imágenes para Sudamérica generadas por la Misión Topográfica de Radar.

GEBCO: Grupo internacional para la elaboración de la Carta Batimétrica General de los Océanos.

Para la región centro, la Figura 17 muestra que las inundaciones por tsunami serían del orden de 2 a 3 km en las zonas costeras de las ciudades de Chimbote, Chilca, Cañete, Callao, Huarmey y Tambo de Mora en Ica.

En la Figura 18 se muestra el resultado obtenido para la región sur del Perú, observándose que las inundaciones por tsunami alcanzarían distancias máximas de 3 km en las zonas costeras de las ciudades de Ocoña, Camaná, Punta de Bombón y Tacna.

4.2. - Notas del autor

De todos los efectos secundarios que se producen después de ocurrido un sismo de gran magnitud, los tsunamis resultan ser los de mayor peligro. Solo los sismos con epicentros en el mar y magnitudes igual o mayores a 7,0 Mw producen tsunamis con características de producir daño a la población costera. Por ello, todos los escenarios de tsunami propuestos con modelos numéricos consideran sismos con magnitudes mayores a 8,0 Mw.

En general, las simulaciones numéricas de tsunamis proponen información como tiempo de llegada de la primera ola de tsunami, su altura y las distancias de inundación horizontal sobre una superficie libre de obstáculos. Esta información es básica para prever situaciones de riesgo estructural y daños a la población.

La información histórica sobre tsunamis en el Perú, muestra escenarios para el momento en que ocurrieron estos peligros, si ellos se repiten es evidente que los escenarios serían más críticos, en razón a que la población ha invadido zonas cercanas a la línea de costa construyendo zonas residenciales, barriadas vecinales, además de la presencia de algunas empresas nacionales y privadas.

Para una correcta gestión de riesgo, es suficiente disponer de un mapa de inundación por tsunami para la zona de interés y sobre él, proyectar información catastral que considere hospitales, colegios e instituciones estatales de servicios públicos, ya que de este modo, sería fácil tener visión sobre posibles escenarios de desastre.

5.- EL PELIGRO DE LOS DESLIZAMIENTOS

Los deslizamientos son otros de los efectos secundarios que se presentan a la ocurrencia de sismos de gran magnitud. Un deslizamiento consiste en el descenso masivo y relativamente rápido de materiales —a veces de carácter catastrófico— a lo largo de una pendiente. El material se desliza como una masa única sobre una superficie inclinada, que por acción de la gravedad, pierde estabilidad debido al sacudimiento del suelo producto de la ocurrencia de un sismo.

La historia sísmica del Perú detalla la ocurrencia de un gran número de eventos sísmicos que produjeron diversos escenarios de deslizamientos, en mayor número en las zonas andinas y selva alta, por las condiciones topográficas, geológicas y climáticas de estas zonas. En la Figura 19, se muestra el mapa de deslizamientos propuesto por Alva y Chang (1987) y actualizado en este estudio. En dicho mapa se observa que el mayor número de deslizamientos se presentaron básicamente en la zona andina y de manera puntual en los departamentos de San Martín y Cusco. En la zona costera los deslizamientos estuvieron presentes en la localidad de Ocoña-Arequipa y en los departamentos de Ica y Lima. Al repetirse los sismos que les dieron origen, los escenarios de daños serían similares o mayores.

5.1.- Deslizamientos importantes

Los deslizamientos más importantes podrían ser los acontecidos en la ciudad del Cusco durante la ocurrencia del sismo del 31 de marzo de 1650. Silgado (1978) indica que se produjeron grandes deslizamientos en las partes altas de Pisac y Paucartambo, uno de ellos represó el río Apurímac. Otro evento sísmico, ocurrido el 10 de noviembre de 1946, produjo grandes derrumbes en varias quebradas de la zona de Quiches-Áncash. Según Silgado (1978), en la quebrada Pelagatos se desprendieron 25 millones de metros cúbicos de tierra sobre el valle. En la parte alta de la localidad de Quiches (Huaychayaco) se desprendieron 5 millones de metros cúbicos de material calizo-margoso. Un deslizamiento de grandes proporciones sepultó al caserío de Acobamba, donde murieron 217 personas.

Quizás el mayor deslizamiento producido por sismos fue el ocurrido en el callejón de Huaylas (Áncash), debido a la ocurrencia de un evento sísmico el día 31 de mayo de 1970. El sacudimiento del suelo produjo el desprendimiento de bloques de hielo del nevado Huascarán, seguido de un gran aluvión que arrasó con la población de Yungay y Ranrahirca, ambas ciudades fueron sepultadas por una masa de tierra y lodo con un volumen estimado de más de 250 millones de metros cúbicos y altura de 6 metros. Los más grandes deslizamientos estuvieron concentrados en los cursos bajos del río Santa y tributarios.

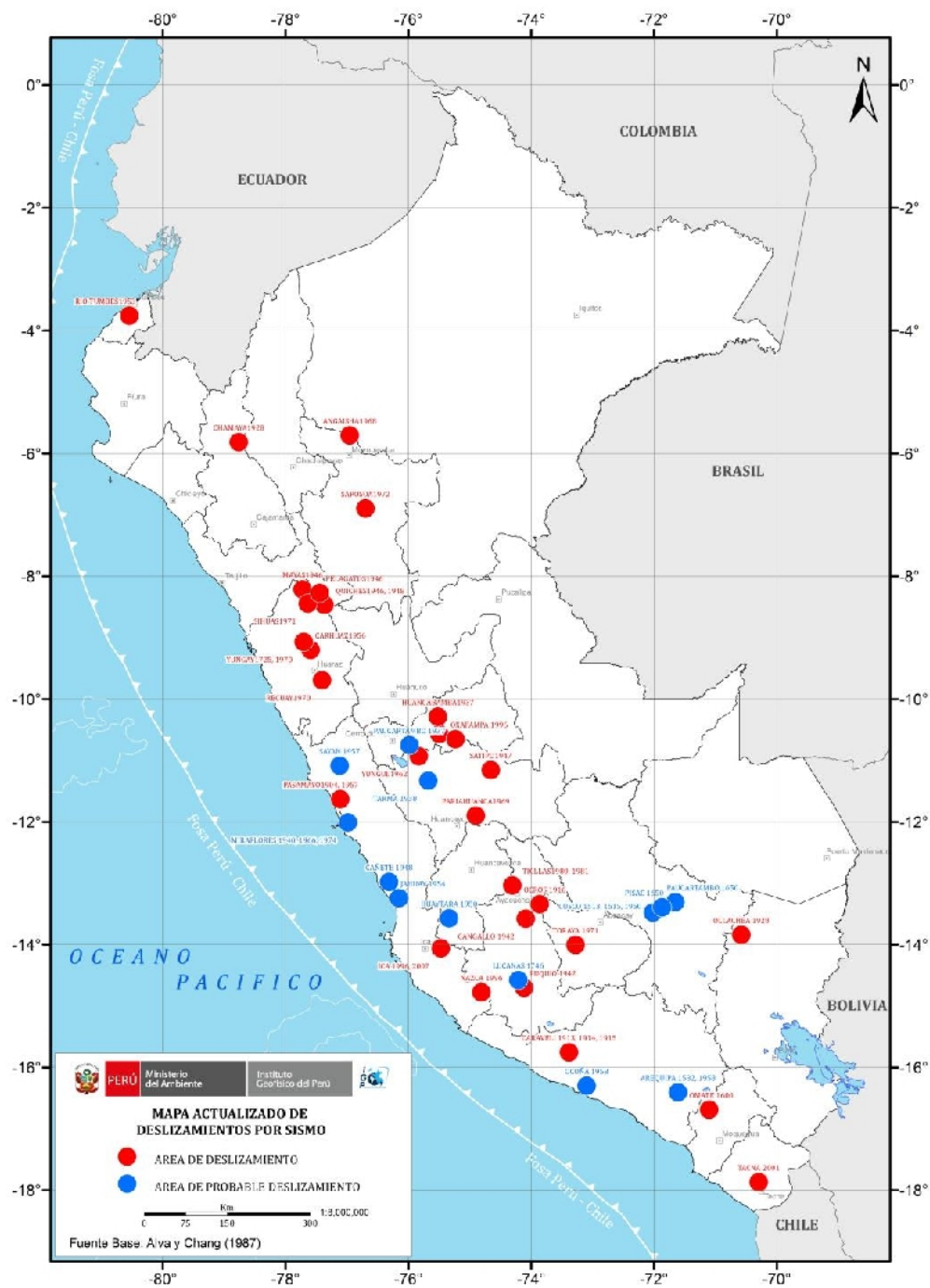


Figura 19. Mapa de deslizamientos por sismos ocurridos en Perú, actualizado al 2014. Para cada evento se indica lugar y fecha de ocurrencia del deslizamiento.

5.2.- Notas del autor

Es importante reconocer que las zonas afectadas en el pasado por deslizamientos presentan suelos inestables y en muchos casos, ellas han sido invadidas por la población, lo cual incrementa el riesgo. En zonas andinas, la continua presencia de

lluvias durante los meses de octubre - abril, hace más inestables a los suelos y por ende, el riesgo de deslizamientos se incrementa.

De repetirse los sismos en las mismas zonas, los escenarios de deslizamientos nuevamente se harán presentes y en este caso, podrían ser más críticos debido a que la población ha invadido las zonas de mayor riesgo. En la Figura 20, se muestra algunos ejemplos de deslizamientos en diferentes zonas afectadas por sismos.



Figura 20: Ejemplos de la ocurrencia de deslizamientos por inestabilidad de suelos y por ocurrencia de sismos en el caso de Yungay y costa Verde.

6.- EL PELIGRO DE LA LICUACIÓN DE SUELOS

La licuación de suelos es otro de los efectos secundarios que frecuentemente acompañan a los sismos de gran magnitud. Estos describen el comportamiento de suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas circunstancias pasan de un estado sólido a líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado. Es uno de los fenómenos más dramáticos y destructivos y, además, más polémicos y peor explicados al ser inducidos en depósitos por acción sísmica. Es más probable que la licuefacción ocurra en suelos granulados sueltos saturados o moderadamente saturados de agua con un drenaje pobre, tales como arenas sedimentadas o arenas y gravas que contienen vetas de sedimentos impermeables.

En el Perú, durante la ocurrencia de sismos, han sido muchos los procesos de licuación de suelos observados en zonas cuyos suelos estaban, generalmente compuestos por arenas limosas de variado tamaño de grano, conglomerados de grano fino y agua. La información sobre estos procesos fue recopilada por Alva (1982) y actualizada en este informe (Figura 21). En la figura se observa que en la zona costera la ocurrencia de licuación de suelos es generalizada, siendo aquí donde la frecuencia de sismos es mayor, entonces existe correspondencia entre las altas intensidades observadas y la licuación de suelos.

6.1.- Principales procesos de licuación de suelos

Los procesos de licuación de suelos más importantes son tres, los producidos en suelos de Chimbote (Áncash) debido al sismo de 1970, valle del Alto Mayo (Moyobamba) debido a los eventos sísmicos de 1990 y 1991, y finalmente, en Tambo de Mora (Ica) debido al evento del 2007.

Chimbote, 1970: El departamento de Áncash fue afectado con intensidades de VIII-IX (MM) debido a la ocurrencia de un evento sísmico con magnitud de 7,7 Mw, situación que produjo procesos de licuación de suelos en Casma, Puerto Casma y cerca de la costa de la ciudad de Chimbote, se produjo el desplazamiento lateral del suelo conformado por deltaicos de playa. En el casco urbano de Chimbote, era evidente la presencia de licuación de suelos y de densificación diferencial. Cluff (1971) indicó la presencia de fallas en suelos saturados y sueltos, además de la formación de volcanes de arena y eyección de agua en zonas con capas freáticas superficiales.

Moyobamba, 1990 y 1991: El valle del Alto Mayo fue afectado con intensidades de VIII-IX (MM) debido a la ocurrencia de dos sismos con magnitudes de 6,5 Mw, provocando la licuación de suelos en varias zonas con suelos aluviales, coluviales, fluviales y residuales; es decir, suelos licuables por naturaleza. Asimismo, se reportó la ocurrencia de inestabilidad y corrosión de suelos en los taludes, asentamientos diferenciales,

amplificación de suelos, y deslizamientos dentro del área epicentral. Los mayores procesos de licuación de suelos ocurrieron en las localidades de Tahuishco, Azunge, Shango, Chorro, Molino Valencia, Segunda Jerusalén, Río Negro y La Conquista, todos ubicados en los alrededores de la ciudad de Moyobamba.

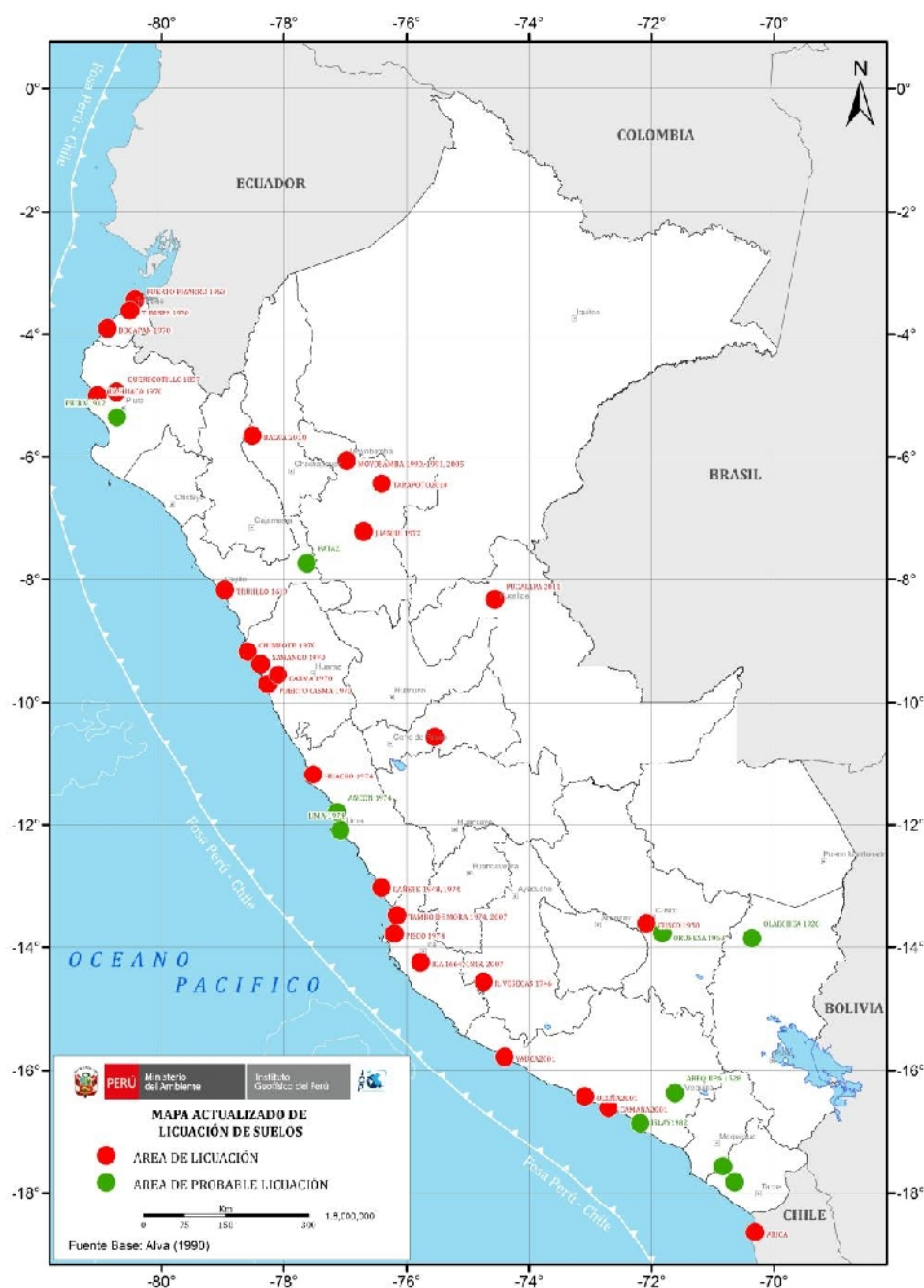


Figura 21: Mapa de licuación de suelos por sismos ocurridos en Perú, actualizado al 2014. Para cada evento se indica lugar y fecha de ocurrencia.

Pisco, 2007: Durante la ocurrencia del sismo de Pisco (8,0 Mw), las localidades de Chincha y Tambo de Mora soportaron intensidades de VIII (MM) y la zona más afectada con procesos de licuación de suelos considera el margen costero comprendido entre el distrito de Villa el Salvador (Lima Metropolitana) y la localidad de Paracas (Ica). En este

tramo se observaron una gran variedad de fallas de terreno por licuación de suelos, así como desplazamientos laterales masivos a lo largo de 3 km, un deslizamiento con talud de 400 metros de largo en la zona conocida como Jahuay, edificaciones asentados hasta 1 metro, terraplenes de carreteras dañados por desplazamientos laterales, colapso de postes de tendidos eléctricos en suelos licuables, rompimiento de ductos de agua y alcantarillados, daños en zonas portuarias; además, de la formación de conos de arena y eyección de arena húmeda. Estos procesos se realizaron en suelos conformados por rellenos artificiales, depósitos marinos, eólicos y aluviales compuestos por arena y arena limosa de forma y tamaño de grano variable (Rodríguez-Marek et al, 2007).

En la Figura 22 se presentan algunos ejemplos de procesos de licuación de suelos evidenciados durante la ocurrencia de sismos en el Perú.



Figura 22: Ejemplos de procesos de licuación de suelos por sismos.

6.2.- Notas del autor

Las zonas en donde se evidenciaron la ocurrencia de procesos de licuación de suelos, están mayormente conformados por arenas de diferente tamaño de grano y capas freáticas, situación presente en toda la zona costera del Perú y en algunos valles costeros y andinos con presencia de suelos poco consolidados. El mapa de la Figura 21 muestra claramente las zonas afectadas por licuación de suelos y en donde se repetirán ante la ocurrencia de nuevos eventos sísmicos.

CONCLUSIONES

El Perú se encuentra ubicado en una de las regiones de mayor actividad sísmica en el mundo y, por ello, estará siempre expuesto a ser afectado por sismos de diferente magnitud y niveles de sacudimiento del suelo. El análisis de ocurrencia de este peligro potencial, así como de sus efectos secundarios, discutidos en el presente informe, permite concluir y remarcar los siguientes puntos:

1.- La principal fuente sismogénica en el Perú considera el área comprendida entre la línea de costa y la fosa peruano-chilena, aquí la frecuencia de sismos es mayor y muchos de ellos alcanzaron magnitudes superiores a 8,0 Mw, llegando a producir en las ciudades costeras destrucción y gran mortandad. En el interior del continente, destaca la zona subandina entre las ciudades de Moyobamba y Satipo. Hacia el sur, destacan la zona de Ayacucho, Cusco y Arequipa. Aquí los sismos presentaron magnitudes menores pero los daños que causaron, en áreas relativamente pequeñas, fueron similares a las zonas costeras.

Los eventos sísmicos del pasado se repetirán, pero en este caso, el escenario sería diferente debido a que las ciudades costeras se han expandido sobre zonas en las cuales el suelo no es de buena calidad o la topografía no es la más adecuada. A esto se suma el incremento de estructuras y viviendas con diversidad en cuanto al tipo de construcción y material utilizado. Del mismo modo, es importante considerar el estado físico de las viviendas antiguas construidas con adobe, quincha y madera, ellas simplemente incrementan la vulnerabilidad física de las ciudades.

2.- Para sismos históricos, los niveles de sacudimiento del suelo han sido inferidos a partir de los mapas de intensidades máximas expresadas en la escala de Mercalli Modificada. Si los sismos se repiten, los suelos deben tener similar comportamiento y en este sentido, se debe orientar la gestión del riesgo. En estos últimos 500 años, la zona costera del Perú ha sido sacudida con los mayores niveles de intensidad, con respecto a las zonas andinas y subandinas.

Debe entenderse que los niveles de sacudimiento de los suelos dependen de su composición geológica, siendo los suelos menos compactos los que amplifican las ondas sísmicas y facilitan el desarrollo de daños en estructuras y estas, en las personas. En este caso, un mapa de zonificación de suelos proporcionará información importante para guiar el crecimiento y desarrollo de las ciudades.

3.- La historia de los tsunamis que afectaron la zona costera del Perú, también muestran las zonas que podrían ser afectadas en el futuro por este peligro. Tal es el caso, del tsunami de 1960 en la región norte, 1746 en la región centro y 1868, en la región sur. Los mapas de escenarios de tsunamis obtenidos mediante la técnica de modelado numérico,

muestran que sólo algunas zonas de la costa peruana, podrían ser afectadas con mayor grado.

Para zonas costeras, los mapas de escenario de tsunamis son importantes a fin de que las autoridades procedan a normar el uso del suelo y sobre todo el de las playas. La historia ha mostrado que estos mapas resultan ser buenos guías en la gestión del riesgo, aunque muchas veces los escenarios reales están más allá de lo que se logra proponer.

- 4.- Los mapas de deslizamientos y licuación de suelos presentados en este informe, muestran claramente las zonas de mayor incidencia de estos peligros ante ocurrencia de sismos. Históricamente, el riesgo mayor involucra a toda la zona costera y en menor grado a las zonas andina y subandina.

La historia sísmica del Perú y los resultados obtenidos en estudios netamente científicos, han demostrado que los sismos son cíclicos, así como los efectos secundarios que ellos generan. Si una determinada zona o área fue afectada en el pasado por cualquiera de estos peligros, en el futuro volverá a serlo, esta afirmación resume una ley de la naturaleza. Sin embargo, los daños que ellos causarían en las ciudades dependerán únicamente del estado en el cual se han desarrollado y estructurado su crecimiento.

Debe entenderse que el hombre por su propia naturaleza, ha buscado asentarse y ver crecer sus sociedades cerca de los recursos básicos para su supervivencia, por ejemplo, cerca del mar y de los ríos. Esta situación ha permitido que siempre se encuentren cerca de peligros naturales recurrentes en el tiempo y que solo la experiencia de convivencia, les ha permitido realizar y tomar acciones orientadas directamente a ser menos vulnerables a estos peligros. Esto ha sido demostrado por sociedades que son parte de países que han tenido mayor experiencia con los sismos como Japón, Chile y México. Aunque la realidad sea difícil de aceptarla, a la sociedad peruana le falta ser parte de similares experiencias, para construir un país mejor desarrollado y menos vulnerable.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Arq. Mercedes de Guadalupe Masana García, Jefa del CENEPRED, por la iniciativa de preparar este documento que esperamos sea de utilidad para las tareas de gestión de riesgo que se vienen desarrollando en nuestro país. A la Dra. Yamina Silva por sus comentarios y revisión del manuscrito. Del mismo modo, a Patricia Guardia y Julio Martínez por su apoyo en la elaboración de los mapas y figuras que acompañan a este informe.

BIBLIOGRAFIA

- Adriano, B., Mas, E., Koshima, S., Fujii, Y. (2013). Tsunami inundation mapping in Lima for two tsunami source scenarios. JDR, Vol 8, 2.
- Alva, J. y Chang, L. (1987). Mapa de áreas de deslizamientos por sismos en el Perú. V Congreso nacional de Mecánica de Suelos e ingeniería de Cimentaciones, Lima, Perú.
- Alva, J., Meneses, J., y Guzman, V. (1984). Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú. V Congreso Nacional de Ingeniería Civil., Tacna, Perú.
- Alva, J. (1982). Licuación de Suelos. CISMID, Lima, Perú.
- Carpio, J. y Tavera, H. (2002). Estructura de un catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catalogo de Gustakov (2002). BSGP, V94, 45-59.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avoac, J-P. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along Central Andes subduction zone. J. G. R. Vol 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166
- Condori, C., Tavera, H. (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.
- De Mets, C., Gordon, R., Aarhus, A., y Stein, S. (1980). Current plate motions. Geophys. J. Int., 101, 425-478.
- 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.
- Goto, C., Ogawa, Y. (1992). Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme (Translated for the Time Project by Shuto, N., Disaster Control Research Center, Faculty of Engineering, Tohoku University in June 2002.
- Guardia, P. y Tavera, H. (2012). Inferencias de la superficie de acoplamiento sísmico interplaca en el borde occidental del Perú. Bol. Soc. Geol. Peru, 106: 37-48.
- Gusiakov, V. (2002). Basic Pacific tsunami catalog and database, 47 BC- 2000 AD:Results of the first stage of the project. Tsunami Laboratory, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
- Huaco, D. (1986).-Catálogo sísmico de Perú 1500-1982, Instituto Geofísico del Perú - Proyecto SISRA, 340p.
- Kagan, Y. y Jackson, D. (1991). Seismic gap hypothesis: Ten years after. JGR, 96, 21419-21431
- Kelleher, J. (1972). Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. JGR, 77, 2087-2103.
- Kelleher, J. y W. McCann (1976). Buoyant zones, great earthquakes, and some predictions, J. Geophys. Res., 81, 4885-4896.
- Kuroiwa, J. (2004). Disaster Reduction. Living in harmony with nature. Editorial NSG, 350 pp.
- 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.
- McCann, R., S. Nishenko, L. Sykes y J. Krause, (1979). Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries, PAGEOPH, 117, pp. 1,082 - 1,147
- Nishenko, S. (1985). Seismic potential for large and great interpolate earthquakes along the Chilean and Sourthen Peruvian margin of South America: a quantitative reappraisal. JGR, 90, 3589-3615.
- Nocuqet, J-M., Villegas-Lanza, J.C., Chlieh, M., et al. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern andes. Nature Geosciences, DOI: 10.1038/NCEO2099

- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A. Dixon, T. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America Convergence. *Science*, 279, 358-362.
- Norabuena, E.O; Leffler L.; Mao, A.; Dixon, T.; Stein, S.; Sacks, I. S.; Ocola, L.; Ellis, M. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the Central Andes *Science*, 279,358-362.
- Ocola, L. (1984). Catálogo Sísmico República del Perú, Proyecto de Sismicidad Andina SISAN, 464p.
- Pararas-Carayannis, G. (1974). An investigation of tsunami source mechanism of the coast of central Peru. *Marine Geology*, V17, 235-247.
- PNUD (2011). Proyecto SIRAD: Recursos de respuesta inmediata y de recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en Lima Metropolitana y Callao. INDECI, 200 p.
- 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.
- Rodríguez-Marek, A., Alva, J., Cox, B., et al. (2007). Aspectos geotécnicos del sismo de Pisco, Perú del 15 de agosto del 2007. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*
- Ruegg., J., Olcay, M., Armijo, R. (2002). Coseismic and aseismic slip observed from continuous GPS measurements for the 2001 southern Peru earthquake. *ISAG*.
- Ruegg, J., Rudloff, A., Vigny, C., Madariaga, R. (2009). Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepcion in Chile. *PEPI*, 175, 78-85.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en Perú, 1513-1974. *Inst. Geol. Minero de Perú*, 131 pag.
- Soloviev, S. y Go, Ch. (1975). A catalogue of tsunami on the eastern shore of the Pacific Ocean. Moscow, Nauka Publiisshing Hpuse, 202 p.
- Tavera, H. (2011). Mapa sísmico del Perú, periodo 1960 al 2011. Dirección de Sismología, IGP.
- Tavera, H. (2010). Estudio de tsunamis en el distrito del Callao. Informe Técnico, COOPI., PNUD/SDP-049/2009.
- Tavera, H. y Bernal, I. (2005). Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste de Perú. Vol. 6, SGP, 89-102.
- Tavera, H. y Agüero, C. (2002). Catálogo Sísmico del Perú 1471 – 1982. Versión revisada y actualizada. Dirección de Sismología, IGP, 300 pag.
- Wiemer S. y Wyss, M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times? *Jour. Geophys. Res.* 102, 15115-15128.

A N E X O 1

Escala de Intensidades de Mercalli Modificada (Versión resumida)

GRADO	DESCRIPCION
I	No sentido excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Sentido solo por muy pocas personas en reposo, especialmente en pisos altos. Objetos suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido por personas dentro de edificaciones, especialmente las ubicadas en pisos superiores. Muchas personas no se dan cuenta que se trata de un sismo. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como las producidas por el paso de un camión. Duración apreciable.
IV	Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunos se despiertan. Ventanas y puertas son agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunas ventanas y puertas de vidrio se rompen; grietas en el revestimiento de algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI	Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algunos muebles pesados se mueven; algunos casos de caída de revestimientos y paredes inestables. Daño leve.
VII	Muchas personas corren al exterior. Daño significativo en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; caída de paredes inestables. Notado por personas que conducen automóviles.
VIII	Daño leve en estructuras de diseño especial; considerable en edificios corrientes sólidos con colapso parcial; grande en estructuras de construcción pobre. Paredes separadas de la estructura. Caída de paredes inestables, rimeros de fábricas, columnas, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Posibles procesos de licuación de suelos. Cambios en niveles de agua en pozos. Conductores en automóviles entorpecidos. En zonas costeras generación de tsunami. En zonas andinas y subandinas, presencia de deslizamientos.
IX	Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras con armaduras bien diseñadas pierden la vertical; grande en edificios sólidos con colapso parcial. Los edificios se desplazan de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas. Procesos de licuación de suelos. En zonas costeras generación de tsunami y procesos de licuación de suelos. En zonas andinas y subandinas, presencia de deslizamientos.
X	Algunos edificios bien construidos en madera, destruidos; la mayoría de las obras de estructura de ladrillo, destruidas con los cimientos; suelo muy agrietado. Carriles torcidos. Corrimientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. En zonas costeras generación de tsunami de gran envergadura y procesos de licuación de suelos. En zonas andinas y subandinas, presencia de deslizamientos.
XI	Pocas o ninguna obra de albañilería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Carriles muy retorcidos. En zonas costeras generación de tsunamis y procesos de licuación de suelos. En zonas andinas y subandinas, presencia de deslizamientos.
XII	Destrucción total.

A N E X O 2

Base de datos de Tsunamis ocurridos en Perú (Carpio y Tavera, 2002)

CATALOGO DE TSUNAMIS LOCALES OCURRIDOS QUE AFECTARON LAS COSTAS DEL PERÚ																								
Nº	UTC				Coordenadas		Z	Magnitud de la Fuente				Mo	Intensidad Fuente	Mt	Intensidad Tsunami	Hmax	Nobs	D	F	C	V	RGT	Ref	Localidades Afectadas
	AÑO	MES	DIA	Hh-Mn-Sg	Latitud	Longitud		Mb	Ms	Mm	Mw													
1	1513				-17.2	-72.3	30.0		8.7					3.0		1.0	S		T	2.0	SAM	SG2	Camaná, Quilca, Matarani, Mollendo	
2	1515				-17.2	-72.4	30.0										N		TL		SAM	LC	Camaná, Quilca, Matarani, Mollendo	
3	1533	1		00:00:00	-12.2	-77.8	30.0		6.5								N		TL	1.0	SAM	*SIL	Callao, Lima	
4	1555	11	15	00:00:00	-11.9	-77.6	30.0		8.4			VI					N		T	1.0	SAM	SIL	Callao, Lima	
5	1568	4	4	00:00:00	-12.3	-77.7	30.0		6.6			IX					N		T	1.0	SAM	SIL	Callao, Lima	
6	1581				-12.3	-77.7	30.0		7.6			VI					N		T	0.0	SAM	SIL	Callao, Lima	
7	1582	1	22	16:30:00	-	-	30.0		8.2		7.5	X				0.0			T	0.0	SAM	SGN	Arequipa, Perú	
8	1582	8	15	00:00:00	-12.2	-77.6	30.0		7.8			VII							T	0.0	SAM	SIL	Lima, Perú	
9	1584	3	17		-11.8	-77.8	30.0		8.4			VII							T	1.0		IGP	Lima, Perú	
10	1586	7	10	00:30:00	-12.1	-77.0	40.0		8.6			X		3.5	26.0	5.0	L	20	T	4.0	SAM	LOC	Lima, Perú	
11	1590				-17.2	-72.9	40.0		7.7			VII		1.5		1.0			T	2.0	SAM	SG2	Arequipa, Perú	
12	1600	2	19	10:00:00	-	-	20.0		7.9			XI							T	2.0	SAM	IGP	Sur del Perú, Norte de Chile	
13	1600	2	19	22:00:00	-	-	6.0					IX							T	1.0	SAM	IGP	Sur del Perú, Norte de Chile	
14	1600	2	28	20:00:00	-	-	20.0		8.1			X							T	1.0	SAM	IGP	Sur del Perú, Norte de Chile	
15	1604	11	24	18:30:00	-17.9	-71.0	30.0		9.4			X		3.5	16.0	4.0	L	20	T	4.0	SAM	SG2	Sur del Perú, Norte de Chile	
16	1606	3	23	08:00:00	-7.0	-80.3	40.0		6.5			VI					N		T	1.0	SAM	SIL	Huanchaco (La Libertad)	
17	1606	10	25	13:00:00	-11.8	-77.8	60.0	6.8				IX							T	1.0	SAM	IGP	Callao, Lima	
18	1609	10	20	01:00:00	-11.9	-77.4	40.0		7.4		8.6	IX							T	1.0	SAM	IGP	Callao, Lima	
19	1615	9	16	00:00:00	-18.3	-71.0	40.0		8.8			IX		1.5	4.0	2.0	M		T	4.0	SAM	LOC	Sur del Perú, Norte de Chile	
20	1619	2	14	16:30:00	-7.9	-79.0	40.0		8.6		8.7	IX				0.0			T	1.0	SAM	SGN	Pacasmayo, Malabrigo, Huanchaco, Puerto Mori (La Libertad)	
21	1630	11	27	15:30:00	-12.2	-77.5	30.0		7.5			VII							T	1.0	SAM	IGP	Callao, Chorrillos, Pachacamac, Punta Hermosa (Lima)	
22	1647	5	7	15:30:00	-12.2	-77.5	40.0		8.5					2.0	2.8	6.0	S	2000	T	3.0	SAM	IGP	Perú	
23	1647	5	13	15:30:00	-14.0	-76.5	40.0		7.9			VII				0.0			T	2.0	SAM	LOC	Pisco, Paracas, Barlovento	
24	1647	5	14	03:00:00	-	-	40.0		8.0										T	3.0	SAM	LOC	Argentina, Chile, Sur del Perú	
25	1658	2	14	00:00:00	-8.2	-80.1	40.0		7.7			VII							T	1.0	SAM	IGP	Pacasmayo, Malabrigo, Huanchaco, Puerto Mori (La Libertad)	
26	1664	5	12	09:15:00	-14.4	-75.9	15.0		7.3			X							T	1.0	SAM	IGP	Laguna Grande, Pisco, Paracas, Barlovento, Punta Lomitas, Punta Caballas, San Juan de Marcona	
27	1678	6	16	01:45:00	-12.3	-77.8	40.0				7.7	IX							T	1.0	SAM	SIL	Huacho, Chancay, Ancón, Callao, Chorrillos (Lima)	
28	1678	6	18		-12.3	-77.8	40.0					IX							T	1.0	SAM	IGP	Huacho, Chancay, Ancón, Callao, Chorrillos (Lima)	
29	1681	3	10		-18.5	-70.3	-		7.5							1.0			T	3.0	SAM	SGN	Sur del Perú, Norte de Chile	
30	1687	7	12	07:00:00	-32.8	-70.7	-		7.3							1.0			T	2.0	SAM	LOC	Sur del Perú, Norte de Chile	
31	1687	10	20	10:30:00	-13.2	-76.5	30.0		8.2		8.6	1.00*E+24	X	3.5	8.0	14.0	M	5000	T	4.0	SAM	LOC	Pisco, Callao, Lima	
32	1690	11	20	19:30:00	-12.6	-77.0	40.0		7.2			VI							T	1.0	SAM	IGP	Huacho, Chancay, Ancón, Callao, Chorrillos (Lima)	
33	1705	11	26		-18.6	-70.2	-								8.0	2.0	M		T	0.0	SAM	SGN	Sur del Perú, Norte de Chile	
34	1715	8	23	00:00:00	-18.5	-70.3	-		7.5							1.0			T	3.0	SAM	SGN	Sur del Perú, Norte de Chile	
35	1716	2	11	01:00:00	-	-	50.0												T		SAM	IGP	Pisco, Nazca, Callao, Lima	
36	1725	3	27	00:00:00	-16.7	-73.0	50.0		6.0					1.5	2.0	2.0	S		T	2.0	SAM	LOC	Lomas, Chala, Atico, Camaná, Quilca, Matarani, Mollendo, Mejía (Arequipa)	
37	1732	12	2	06:00:00	-11.8	-77.6	50.0		6.9			VI							T		SAM	IGP	Ancón, Callao, Chorrillos (Lima)	
38	1746	10	29	03:30:00	-12.0	-77.2	30.0				8.6	X	9.2	3.5	24.0	7.0	L	3800	T	4.0	SAM	SG2	Lima, Callao (Perú)	
39	1784	5	13	12:36:00	-	-	27.0					X				0.0	S	54	T	0.0	SAM	SGN	Sur del Perú	
40	1806	12	1		-12.0	-78.0	30.0					VII			6.0				T	1.0	SAM	IGP	Ancón, Callao, Chorrillos (Lima)	
41	1828	3	30	12:30:00	-12.1	-77.8	50.0					VII						30	T	1.0	SAM	IGP	Ancón, Callao, Chorrillos (Lima)	
42	1833	9	18	10:45:00	-18.3	-71.0	60.0		7.7		7.2	VII						18	T	1.0	SAM	IGP	Ilo (Moquegua)	
43	1860	4	23	19:00:00	-12.0	-77.1	-								0.7	1.0	N		T	3.0	SAM	LOC	Ancón, Callao, Chorrillos (Lima)	
44	1868	8	13	21:23:00	-	-	25.0		8.8		9.1	X	9.0	4.0	18.0	115.0	L	612	T	4.0	SAM	LLK	Sur de Perú, Norte de Chile	
45	1868	8	13	22:46:00	-18.3	-70.6	25.0		8.6			VI							T	1.0	SAM	IGP	Tacna, Arica	
46	1869	8	24	18:45:00	-17.5	-72.0	30.0		8.4			VI		1.5	2.0	4.0	S		T	4.0	SAM	IGP	Sur del Perú, Norte de Chile	
47	1871	8	21		-13.0	-77.0	-		7.0					1.0	2.0	1.0	S		T	1.0	SAM	SG2	Arequipa, Perú	
48	1872	1	10	07:17:00	-	-	-		7.0							1.0			T	1.0	SAM	SG2	Lima, Perú	
49	1877	5	10	01:28:00	-	-	40.0		8.8		9.0	VII		4.0	21.0	117.0	L	512	T	4.0	SAM	SG2	Sur de Perú, Norte de Chile	
50	1878	1	10		-19.6	169.4	-		7.5					3.0	12.0	1.0	L		T	3.0	NGS	SG1	Costa Peruana (Tsunami de Islandia)	
51	1878	1	23	00:00:00	-	-	40.0		7.9			VII							T		SAM	IGP	Sur del Perú, Norte de Chile	
52	1883	8	27	02:59:00	-6.1	105.4	-							4.5	35.0	64.0	L	36000	VM	4.0	IND	SG1	Explosión del volcán Krakatoa (Indonesia) afecto las costas del pacifico	
53	1906	5	5	00:36:00	-18.3	-71.0	30.0					VII		0.0	1.5	5.0	S		T	2.0	SAM	SG2	Ilo (Moquegua) Ite, Vilavila (Tacna)	
54	1908	6	16	17:50:00	-18.2	-70.8	30.0					VII							T	1.0	SAM	IGP	Ilo (Moquegua) Ite, Vilavila (Tacna)	
55	1912	7	24	11:50:00	-	-	30.0					X							T	1.0	SAM	IGP	Norte del Perú	
56	1913	7	28	06:40:00	-16.6	-73.3	30.0		7.0			IX		0.0	0.7	1.0	N		T	1.0	SAM	LOC	Sur del Perú, Norte de Chile	
57	1913	8	6	22:14:00	-	-	80.0		7.8			X				1.0			T	2.0	SAM	LOC	Sur del Perú, Norte de Chile	
58	1913	11	4	21:33:00	-	-	20.0					X						150	T	1.0	SAM	IGP	Sur de Perú	
59	1914	1	12		-	-	33.0							1.5	1.0	1.0	S		T	4.0	SAM	LOC	Perú	
60	1914	12	2	23:55:00	-	-	15.0																	

64	1924	3	11	22:44:00	-4.0	-82.0	60.0		6.8											T	1.0	SAM	IGP	Tumbes, Piura	
65	1925	3	16	16:08:00	-18.0	-73.0	-													T	1.0	SAM	IGP	Sur de Perú	
66	1925	10	25	04:30:00	-18.0	-73.0	-		6.9											T	1.0	SAM	IGP	Sur de Arequipa, Norte de Tacna	
67	1927	3	13	05:32:00	-6.0	-81.5	-		6.0											T	1.0	SAM	IGP	Piura	
68	1933	8	6	02:54:00	-13.2	-76.5	60.0		6.5			VI								T	1.0	SAM	IGP	Callao, Lima	
69	1933	10	2	15:29:00	-2.0	-81.0	-		6.9											T	1.0	SAM	IGP	Tumbes	
70	1933	10	3	10:21:00	-1.8	-80.8	-		6.3											T	1.0	SAM	IGP	Tumbes	
71	1933	10	3	14:21:00	-1.8	-80.8	-		6.0											T	1.0	SAM	IGP	Tumbes	
72	1934	12	4	17:24:00	-	-	11.0		6.9			VI		0.0			N			T	1.0	SAM	IGP	Sur de Tacna	
73	1937	12	24	06:20:00	-	-	25.0	5.7	6.2			X						15		T	1.0	SAM	IGP	Ancash	
74	1940	5	5	02:03:00	-7.0	-80.0	-	5.6	6.0											T	1.0	SAM	IGP	Lambayeque	
75	1940	5	24	16:33:00	-11.2	-77.8	50.0	6.6	8.0		7.9	X		1.5	2.0	1.0	S	250	T	3.0	SAM	LOC	Ancón, Lima, Callao		
76	1942	8	24	22:50:00	-15.6	-74.7	70.0	6.7	8.1		8.2	2.7*E+23	X	1.0	2.0	3.0	S	22	TL	4.0	SAM	LOC	Sur del Perú, Norte de Chile Nazca		
77	1943	7	5	21:07:00	-16.0	-74.0	-	5.9	6.8											T	1.0	SAM	IGP	Camaná (Arequipa)	
78	1945	9	9	12:56:00	-15.3	-76.3	40.0		6.1			V								T	1.0	SAM	IGP	Sur de Ica	
79	1946	4	1	02:28:56	52.8	-163.5	50.0		7.4		8.5			9.3	4.0	35.0	478.0	L	173	T	4.0	A-A	LA1	Matarani, Talara, Callao, Aleutianas	
80	1948	5	11	09:34:00	-17.9	-71.8	30.0					X								T	1.0	SAM	IGP	Ilo, Camaná, Chala, Pisco (Sur del Perú)	
81	1948	5	28	05:36:00	-13.0	-76.5	60.0	6.0	7.0			VII								T	1.0	SAM	IGP	Sur de Lima	
82	1948	7	20	11:02:00	-16.2	-74.3	30.0	6.1	7.1			VI								T	1.0	SAM	IGP	Arequipa	
83	1949	4	25	13:54:00	-	-	-	6.4	7.3				VI							T	1.0	SAM	IGP	Tacna	
84	1952	5	3	12:14:00	-14.2	-76.3	50.0		6.4				VI							T	1.0	SAM	IGP	Ica	
85	1953	12	12	17:31:00	-	-	30.0	6.7	7.8			1.7*E+22	IX						6	T	1.0	SAM	IGP	Norte de Tumbes	
86	1955	7	21	11:45:00	-	-	60.0	5.9	6.8				VI							T	1.0	SAM	IGP	Chala (Arequipa)	
87	1956	4	8	20:54:00	-	-	11.0	6.3	7.1				V							T	1.0	SAM	IGP	Sur de Tacna	
88	1956	10	12	02:37:00	-15.5	-75.3	-	5.8	6.5											T	1.0	SAM	IGP	Sur de Ica	
89	1957	1	24	07:16:00	-12.5	-78.0	-	5.7	6.3											T	1.0	SAM	IGP	Callao (Lima)	
90	1957	8	8	13:50:00	-4.3	-81.9	40.0	5.7	6.3				VI							T	1.0	SAM	IGP	Sur de Tumbes	
91	1958	1	15	19:14:00	-	-	60.0		7.0				IX							T	1.0	SAM	IGP	Arequipa	
92	1959	1	3	11:17:00	-14.8	-75.7	-	5.8	6.4											T	1.0	SAM	IGP	Ica	
93	1959	1	26	20:58:00	-4.5	-82.5	33.0	6.0												T	1.0	SAM	IGP	Piura	
94	1959	2	7	09:36:00	-4.2	-81.1	40.0	6.2	7.4				VII							T	1.0	SAM	IGP	Piura	
95	1959	2	11	19:57:00	-4.0	-82.5	33.0	6.4												T	1.0	SAM	IGP	Piura	
96	1960	1	13	15:40:00	-	-	60.0	6.2	7.5				X							T	1.0	SAM	IGP	Arequipa	
97	1960	1	15	09:30:00	-	-	70.0		7.0			8.0*E+21	VII							T	1.0	SAM	IGP	Sur de Ica	
98	1960	4	18	19:14:00	-10.0	-79.0	39.0	6.7		7.2		5.7*E+21	VI							T	1.0	SAM	IGP		
99	1960	5	22	19:10:46	-38.3	-72.7	44.0		8.6	9.5				9.4	5.0	26.0	630.0	L	534	T	4.0	SAM	LOC	Callao, Chimbote, Matarani, San Juan, Talara, Sur de Chile	
100	1960	11	20	22:02:00	-5.6	-80.9	60.0	5.9	6.8			5.7*E+22	VI		2.5	9.0	23.0	M	11	T	4.0	SAM	LOC	Piura	
101	1963	8	29	15:30:00	-7.1	-81.6	23.0		6.6	7.1		1.3*E+18	VI							T	1.0	SAM	IGP	La Libertad	
102	1963	9	20	16:30:00	-10.8	-78.2	80.0	6.0		6.9		3.0*E+21	VII							T	1.0	SAM	IGP	Chimbote (Ancash)	
103	1964	3	28	03:36:13	61.0	-147.7	7.0		8.4	9.0				9.1	4.5	67.1	393.0	L	115	TL	4.0	A-A	LA1	Callao (Lima), La Punta, Matarani, San Juan, Camaná (Arequipa). Tsunami generado en las Aleutianas	
104	1966	10	17	21:41:00	-10.8	-78.7	37.3	6.4	8.0		8.1	2.0*E+23	IX		8.2	1.5	3.0	67.0	M	125	T	4.0	SAM	SOL	Chimbote (Ancash)
105	1967	9	3	21:07:00	-10.6	-79.7	35.0	6.2	6.7		7.0	3.9*E+21			1.5	2.0	2.0	S		T	4.0	SAM	LOC	Chimbote (Ancash)	
106	1968	7	30	20:38:00	-6.9	-80.4	29.6	5.8	6.4		6.3	3.5*E+20								T	1.0	SAM	IGP	Lambayeque	
107	1968	9	28	13:53:00	-13.2	-76.4	68.2	5.9	6.0		6.4	6.0*E+20	IX							T	1.0	SAM	IGP	Lima	
108	1970	5	31	20:23:00	-9.3	-78.8	71.0	6.4	7.8		7.9	1.0*E+22	X		1.0	1.8	4.0	S		T	4.0	SAM	LOC	Chimbote (Ancash)	
109	1970	6	4	04:09:00	-9.9	-78.7	54.2	5.8	6.0		6.4	5.5*E+20								T	1.0	SAM	IGP	Chimbote (Ancash)	
110	1970	6	19	10:56:00	-22.3	-70.1	44.0		6.4		6.6	8.1*E+20								T	1.0	SAM	IGP	Tacna, Arica	
111	1970	12	10	04:34:00	-	-	20.7	6.3	7.1		7.2	6.7*E+21	X							T	1.0	SAM	IGP	Norte de Perú	
112	1973	11	9	22:41:00	-4.0	-80.9	39.4	5.6		6.0		8.6*E+19								T	1.0	SAM	IGP	Norte de Perú	
113	1974	10	3	14:21:00	-12.3	-77.5	21.2	6.2	7.8		8.1	9.0*E+22	IX		8.1	1.0	1.8	15.0	S	78	T	4.0	SAM	LOC	Callao (Lima)
114	1974	11	9	12:59:00	-12.5	-77.6	12.8	6.0	7.2		8.1		V							T	1.0	SAM	IGP	Callao (Lima)	
115	1979	2	16	10:08:00	-16.6	-72.6	52.6	6.2	6.9			2.7*E+21	VII							T	1.0	SAM	IGP	Camaná (Arequipa)	
116	1981	2	28	21:56:00	-6.5	-81.4	39.0	5.3	6.3		5.6	2.7*E+19								T	1.0	SAM	IGP	Norte de Perú	
117	1996	2	21	12:51:02	-9.7	-79.0	1.0		7.5	7.8				7.8	1.9	5.0	49.0	M	12	TL	4.0	SAM	TNL	Norte de Perú (Chimbote)	
118	1996	11	12	16:59:43	-14.0	-75.0	17.0		7.3	7.7				7.9	-1.0	0.4	1.0	N	0	T	4.0	SAM	TNL	Nazca (Ica)	
119	2001	6	23	20:33:13	-16.2	-73.4	33.0		8.4	8.3/8.4			VIII		8.2	1.0	7.0	67.0	M	50	T	4.0	SAM	TBB	Camaná, Matarani (Arequipa)
120	2001	6	23	21:27:35	-17.2	-72.6	33.0	6.1												T	1.0	SAM	TBB	Camaná, Matarani (Arequipa)	
121	2001	6	26	04:18:31	-17.8	-71.7	24.0		6.7											T	1.0	SAM	TBB	Camaná, Matarani (Arequipa)	
122	2001	7	7	09:38:00	-17.5	-72.1	33.0			7.6					4.0	3.0	S	0		T	4.0	SAM	IGP	Camaná, Matarani (Arequipa)	
123	2001	7	22	05:00:00	-19.5	-69.3	33.0			6.4															

Año	Año de ocurrencia del evento generador del tsunami
Mes	Mes de ocurrencia del evento generador del tsunami
Día	Día de ocurrencia del evento generador del tsunami
Hr:Mn:Sg	Hora, minuto y segundo de ocurrencia del evento generador del tsunami
Lat.	Latitud de la fuente generadora del tsunami
Long.	Longitud de la fuente generadora del tsunami
Z	Profundidad de la fuente generadora del tsunami
Mb	Magnitud de ondas corpóreas del sismo generador del tsunami
Ms	Magnitud de ondas superficiales del sismo generador del tsunami
Mw	Magnitud de Momento del sismo generador del tsunami
Mm	Magnitud de ondas de capa para el evento generador del tsunami (Sistema Tremors)
Mo	Momento sísmico del sismo generador del tsunami
Int. Fuente	Intensidad del evento generador del tsunami
Mt	Magnitud del sismo generador del tsunami obtenido a partir de la altura máxima de las olas del tsunami
Int. Tsunami	Intensidad del tsunami según la escala de Soloviev-Imamura (Soloviev, 1978):
	(-1) Tsunami muy ligero: Perceptible por los mareógrafos
	(0) Tsunami ligero: Las olas son observadas por personas que viven cerca de la playa y están familiarizadas con el mar (maretazo)
	(1) Tsunami regular: Es observado por todos. El tsunami puede llevar tierra adentro, algunas embarcaciones. Etc.,
	(2) Tsunami grande: Este inunda las playas con olas de cierto tamaño, además produce ligera erosión en los terrenos de relleno
	(3) Tsunami muy grande: Inunda toda la costa con olas que alcanzaran cierta altura. Produce daños en los muelles y en estructuras importantes cerca de la playa.
	(4) Tsunami desastroso: Produce destrucción parcial o total de las edificaciones hasta una cierta distancia de la playa. Inundación en toda la costa con olas de gran altura. Los barcos grandes sufren graves daños.
Hmax	Altura máxima de las olas del tsunami. Máximo run-up medido en la costa o máxima amplitud leída en el mareógrafo
Nobs	Número total de observaciones disponibles del run-up y de marea
D	Daños producidos por el tsunami en el litoral
	N - no dañino
	S - daños pequeños
	M - daños moderados
	L - daños severos
F	E - daños extremos
	reporte del número de fallecidos a consecuencia del tsunami
C	causas u origen del tsunami
	T - tectónico
	V - volcánico
	L - derrumbes, avalanchas, alud
	M - meteorológico
	E - explosión
	I - impacto
	U - desconocido
	* Es posible que un tsunami se genere por más de una causa. Por ejemplo, un tsunami generado por un sismo que ocasiona inestabilidad del suelo en el fondo marino y produce luego un derrumbe.
V	* Los tsunamis codificados con U, agrupa a los tsunamis para los cuales no existe información o cuyo origen se desconoce
	Indica la valides del tsunami
	4: Tsunami ocurrido y confirmado por diferentes fuentes de información (probabilidad cerca de 1.0)
	3: Posible ocurrencia de tsunami (probabilidad aproximada de 0.75)
	2: Ocurrencia de tsunami cuestionable (probabilidad aproximada 0.50)
	1: Información de la ocurrencia de tsunami muy dudosa (probabilidad menor de 0.25)
RGT	0: Falso tsunami, la información es muy escasa y cuestionable (probabilidad cerca de 0)
	Región tsunamigenica
	A-A: Alaska y la costa de EEUU en el océano pacifico
	CAM: Centro América
	SAM: Sudamérica
	NZT: Nueva Zelanda y Tonga
	NGS: Nueva Guinea y las Islas Salomón
	IND: Indonesia
	PHI: Filipinas
	JAP: Japón
	K-K: Kuril - Kamchatka
	HAW: Hawái
Ref.	Referencia de la fuente de la fuente de información utilizada
Localidades Afectadas	Localidades o ciudades más afectadas por el tsunami