

**GUÍA PRÁCTICA PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO  
CATASTRÓFICO POR TSUNAMI EN EL PERÚ**

**Julio Kuroiwa Horiuchi**

**Con los aportes de  
César O. Jiménez Tintaya**

SENCICO  
Servicio Nacional de Capacitación  
Para la industria de la Construcción

Gerencia de Investigación  
y Normalización

GUÍA PRÁCTICA PARA LA REDUCCIÓN  
DEL RIESGO CATASTRÓFICO POR TSUNAMI  
EN EL PERÚ  
Julio Kuroiwa Horiuchi

©SENCICO  
Av. De la Poesía N° 351  
San Borja. Lima 41, Perú  
Teléfono (01) 2116300

ISBN  
Depósito legal

Se puede reproducir y traducir total y parcialmente el texto publicado siempre que se indique la fuente.

El autor es el responsable de la selección y presentación de los hechos contenidos en esta publicación, así como de las opiniones expresadas en ella, las que no son, necesariamente, las de SENCICO o del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y no comprometen a la institución.

Publicado por la Gerencia de Investigación y Normalización de SENCICO en el marco del Plan Operativo Institucional en aras de Desarrollar estudios en la línea de investigación referida a edificaciones sismo resistente y la difusión de dichos trabajos.

## **CONSEJO DIRECTIVO NACIONAL**

**Dr. Daniel Juan Arteaga Contreras**  
Presidente del Consejo Directivo Nacional

**Ing. Adolfo Gálvez Villacorta**  
Representante de las Empresas Aportantes designado por CAPECO

**Ing. Dina Carrillo Parodi**  
Representante de las Empresas Aportantes designado por CAPECO

**Dra. Ana K. Rozas Valverde**  
Representante del Ministerio de Educación

**Abog. Wigberto Nicanor Boluarte Zegarra**  
Representante de las Universidades

**Arq. Sofía Rodríguez Larraín de Grange**  
Representante de las Universidades

**Sr. Félix M. Rosales Gutiérrez**  
Representante de la Federación de Trabajadores de Construcción Civil del Perú (FTCCP)

**Sr. Porfirio Fidel Buitrón Espinoza**  
Representante de la Federación de Trabajadores del Perú (CTP)



## PRÓLOGO

El Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), es una entidad de tratamiento especial del Sector de Vivienda, Construcción y Saneamiento, que tiene como finalidad la formación y capacitación de los trabajadores de la construcción mediante la educación superior no universitaria; tanto para el desarrollo de investigaciones vinculadas a la problemática de la vivienda, edificación y saneamiento, como para la presentación de propuestas de normas técnicas de aplicación nacional.

Institucionalmente se creó el 26 de Octubre de 1976, iniciando sus operaciones al año siguiente. Cuenta con sedes en Piura, Chiclayo, Trujillo, Lima, Arequipa y Cusco, donde se ofrecen las carreras de formación técnica y profesional-técnica. Se tiene sedes para impartir cursos y capacitación ocupacional en Huancayo, Ica, Iquitos, Puno y Tacna. También contamos con Unidades Operativas en Ayacucho, Cajamarca, Moyobamba y Pucallpa y CENTRO DE Formación en Apurímac, Huancavelica, Moquegua, Madre de Dios y en los distritos de Chorrillos y Los Olivos en la ciudad de Lima, mantenemos convenios con universidades e instituciones públicas y privadas del sector vivienda, construcción y saneamiento.

Cuenta con una Gerencia de Investigación y Normalización, en donde existe información especializada relacionada con la construcción y se encuentra a disposición de los profesionales y técnicos del sector construcción y personas interesadas.

Cumplimos con difundir esos conocimientos, poniendo a disposición de la comunidad ésta publicación que motivará a los estudiantes y profesionales del sector a desarrollar investigaciones que debidamente difundidas podrán ser enriquecidas con nuevos aportes gracias a la contribución de especialistas, con el objetivo de innovar en el campo de la vivienda, construcción y saneamiento.

La misión institucional de SENCICO es proporcionar capacitación de excelencia, investigando, evaluando sistemas constructivos innovadores y proponiendo normas para el desarrollo de la industria de la construcción; contribuyendo así al incremento de la productividad de las empresas constructoras y a la mejora de la calidad de vida de la población. La visión es proyectarse hacia el desarrollo de nuevas propuestas educativas para la formación continua de los trabajadores, técnicos y profesionales, una industria de la construcción competitiva y segura, con trabajadores calificados, certificados y empleables, contribuyendo a la competitividad de las empresas y aportando estudios de investigación y normalización para el desarrollo integral de nuestro país.

Dr. Daniel Juan Arteaga Contreras

Presidente Ejecutivo



# CONTENIDO

## **CAPÍTULO 1**

### **TSUNAMIS Y SU CARACTERIZACIÓN**

- 1.1. INTRODUCCIÓN
- 1.2. TSUNAMIS GENERADOS POR TERREMOTOS
- 1.3. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO HISTÓRICO DE LOS TSUNAMIS
- 1.4. REDUCCIÓN DE EFECTOS NEGATIVOS DE LOS TSUNAMIS

## **CAPÍTULO 2**

### **AVANCES TÉCNICO-CIENTÍFICOS RECIENTES MÁS RELEVANTES EN SISMOS Y TSUNAMIS Y SUS APLICACIONES**

- 2.1. INTRODUCCIÓN
  - 2.1.1. Investigación sobre Paleotsunamis
  - 2.1.2. Investigaciones sobre Deformación y Desplazamientos de la Corteza
  - 2.1.3. Investigación sobre Modelos Numéricos de Simulación
  - 2.1.4. Avances tecnológicos ingenieriles
- 2.2. AVANCES CIENTÍFICOS DE LOS DIEZ ÚLTIMOS AÑOS SOBRE SISMOS Y TSUNAMIS, APLICABLES A LA PRÁCTICA INGENIERIL
- 2.3. DESPLAZAMIENTOS COSÍMICOS
- 2.4. APLICACIONES DE DESPLAZAMIENTOS COSÍMICOS EN EL MODELAMIENTO DEL TSUNAMI DE CALLAO DE 1746
  - 2.4.1. Modelo de propagación oceánica del tsunami
- 2.5. AVANCES RECIENTES EN LA INVESTIGACIÓN DE PALEOTSUNAMIS. SU APLICACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DEL PERIODO DE RETORNO DE TSUNAMIS
  - 2.5.1. Herramientas científicas para determinar la fecha de ocurrencia de los paleotsunamis
  - 2.5.2. Investigaciones de Paleotsunamis después del Tsunami del océano Índico de 2004
  - 2.5.3. Sismo y Tsunami de Tohoku, Japón del 11 de Marzo de 2011
  - 2.5.4. Desarrollo histórico de investigación sobre tsunamis

## **CAPÍTULO 3**

### **PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES DE CONCRETO ARMADO RESISTENTES A SISMOS Y TSUNAMIS. LINEAMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS TSUNAMIRRESISTENTES**

- 3.1. INTRODUCCIÓN
- 3.2. LICUACIÓN DE SUELOS EN LOS SISMOS DE MAULE, CHILE DE 2010 Y TOHOKU, JAPÓN, DE 2011
  - 3.2.1. Introducción
  - 3.2.2. Licuación de suelos. Terremoto de Chile de 2010
  - 3.2.3. Licuación de suelos en El Gran Terremoto del Este de Japón (GTEJ) o Tohoku del 11 de marzo de 2011
  - 3.2.4. Licuación de Suelos durante los Sismos en el Perú, de Arequipa de 2001 e Ica de 2007
    - Licuación de Suelos en el Sismo de Arequipa de 2001
    - Licuación de suelos en el terremoto de la Región Ica de 2007
  - 3.2.5. Conclusiones Generales sobre Licuación de Suelos y Medidas de Reducción de Desastres
- 3.3. PROTECCIÓN DE CIMENTACIÓN DE EDIFICACIONES Y DE INFRAESTRUCTURAS URBANAS CAUSADO POR SOCAVACIÓN DE TSUNAMIS
  - 3.3.1. Introducción
  - 3.3.2. Socavación de la Cimentación de Edificaciones Causadas por el Tsunami del océano Índico de 2004
    - Antecedentes
      - Las Investigaciones de Mathew J. Francis
      - Área Geográfica Investigada

Comparación de Socavación entre Banda Aceh y Lhokanga, en el norte de Sumatra, Indonesia

3.3.3. Enseñanzas de Socavación del Tsunami del océano Índico

3.3.4. Erosión de Tsunami Detalladamente Documentado. Caso de las Islas Kuriles en Kamchatka, Rusia

#### **CAPÍTULO 4**

#### **CRITERIOS PARA EL PLANEAMIENTO URBANO DE CIUDADES UBICADAS EN ZONAS INUNDABLES POR TSUNAMIS**

4.1. INTRODUCCIÓN

4.2. VIVIENDA DE ALBAÑILERÍA SISMORRESISTENTE. ALBAÑILERÍA CONFINADA CONCEBIDA Y DESARROLLADA EN EL PERÚ

4.3. DESARROLLO DEL MÉTODO DE REPARACIÓN Y REFORZAMIENTO DE VIVIENDAS

4.4. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE TSUNAMIS

4.5. CRITERIOS URBANÍSTICOS

4.6. COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES GENERALES

#### **ANEXOS**

##### **ANEXO I**

PROPUESTA PRELIMINAR PARA LA NORMA PERUANA DE EDIFICACIONES TSUNAMIRRESISTENTES

Lineamientos para el diseño de edificios Tsunamirresistentes

Estimación de Fuerzas Laterales

Estimación de Fuerzas Verticales

Estabilidad de una Edificación Tsunamirresistente

##### **ANEXO II**

LISTADO DE LAS CIUDADES COSTERAS EXPUESTAS A SUFRIR DAÑOS POR TSUNAMIS

# CAPÍTULO 1

## TSUNAMIS Y SU CARACTERIZACIÓN

### 1.1. INTRODUCCIÓN

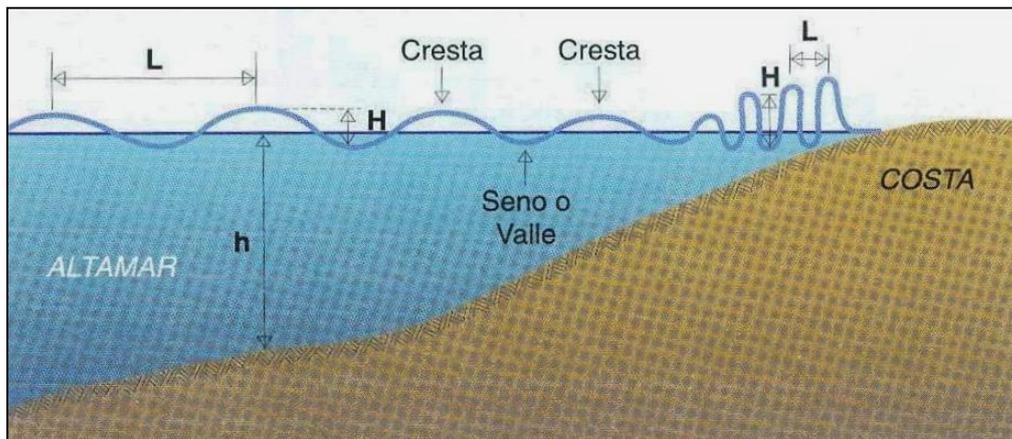
Los tsunamis, también llamados maremotos, son fenómenos marinos, aunque poco recurrentes, espectaculares por la secuela de destrucción y pérdida de vidas humanas que pueden causar a lo largo de las costas.

En el tsunami del océano Índico de 2004, murieron 230 mil personas en 14 países ubicados en sus orillas y en las islas dentro de dicho océano. Por la falta de conocimientos elementales sobre tsunamis para salvar sus vidas y por la carencia de sistemas de alarma, pues el tsunami llegó a muchos lugares varias horas después de ocurrido el sismo que generó el maremoto. De haber tenido una mayor cultura de prevención, miles de personas habrían tenido tiempo suficiente para evacuar las zonas.

En el terremoto y tsunami de Tohoku-Oki, Japón, de 2011, perecieron cerca de 20 mil personas, la mayoría debido al tsunami. La máxima altura de inundación en la costa (*run up*) superó el umbral previsto, pues su estimación estaba basada en los tsunamis de Sanriku de 1896 (30 mil víctimas) y 1933 (3 mil víctimas). En la información estadística para el cálculo de probabilidad de altura en ola no se había considerado el tsunami ocurrido en el año 869 d.C., de características similares al sismo y tsunami de Tohoku de 2011, que fue un tsunami con período de retorno de 1,000 años.

Los tsunamis consisten en trenes de ondas marinas de período largo que llegan a las costas con un período de 10 a 70 minutos, dependiendo de la distancia del lugar de generación del tsunami. Los de origen cercano, llegan con un período de alrededor de 10 minutos, mientras los más lejanos lo hacen con un período de 40 a 70 minutos. Las olas del tsunami pueden alcanzar, excepcionalmente, un *run up* de hasta 40 m, como en Sanriku, Japón, el 11 de marzo de 2011, en una bahía con batimetría (forma del fondo oceánico) muy desfavorable. Allí se tienen aguas profundas cerca de las costas, y batimetría que concentra la energía en el vértice interior de las bahías en forma de V o U, como un "*medio embudo*". En el vértice de una de esas bahías de Sanriku, es donde el tsunami superó los 40 m de altura.

En cambio, en alta mar la altura de ola es de apenas unos decímetros y la separación entre cresta y cresta, llamada longitud de onda (L), que puede tener desde varias decenas de kilómetros hasta unos 200 km, pasa inadvertida por los navegantes. En alta mar el perfil del tsunami es similar a un acordeón extendido, y cerca de las costas, a un acordeón cerrado, F-1.01. Se cuentan casos de pescadores japoneses que se han dado con la sorpresa de encontrar sus villorrios destruidos por un tsunami, al regresar de realizar su faena en alta mar. He ahí por qué este nombre se ha popularizado internacionalmente ya que, en idioma japonés, "*tsu*" significa puerto y "*nami*" ola. Literalmente significa, pues, "*grandes olas en el puerto*", describiendo ésta sola palabra la característica física más importante del fenómeno.



F-1.01. Gráfico que representa el tsunami en alta mar y en la costa

La imagen del *Día de la NASA*, correspondiente al día 12 de marzo de 2011, F-1.13, dio la ubicación del epicentro del terremoto y de generación del tsunami de Tohoku, Japón, del 11 de marzo de 2011, ubicadas en el mar, al sureste de las costas de Sanriku, zona muy susceptible a tsunamis. Ese breve mensaje gráfico, comunicó a los entendidos que en Sanriku se había producido un desastre catastrófico. En efecto, dejó cerca de 20 mil víctimas, la mayoría de las cuales perecieron por el tsunami. La gran magnitud del sismo tsunamigénico 9.0 Mw no se había producido desde hacía 1142 años (869 d.C.), superando las medidas de prevención tomadas, incluyendo los muros de defensa marítima de las centrales atómicas de Fukushima 1 y la protección de millones de pescadores.

En el Japón y en el resto del mundo, se está revisando la máxima altura de inundación (*run up*) de los tsunamis. En principio, en la costa central del Perú se sugiere elevar la estimación de la altura de la ola (*run up*) a 10,0 m. ( $7,0 \text{ m} \times 1,4 = 9,8 \text{ m}$ ).

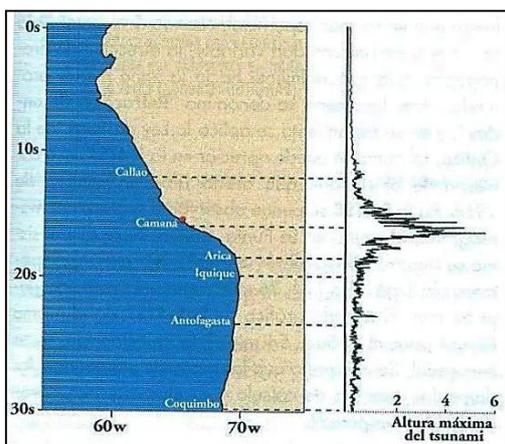
El territorio peruano ha sido afectado por tsunamis, como el evento catastrófico que destruyó el Callao en 1746, pero se carece de información histórica confiable de los eventos ocurridos antes del siglo XVI, que puede ser lograda mediante la investigación de sedimentos dejados por paleotsunamis, cuya datación de materia orgánica contenida en la arena puede hacerse mediante la técnica de datación *Carbono 14* y, de este modo, estimar la fecha de ocurrencia.

El Callao, Perú, fue arrasado por un tsunami el 28 de octubre de 1746 – generado por un evento de origen cercano– que causó la muerte del 95% de sus habitantes, pues de 4 mil personas que allí vivían, sólo se salvaron 200. El terremoto y el tsunami generado frente a las costas de Chile en 1960 causaron más de 1000 víctimas, en Hawai, Sanriku, Japón, y otros lugares ubicados al otro lado del océano Pacífico – es llamado, por eso, transoceánico o de origen lejano–, que dio origen al Sistema de Alerta contra Tsunamis del Pacífico, localizado en Honolulu, Hawai, ubicado en el centro del océano Pacífico.

El terremoto de Arequipa, Perú, ocurrido el 23 de junio de 2001, generó un tsunami que afectó una franja costera al sur de Camaná, dejando valiosas enseñanzas para reducir los efectos negativos de este fenómeno, que es importante difundir.

En la F-1.02 se muestra la altura de ola entre Callao, Perú, y Coquimbo, Chile. Las 76 víctimas de Camaná cuyos cuerpos se recuperaron y muchos otros más señalados como desaparecidos, perdieron sus vidas porque se internaron en el mar cuando vino la primera ola, que fue de retroceso, unos 10 minutos después de ocurrido el sismo, dejando a la vista el fondo marino y peces que ellos trataron de atrapar. Algo similar ocurrió en Hawai en 1946 cuando un tsunami generado en Alaska atacó su costa norte. Lamentablemente, este hecho bien establecido entre especialistas en tsunamis, no era conocido por los pobladores de Camaná, y les costó la vida.

Unos 21 minutos después de ocurrido el sismo de Arequipa, en el año 2011, según coinciden varios testigos presenciales, la segunda ola regresó con gran fuerza, seguida por 4 ó 5 más que en el sector más afectado inundaron una extensa área de decenas de kilómetros cuadrados, con longitud y ancho variable entre 400 y 500 m, y la altura máxima de la ola fue de aproximadamente 6 m, como se aprecia en F-1.02.



**F-1.02.** Efectos regionales del tsunami de 2001-06-23. Nótese que la máxima altura se produce al sur de Camaná. Fuente USGS.



**F-1.03.** Daños causados en viviendas con bloques de concreto en el balneario al sur de Camaná, en 2001-06-03.

Ejemplo de los daños más importantes causados por el tsunami de 2001-06-23 se ilustran en la F-1.03, donde se puede observar que la fuerza hidrodinámica de las olas ha hecho colapsar muros de bloques de concreto. El derrumbe de la casa de playa que se muestra en la F-1.04, fue causado por la erosión en la fase recesiva de la corriente de agua. Según información recibida en la CTAR-Arequipa, al sur de Camaná se perdieron las cosechas y quedaron salinizadas unas 2 mil hectáreas de terreno de cultivo, tal como se muestra en la F-1.05.

Al sur de Camaná, el tsunami llegó hasta el borde de la carretera Panamericana Sur, a 600 m del borde marino. Cientos de zapallos arrastrados por el tsunami quedaron alineados en el borde oeste de la pista.



**F-1.04.** Casa de playa al sur de Camaná que colapsó por erosión en su cimentación.



**F-1.05.** Cultivos arrasados por tsunamis al sur de Camaná. Pozas de arroz y plantaciones de zapallos quedaron destruidas y el suelo salinizado, el cual según C-TAR Arequipa volvió a la normalidad a los 2-3 años.

## 1.2. TSUNAMIS GENERADOS POR TERREMOTOS

La causa más común de generación de tsunamis son los sismos, en general de magnitud mayor que 7.0 Mw. En los 2 mil últimos años los sismos han producido el 82,3% de todos los tsunamis ocurridos en el océano Pacífico. Fueron causados por desplazamientos de la corteza terrestre en los fondos verticales por varios metros, tanto horizontales como verticales, denominados desplazamientos cosísmicos, que pueden abarcar amplios sectores del fondo marino y transmiten una enorme energía potencial al agua por encima del fondo oceánico. Hasta hace unas décadas el parámetro más conocido era la longitud de falla y otros mecanismos muy simples de generación de tsunamis.

Gracias a las numerosas mediciones geofísicas efectuadas durante el Gran Terremoto del Este de Japón, como se le conoce en ese país o terremoto o tsunami de Tohoku-Okii, que es preferido por los investigadores norteamericanos, se ha logrado desarrollar un modelo de generación de tsunamis con los desplazamientos más significativos, levantamiento del fondo oceánico que tiene forma de un cerro alargado paralelo a la zona de contacto entre las placas que interaccionan y no un émbolo de forma elíptica que fue una forma práctica y simplificada para desarrollar modelos de transmisión de ondas tsunamigénicas, lo que ha dado resultados prácticos muy aceptables. También se indica el hundimiento (o subsidencia) en la costa cercana al foco del terremoto y tsunami.

Hasta ahora, la evaluación del peligro de tsunamis estaba basada exclusivamente en información estadística que tenía grandes limitaciones. Por ejemplo, para la zona de subducción de la costa oeste de Sudamérica, una de las más activas del mundo, que comprende las costas de Chile y Perú. Recordemos que allí se generó el terremoto y tsunami de Valdivia del año 1960, con magnitud 9.5 Mw, el más potente hasta ahora desde las primeras décadas del siglo XX, cuando se comenzaron a utilizar los sismógrafos para estimar la magnitud de los terremotos.

Este tsunami fue muy violento y causó daños y víctimas en las islas hawaianas y en Sanriku, Japón, dos lugares muy sensibles al accionar de los tsunamis; y también en Filipinas y otros lugares.

Esto dio origen al sistema de alerta contra tsunamis ubicado en Hawai. Este centro había comenzado a operar después de 1946, cuando un tsunami generado en las islas aleutianas causó la muerte de cerca de 100 personas en las islas hawaianas. Como la primera ola fue de retiro, dichas víctimas mortales se internaron en el mar y fueron atrapadas por la segunda ola, que les causó la muerte. Lamentablemente, en Camaná los pobladores desconocían este hecho. Después que el mar se retiró, a los 10 minutos, unas 70 personas se internaron en el lecho marino. Cuando llegó la segunda ola, unos 10 minutos más tarde, esas personas perdieron sus vidas.

La causa menos frecuente para la generación de tsunamis es la actividad explosiva de grandes volcanes, como sucedió en Indonesia en los años 1836 y 1896, cuando las explosiones generaron grandes tsunamis que no solamente causaron numerosas muertes y destrucción en las islas cercanas a dichos volcanes, sino que se expandieron por todo el océano Pacífico y se registraron también en el océano Atlántico, por ejemplo en las costas del Reino Unido. Otras de las causas son los grandes deslizamientos submarinos y una posibilidad muy remota puede ser la que es causada por caídas de aerolitos de gran tamaño, en cuyo caso los efectos pueden ser catastróficos, como ocurrió hace 60 millones de años, produciendo el oscurecimiento de la atmosfera, fenómeno que causó la desaparición de pastos y dinosaurios herbívoros y carnívoros.

En las costas del Perú y Chile la única causa conocida es la actividad sísmica, por lo que se decidió focalizar los estudios en los tsunamis generados por terremotos.

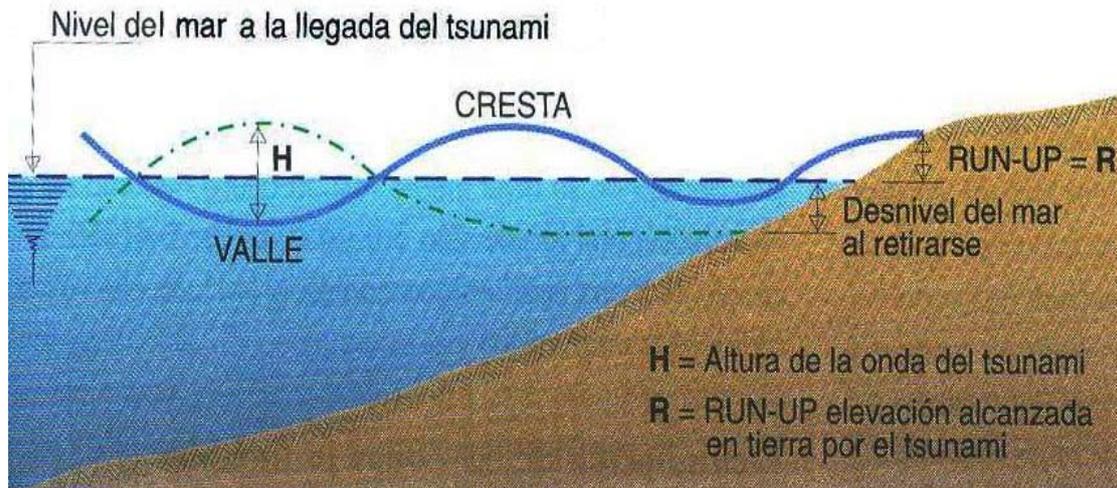
### **Distancia al lugar de origen**

Los tsunamis son de origen cercano, como el de Arequipa de 2001, si se generan a decenas o cientos de kilómetros del punto de observación. La mayoría de los tsunamis que causan daños severos son los de origen cercano, en la franja costera frente al epicentro del evento en el mar.

De origen lejano o transoceánico, si el tsunami se genera a miles de kilómetros de distancia del punto de observación, muchas veces al otro lado de los océanos, como el tsunami de Chile de 1960, que causó víctimas y daños en Hawai, Japón y Las Filipinas.

### **Características de los Tsunamis**

Por tratarse de trenes de ondas marinas, los tsunamis se caracterizan por su período, altura de onda, longitud de onda y velocidad de propagación, que son atributos comunes a ellos, F-1.01 y F-1.06.



**F-1.06.** Esquema del *run-up*, R, que es la máxima altura que alcanza el tsunami en tierra.

**Período, T:** Se define como el tiempo que transcurre entre el paso de dos ondas sucesivas por un mismo punto de observación. Si se está en la costa, es la diferencia de tiempo entre la llegada de 2 ondas sucesivas. Para tsunamis de origen cercano, el período es de unos 7 a 30 minutos -el tsunami de Camaná de 2001 tuvo un período de 10 minutos-, y para los de origen lejano, entre 20 a 70 minutos.

**Altura de onda, H:** Es la distancia vertical entre el seno o valle y la cresta, mientras el tsunami se dirige a tierra.

**Longitud de onda, L:** Es la distancia que separa a dos crestas sucesivas. Se estima que la longitud de onda inicial es aproximadamente igual a la dimensión mayor del área dislocada.

**Velocidad de propagación, V.** La velocidad de propagación del tsunami es igual a:

$$V = \sqrt{gh}.$$

Donde:

V = Velocidad, en m/s.

g = Aceleración de la gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>), constante.

h = Profundidad del océano, en metros.

Puede observarse que la velocidad de propagación del tsunami es función solamente de la profundidad del sector del océano por el cual viaja. Por ejemplo, un tsunami que atraviesa una parte del océano donde la profundidad es de 4000 m, tendrá una velocidad de 200 m/s o 720 km/h. Si asumimos como profundidad promedio del océano Pacífico 5511 m, equivalente a la mitad de la profundidad máxima que es de 11 022 m, el tsunami viajaría a 837 km/h, velocidad similar a la de un avión jet comercial.

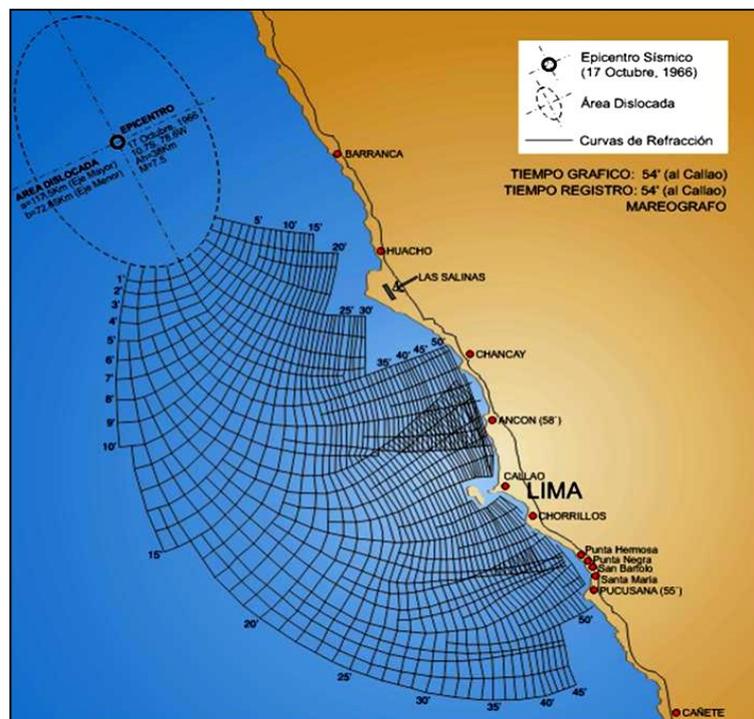
Como la velocidad del tsunami es mayor en un mar profundo que en un mar superficial, cuando el tsunami viaja en un mar de profundidad variable, la

dirección de propagación gira gradualmente hacia la zona menos profunda. Este fenómeno se denomina "refracción de ondas", y en su tratamiento se aplica la ley de Snell, de la Óptica, tal como se puede apreciar en la F-1.07, que corresponde al tsunami que afectó Lima en octubre de 1966. En la F-1.08 se puede observar el registro del mareograma obtenido en La Punta, Callao. Nótese que el sismo se registró a las 16 h 41 min 58 s, hora local. La primera ola llegó a las 17 h 36 min, siendo el tiempo de viaje 54 min. El método gráfico de la F-1.07 da el mismo tiempo para el Callao: 54 min. Esta coincidencia no es muy usual. Demostraría que las hipótesis planteadas, los datos, los métodos de cálculo y su ejecución estuvieron dentro de lo esperado.

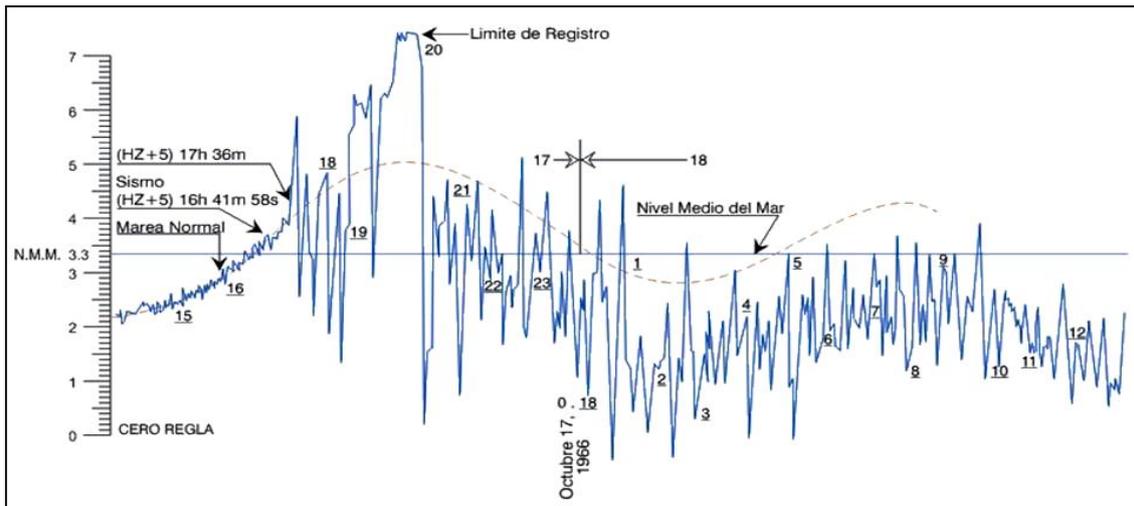
Asimismo en la F-1.08 la ola más alta llegó a las 20:00 h, coincidiendo con la marea alta y sobrepasó el límite de la regla de medición. Eso causó la inundación de la parte angosta de La Punta, Callao, donde se ubica el Colegio Dos de Mayo, sin causar mayores daños ni víctimas.

### Altura de ola en tierra run-up

Es la altura que alcanza el tsunami en tierra F-1.06. En general decrece a razón de 1%, cuando se interna en tierra, debido a la pérdida de energía por la fricción sobre el suelo. Por ejemplo, en Camaná la altura de ola de 6 m avanzó 600 m tierra adentro. Si encuentra formaciones verticales como en la Costa Verde en Lima, la ola treparía unos metros. La energía cinética se transforma a energía potencial y se eleva. En Sanrikú, Japón, para rechazar una ola que trepa el muro de defensa se le da una curvatura hacia el mar, tal como se aprecia en la F-1.14.



**F-1.07.** Curvas de refracción del tsunami del 17 de octubre de 1966. El tiempo de viaje de las olas desde el origen hasta el Callao fue de 54 minutos. Ref. Tesis Ing. Civil, UNI, de Alberto Delgado y Celia García (1982).



**F-1.08.** Mareograma registrado en el Callao el 17 de octubre de 1966. La marca del sismo fue a las 16h 41 min 58s. El tsunami llegó al Callao a las 17h 36min. y la diferencia también fue 54 min. Obsérvese que la llegada de la ola de mayor altura coincidió con el máximo de la marea que sobrepasó el límite de la regla. (Registro cortesía DHN de la Marina de Guerra del Perú)

### Estimación del tiempo de llegada de la primera ola de un tsunami de origen cercano

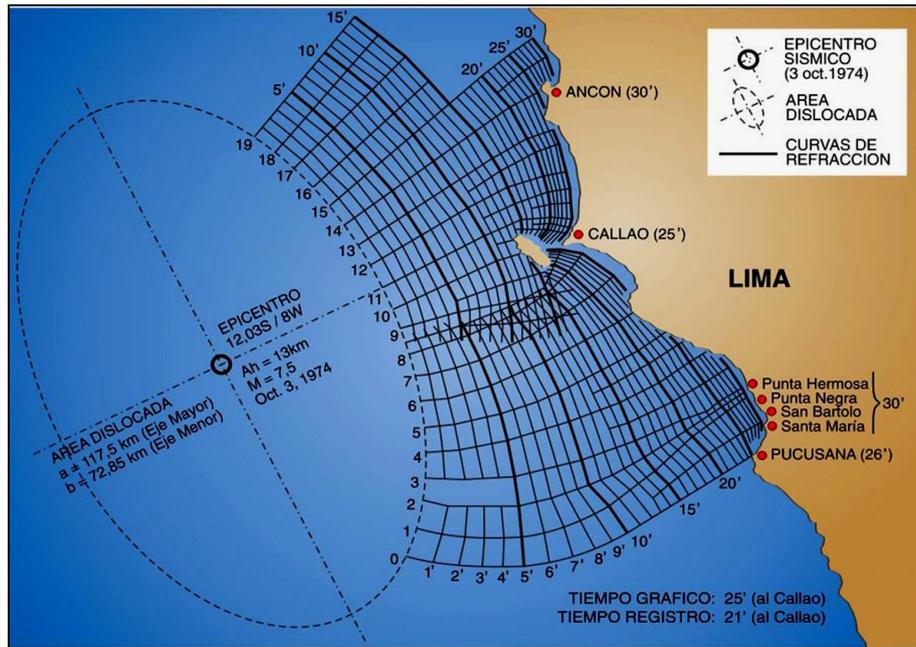
Calcular el tiempo que transcurre entre el sismo, percibido en el lugar de observación, y la llegada de la primera ola del tsunami a ese punto es un dato básico para planificar el plan de contingencia, pues es el tiempo del que dispone la población para la evacuación de la zona inundable. El método más directo y simple para estimar el tiempo de llegada de la primera ola es mediante cálculos gráficos o mediante modelos numéricos desarrollados en programas de cómputo, aunque es muy complicado modelar la transmisión de la energía de la litosfera (fondo oceánico) a la hidrosfera (masa de agua).

Investigaciones efectuadas después del terremoto y tsunami de Tohoku 2011, por Jet Propulsión Laboratory (JPL) del Instituto Tecnológico de California (Caltech), Pasadena, CA, muestran levantamientos y hundimientos del fondo oceánico y del continente, y el traslado de la región noreste de Honshu hacia el este de unos 4 m. Ello demuestra que el fenómeno es muy complejo y muy difícil de modelar.

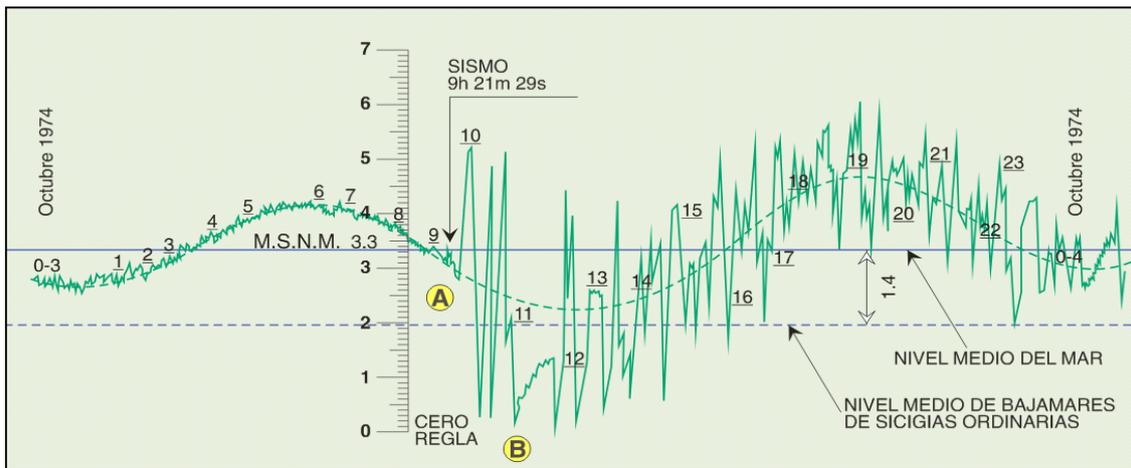
Asumiendo en forma simplificada que el tsunami se origina por el levantamiento o hundimiento de un émbolo de forma elíptica, cuyo tamaño, eje mayor y menor de la elipse, depende de la magnitud del sismo. Desde el borde de dicha elipse, se calcula el avance de los frentes de ondas espaciadas por lapsos de un minuto, hasta que estas curvas, llamadas de refracción, llegan a la costa: F-1.09. El mínimo tiempo, que es la condición más crítica, se obtiene si se ubica el centro de la elipse justo frente al punto de interés de la costa. El epicentro del sismo tsunamigénico del 3 de octubre de 1974 se ubicó justo frente a Lima

y Callao. Para el Callao, los cálculos según este método indican un tiempo de 25 minutos.

En la estación de la Escuela Naval en La Punta el mareograma registrado se muestra en la F-1.10. El sismo ocurrió a las 09<sup>H</sup>. 21<sup>m</sup> 30<sup>S</sup> y la primera ola alcanzó su máxima altura a las 10:00 am; sin embargo, el nivel del mar comenzó a subir varios minutos antes. Informaciones históricas también proporcionan valiosos datos. Por ejemplo, después del sismo del 28 de octubre de 1746, la primera ola del tsunami llegó a los 30 minutos de ocurrido el terremoto.



**F-1.09.** Diagrama de refracción del tsunami del 3 de octubre de 1974. El epicentro del sismo se ubicó frente al Callao, la posición más desfavorable, pues da el mínimo tiempo de llegada de la primera ola. Observe como la isla San Lorenzo divide el tsunami en dos frentes y La Punta es atacada por el norte y por el sur.



**F-1.10.** Mareograma registrado en el Callao el 3 de octubre de 1974. La marea estaba bajando, el sismo ocurrió a las 9 h 21 min 29 s; a las 10:00 h. la primera ola alcanzó su máxima altura y no hubo inundación, pero el nivel del mar comienza a subir

notoriamente unos 10 min. antes, indicando que la primera ola del tsunami había arribado a La Punta. (Registro cortesía DHN).

## **Delimitación de las Zonas Inundables**

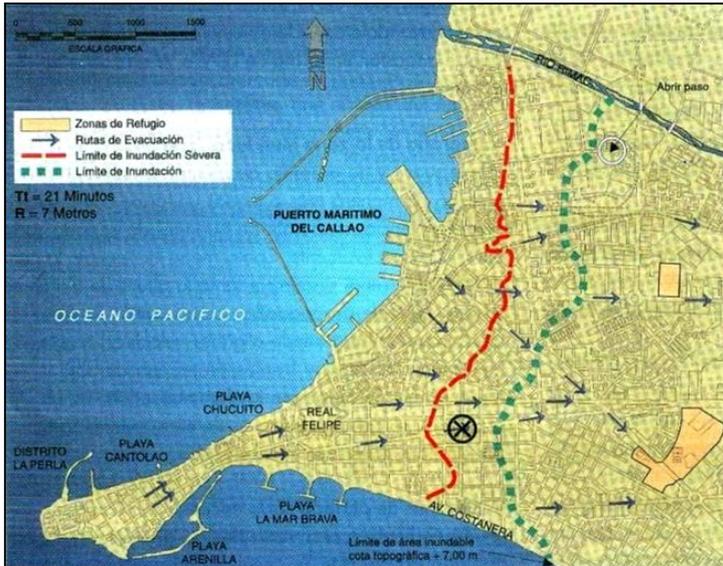
El comportamiento en tierra de los tsunamis es bastante complejo, porque influyen sobre él varios factores que se conjugan de diverso modo. Sin embargo, la batimetría y sobre todo la topografía de la zona inundable, son informaciones básicas que permiten delimitar las zonas inundables con cierto nivel de confianza.

En este sentido, las observaciones efectuadas en Japón, Hawai, Alaska y California sobre zonas inundadas por tsunamis aportan valiosas experiencias. En los lugares mencionados, en muchas ocasiones, las zonas inundadas han coincidido con la curva topográfica cuya cota es aproximadamente igual a la altura de ola del tsunami en la costa. Ello ocurre cuando las casas están cerca del mar, a decenas o pocas centenas de metros. Por ejemplo, el tsunami de Alaska de 1964 tuvo en Crescent City, California, una altura máxima de 6 m.s.n.m. a lo largo de una apreciable longitud de costa, y la línea de inundación máxima producida por el tsunami (*run up*) siguió generalmente la línea topográfica de esa elevación.

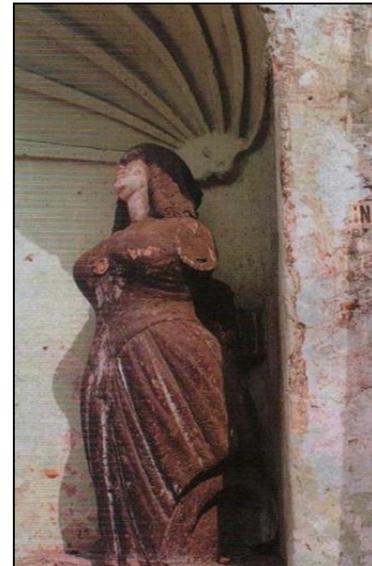
De lo anterior puede concluirse que un estimado inicial de la zona inundable por el tsunami abarca hasta donde la altura de la cota del terreno es igual a la altura de ola en la costa. Pero este cálculo debe ajustarse, teniendo en cuenta los efectos de la pendiente, la rugosidad del terreno y la posible convergencia del frente de onda causada por la topografía.

En costas rectas, de pendiente uniforme y con poca rugosidad del suelo, como en las costas de la playa Asia en Cañete, en el sur de Camaná, Arequipa, o en la costa sur del distrito de Chorrillos, en Lima, en general se asume que la altura de ola decrece en 1 % por pérdida de energía por fricción contra el suelo. Es decir, por cada 100 m que avanza horizontalmente, pierde 1 m de altura. Por ejemplo, si la ola tiene en la costa 6 m de altura, ella penetrará 600 m de tierra adentro, que es lo que ocurrió al sur de Camaná en 2001. Si el suelo es muy rugoso o presenta muchos obstáculos como árboles y construcciones, se acostumbra a considerar 2% de reducción, o sea que una ola de la misma altura penetraría 300 m aproximadamente.

Hay que tener especial cuidado con zonas bajas que penetran gran distancia tierra adentro, como el lecho de un río, aún seco, por donde el agua puede avanzar grandes distancias. En este sentido, un mapa topográfico con curvas de nivel a cada 0,5 m puede ser de gran utilidad. En zonas urbanas con muchos edificios rígidos y resistentes de concreto armado, la distancia de penetración se reduce considerablemente, aunque en calles y avenidas perpendiculares a la línea costera el tsunami puede avanzar grandes distancias, al aumentar su altura y canalizarse.



**F-1.11.** Mapa de inundación del Callao, por tsunami. La marca "X" indica donde quedó varado el barco San Fermín.



**F-1.12.** Mascarón de proa del barco San Fermín que quedó varado en lo que hoy es la esquina de la Av. Buenos Aires y Jr. Cochrane en el Callao.

### 1.3. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO HISTÓRICO DE LOS TSUNAMIS

La información histórica, es decir, la recopilación de documentos y depuración de relatos de tsunamis que afectaron poblaciones costeras, constituye una herramienta muy útil para evaluar los posibles efectos que un futuro tsunami puede ocasionar en dichos lugares, y para orientar los pensamientos y acciones de los pobladores, antes, durante y después de que ocurra cada evento. Desde el punto de vista de la protección de la población y planificación urbana, esto último es singularmente importante.

El desaparecido y destacado planificador urbano Arq. Carlos William, quien ha contribuido notablemente al desarrollo de la ciudad de Trujillo, en comunicación personal hizo saber al autor, que detectó arena depositada por tsunami en un cerro cercano a la costa de la región La Libertad, de unos 8 m.s.n.m. de altura. Este hecho hizo que el autor siguiera investigando el tema, hasta que encontró que sismólogos norteamericanos y franceses de las universidades Northwestern y Montpellier, respectivamente, indicaron que en la costa noroeste del Perú existe una gran zona de silencio sísmico que puede generar tsunamis de gran altura en el litoral, lo que avalaría, lo comentado por el Arq. C. William. En el seminario taller desarrollado por MINCETUR, realizado en Chiclayo en marzo de 2012, el Dr. Carlos Elera, arqueólogo, director del Museo Sicán, reiteró que ha encontrado restos de un paleotsunami que penetró cientos de metros tierra adentro y que afectó la región Lambayeque hace mucho tiempo.

Datación de restos de materia orgánica, incluidos en las arenas arrastradas por tsunamis, permiten estimar la antigüedad de los restos y la fecha aproximada de ocurrencia del tsunami. Es una técnica que se está aplicando desde hace

unas dos décadas. En Lambayeque, permitiría conocer cuándo ocurrió dicho paleotsunami u otros eventos del pasado.

### **El registro histórico proporciona algunas veces lo siguiente:**

- El tiempo de llegada de la primera ola a la costa.
- La altura de ola en la costa o *run up*. Por ejemplo, en las ciudades de la región de Sanriku, Japón, afectadas por tsunamis, la altura de ola alcanzada por eventos anteriores, como los de 1896 y 1933, están marcados en algunos postes, y en el registro de los límites de las inundaciones. En el Callao, Perú, el límite de inundación del tsunami de 1746 está marcado por el mascarón de proa de una embarcación que varó y se ubicó en la esquina de la Av. Grau y Jr. Cochrane (**F-1.12**), y por los tipos de construcciones que fueron afectadas en algunas localidades.
- La magnitud de los sismos tsunamigénicos ocurridos en la zona, los epicentros de dichos sismos y la profundidad focal de los mismos.

### **En consecuencia, es posible estimar:**

- La zona sísmicamente activa y potencialmente tsunamigénica, así como las características de los sismos tsunamigénicos que ocurren en ella.
- El tiempo mínimo de llegada de la primera ola.
- La altura máxima de ola, los tipos de construcciones que tienen características resistentes a los tsunamis, y los que deben proibirse, sobre todo los de material liviano, como los de madera y quincha, que son muy vulnerable frente a tsunamis. Así quedó demostrado en los tsunamis del océano Índico de 2004 y en el de Tohoku, Japón, de 2011.

La altura de ola del tsunami generado por el sismo de Tohoku 2011 sobrepasó el cálculo de probabilidades, que se realizó utilizando datos históricos de sismos tsunamigénicos de los últimos siglos. En Sanriku, los sismos tsunamigénicos de 1896 y 1933, en los cuales está basada la estimación de altura de ola en diferentes partes del mundo, están siendo revisados.

En el año 869 d.C. ocurrió frente a Sanriku un sismo tsunamigénico con similares características al evento de 2011, es decir, hace más de 1,100 años, que depositó arena a 4,0 km del borde oceánico. Este hecho no formó parte de la base de datos para el cálculo de probabilidades de altura de ola de tsunami en esa región.

Por ello la altura de los muros de defensa de los reactores nucleares de Fukushima fueron sobrepasados, el área se inundó e inutilizó a los generadores eléctricos de emergencia necesarios para enfriar los núcleos de dichos reactores, que se recalentaron, y hubo explosiones posteriores, contaminando decenas de kilómetros a la redonda desde la ubicación de dichos reactores.

Teniendo en cuenta que el ciclo de vida de las ciudades es de siglos o aún más probablemente de milenios, la altura de ola de tsunami y la zona de inundación por tsunami para el desarrollo urbano de ciudades a la orilla del mar, así como

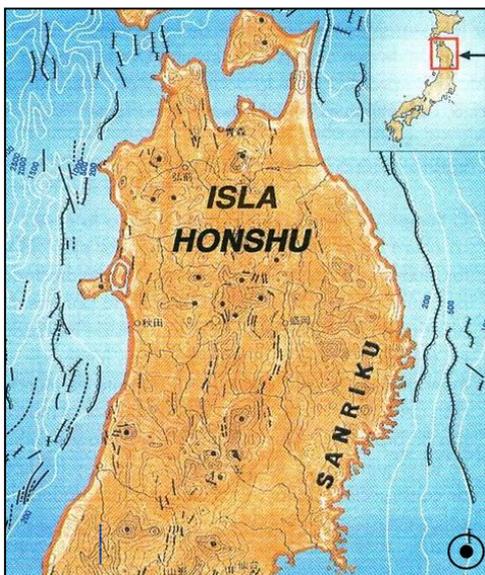
para fijar los límites de inundación para formular los planes de evacuación, se recomienda incrementar el período de retorno de tsunamis a mil años.

En principio, la altura de ola podría ser aumentada en un 40%, es decir,  $7 \times 1,4 = 9,80 \text{ m.} = 10 \text{ m.}$  para la costa central del Perú. Para la costa sur de Nazca, hacia la frontera con Chile y playas costeras de Piura, donde se tienen aguas profundas cerca de la costa y en donde la plataforma continental es más angosta, se sugiere incrementar la altura de ola a  $9 \times 1,4 = 12,6 \text{ m.}$

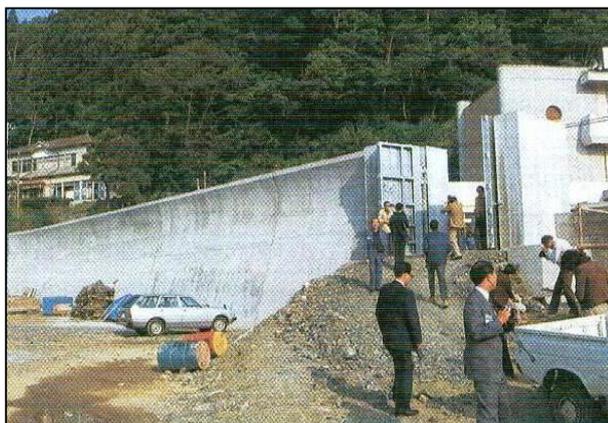
#### 1.4. REDUCCIÓN DE EFECTOS NEGATIVOS DE LOS TSUNAMIS

Así como la mejor opción para salvar vidas en caso de tsunami es la evacuación de las zonas inundables, el plan de uso del suelo, tomando como base el mapa donde se delimita la zona de inundación, es la mejor alternativa para proteger las propiedades y desarrollar ciudades seguras.

En los países pobres en vías de desarrollo, con relativa baja densidad poblacional, como los países latinoamericanos, la construcción de costosas defensas contra tsunamis, como se hizo en Sanriku, Japón, para proteger a la población y las propiedades, está fuera de las posibilidades económicas, debido a que hay otras prioridades, ya que es un fenómeno poco frecuente. En la F-1.14 se observa un costoso y resistente muro de concreto reforzado (CR) con puerta de acero que se cierra en caso de alarma de tsunami.



**F-1.13.** Región de Sanriku, Japón. Nótese lo accidentado de su costa, muy susceptible al efecto de tsunamis, y epicentro del terremoto de Tohoku del 11 de marzo de 2011, marcado con un círculo, que devastó las costas de Sanriku, y que constituyó la foto del día de la NASA del 12 de marzo de 2011.



**F-1.14.** Muros muy resistentes de CR defienden un sector inundable de un puerto de pescadores de Sanriku. Obsérvese la curvatura del muro en su parte superior, para rechazar de vuelta al mar a la ola que “trepa” por el muro.

## CAPÍTULO 2

### AVANCES TÉCNICO-CIENTÍFICOS RECIENTES MÁS RELEVANTES EN SISMOS Y TSUNAMIS Y SUS APLICACIONES

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

El título del Capítulo 2 se refiere a los avances científico-tecnológicos más recientes y notables sobre sismos y tsunamis, y su aplicación a la Guía Práctica, e incluyen investigaciones sobre paleotsunamis y desplazamientos cosísmicos.

##### 2.1.1. Investigación sobre Paleotsunamis

Los paleotsunamis constituyen una ciencia que recibió gran impulso después de la ocurrencia del gran terremoto y tsunami del océano Índico de 2004, que dejó 230 mil víctimas mortales. Ello ocurrió porque las autoridades, investigadores, ingenieros en la práctica profesional y población en general de los países afectados habían olvidado que en el siglo XIX y anteriormente ocurrieron varios tsunamis destructivos en la cuenca del océano Índico. Para eso, estudios realizados principalmente en la India y Tailandia, con el apoyo de UNESCO, USAID y JICA, impulsaron las investigaciones de Paleotsunamis, y la colaboración en la instalación de un sistema de alerta temprana en el océano Índico, a todas luces tardío. Se recuerda que, en el caso del océano Pacífico, también la toma de decisiones y las acciones fueron reactivadas, pues el Sistema de Alerta contra Tsunamis se implantó después del gran terremoto y tsunami de Valdivia, Chile, de 1960, 9.5 Mw, el más potente desde inicios del siglo XX. El tsunami que generó cruzó todo el océano Pacífico y ocasionó víctimas mortales en Hawaii, Sanriku, Japón, y en las islas Filipinas. En las investigaciones de Paleotsunamis, la técnica aplicada se basa en la datación radiológica de Carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ), que permite indagar el pasado hasta unos 57 mil años, con lo que es posible determinar, entre otros aspectos, el período de retorno de los tsunamis más destructivos, con un período de retorno de 1000 años, estudio necesario para el desarrollo de proyectos de ingeniería importantes, como, por ejemplo, la Línea 2 del Tren Eléctrico de Lima, actualmente en plena construcción.

Cuando los seres acuáticos marinos, plantas y animales con vida son arrastrados tierra adentro, mueren. Entonces, dejan de producir el escaso isótopo carbono 14, que empieza su desintegración radiactiva con velocidad constante con una vida media de 57 mil años, mientras que el abundante isótopo de carbono 12, permanece constante.

Determinando cómo la relación  $^{12}\text{C}/^{14}\text{C}$  va variando con el tiempo de manera constante, es posible determinar cuándo perecieron plantas y animales y, por lo tanto, cuándo se produjo el tsunami y el terremoto que lo generó. La aproximación de los resultados puede ser ilustrada con el tsunami que afectó las costas de Sanriku, Japón, en el año 1700, y que era de origen desconocido.

Investigadores de la Universidad de Washington, ubicada en la costa noroeste de los EE.UU., determinaron que, en el año de 1700,  $\pm 10$  años, ocurrió un gran tsunami que atacó las costas de los estados de Oregon, Washington, norte de California y costa sur de Canadá, al activarse la falla de Juan de Fuca, en la zona de subducción de Cascadia. Así se generó el gran tsunami que afectó la costa central noreste de Norteamérica en el año 1700. De este modo, quedó resuelto el misterio del origen del tsunami que afectó Sanriku, Japón en el año 1700.

### **2.1.2. Investigaciones sobre Deformación y Desplazamientos de la Corteza**

Desplazamientos horizontales y verticales de la corteza terrestre, que ocurren simultáneamente y como efecto colateral debido al terremoto y que fueron medidos durante el Gran Terremoto del Este de Japón de 2011 por la red geodésica de estaciones permanentes GPS, permitieron verificar que el mecanismo de generación de tsunamis estaba conceptualmente bien definido y que, materializado esquemáticamente, no había cambiado.

Por primera vez se obtuvieron en las costas de Sanriku, Japón, las medidas cosísmicas de los levantamientos del fondo oceánico frente a las costas del noreste de la isla Honshu, Japón, y los hundimientos que ocurren en tierra, así como también los desplazamientos horizontales de todo el noreste de la isla de Honshu, de este o a este, que fueron entre 4,3 m en la península sobre el océano Pacífico cercana al epicentro del sismo, hasta 1,0 m al otro lado de la isla Honshu, en las costas del Mar del Japón. Además se midieron desplazamientos hasta de 9,0 m en la superficie de interacción entre la placa Pacífica y la placa Norteamericana, que interaccionan en esa zona de subducción.

Todo esto ocurrió en una de las regiones más densamente instrumentadas del mundo, con equipos geofísicos de última generación. Ello se complementa con el alto nivel de los científicos japoneses que, con los resultados de las medidas cosísmicas, pudieron también formular modelos matemáticos para simular las deformaciones cosísmicas que ocurrieron. Emplearon principalmente resultados de mediciones efectuadas con el Sistema de Posicionamiento Global (*GPS, sigla en inglés*), y también mediciones registradas con mareógrafos en sus puertos, así como determinaciones de cambio de presiones en el fondo oceánico, cambios de nivel en la superficie en alta mar y registros en sismógrafos de alta resolución de la red global, ubicados a diferentes distancias de la isla Honshu, Japón.

Según la revista Science, principal vocera de la Academia Norteamericana para el Avance de la Ciencia (*AAAS, sigla en inglés*), en su publicación del 17 de junio de 2011, las mediciones cosísmicas y su interpretación fueron uno de los avances científicos más notables del año 2011.

Para el caso del Perú, se ha reportado que, después del sismo de Arequipa de 2001, la ciudad de Camaná sufrió una subsidencia de 84 cm. En el terremoto de Pisco 2007, un punto geodésico en Paracas se levantó 50 cm y avanzó

hacia el mar 1,60 m. Reportes históricos del gran sismo del Callao en 1746 indican que el puerto sufrió una subsidencia hasta el punto en que se formó una nueva bahía. Según los resultados de modelos numéricos de deformación, el Callao sufrió una subsidencia de 2.5 m y avanzó en dirección al mar 5,50 m, luego del gran sismo y tsunami de 1746.

### **2.1.3. Investigación sobre Modelos Numéricos de Simulación**

El desarrollo computacional a partir del año 2000 hace posible la ejecución de modelos numéricos de simulación en computadoras personales PC. Actualmente, se han desarrollado varios modelos de solución numérica de la fenomenología de tsunamis. Todos estos métodos se basan en la teoría (lineal y no-lineal) de propagación de ondas gravitacionales de período largo en aguas someras y en el desarrollo e integración de las ecuaciones de continuidad, energía y momento lineal por medio del método de diferencias finitas, considerando las condiciones iniciales y condiciones de frontera. Los modelos más importantes y aplicados son: TUNAMI, COMCOT y NEOWAVE. Los resultados del modelado numérico proporcionan parámetros como tiempo de arribo de la primera ola, altura de la ola, mareogramas sintéticos, zona de inundación, máxima velocidad de flujo en 2D, etc. Estos parámetros permiten definir criterios para la edificación de viviendas e infraestructuras, resistentes a los efectos de los tsunamis.

### **2.1.4. Avances tecnológicos ingenieriles**

#### **a) Licuación de suelos**

En lo que respecta a los avances tecnológicos ingenieriles, fueron esclarecedores los terremotos de Japón del año 2011 y Chile 2010, en los cuales los daños reportados por licuación de suelos, fueron los responsables de las mayores pérdidas y daños en edificaciones e infraestructura en general. Las altas intensidades sísmicas y su larga duración se dejaron sentir con gran severidad a gran distancia del epicentro, como en la ciudad de Chiba, cerca de Tokio, a unos 300 km de distancia del epicentro. En el sector de Shirahama, en Chiba, con suelo enteramente reclamado al mar, con arena y lodo bombeado del fondo oceánico, y que se ubica a orillas de la bahía de Tokio, son notables los resultados de las investigaciones de la Universidad de Chiba, que consolidan los conocimientos y experiencias de los tipos de suelos más susceptibles de sufrir licuación.

En la Guía Práctica se incluyen perfiles de los suelos más susceptibles de sufrir licuación, reportados por estudios de la Universidad de Chiba. Como era de esperarse, aunque tuvieron el mismo período predominante de estudio del suelo medido con el método de microtrepidaciones, los suelos con estratos de arena fina y limo hasta unos 15 m de profundidad tuvieron licuaciones generalizadas en el área, mientras que en los suelos arcillosos y limosos, ambos con número de golpes de la Prueba de Penetración Estándar (SPT) cercanos a 0 (cero), no ocurrieron licuaciones de suelos en los pozos de exploración, así como en las áreas circundantes. Mientras que en los perfiles, donde predominaba la arena fina con un bajo porcentaje de limo, ocurrió licuación severa, así como en el área alrededor del pozo tipo investigado.

## **b) Propuestas de estructuración de edificaciones tsunami-resistente**

El tsunami causado por GTEJ 2011, dejó valiosas enseñanzas en lo que respecta a su efecto sobre edificaciones, uno de los temas de mayor interés para la Guía Práctica.

Las viviendas de madera fueron arrancadas de su cimentación y arrastradas por las olas del tsunami, convirtiéndose en peligrosos proyectiles flotantes que causaron numerosas víctimas, y esta es una indicación importante porque hubo miles de desaparecidos.

Los edificios de concreto armado y de acero de poca altura, hasta unos 4 pisos no fijados firmemente a la cimentación o aquellos donde ocurrió licuación de suelos, fueron volcados por el tsunami. Sin embargo, edificios de concreto armado o de acero, que tenían libre el primer piso para el libre paso de las olas, casi no sufrieron daños. Los edificios con estructuras de acero resistieron bastante bien el terremoto y tsunami, pero sus elementos no estructurales, como fachadas y muros de partición internos, fueron arrancados de su fijación a las columnas y vigas de acero en los primeros pisos inferiores de las edificaciones, quedando la estructura resistente en esqueleto. Numerosos edificios de concreto armado resistieron bastante bien el terremoto y tsunami, lo que es el objetivo principal de la Guía Práctica, cuyas enseñanzas serán de utilidad para aplicarlas en los edificios por ser construidos a lo largo de la costa peruana en zonas inundables por tsunamis.

En resumen, los edificios de concreto armado que tenían libre el primer piso, así como las edificaciones con estructuras de acero, cuyos elementos no estructurales fueron arrancados por el fuerte oleaje resistieron bastante bien las presiones hidráulicas del tsunami.

## **c) Alternativas de protección: Defensas marítimas**

Las defensas marítimas contra el impacto de oleaje anómalo y tsunamis son estructuras importantes para los puertos y balnearios costeros. En el caso del tsunami de Camaná 2001, la defensa natural (que protege las zonas de cultivo colindantes al mar, al oeste de la ciudad de Camaná) amortiguó el impacto del tsunami; de lo contrario, el tsunami habría llegado hasta la misma ciudad de Camaná.

Algunas ciudades costeras del Japón cuentan con grandes estructuras tipo “rompeolas” de hasta 7 m de altura. En el gran sismo y tsunami del Japón de 2011, la altura de la ola sobrepasó los 10 m de altura. Sin embargo, estas estructuras lograron 2 objetivos valiosos: retardaron (algunos minutos) la llegada del tsunami a la costa y a la zona inundable y amortiguaron la energía del gran oleaje, logrando disminuir el impacto del tsunami.

## **2.2. AVANCES CIENTÍFICOS DE LOS DIEZ ÚLTIMOS AÑOS SOBRE SISMOS Y TSUNAMIS, APLICABLES A LA PRÁCTICA INGENIERIL**

Los tsunamis son fenómenos poco frecuentes, pero cuando estos son de gran magnitud y alcanzan las costas cercanas a su origen, pueden causar efectos devastadores, como ocurrió en el tsunami del océano Índico de 2004 y en el tsunami de Tohoku, Japón, en 2011. En la gran mayoría de los casos estos grandes trenes de ola son generados en zonas de subducción por la interacción entre placas tectónicas causada por sismos de magnitud mayores a 7.0 Mw y profundidad focal menor a 60 km.

En el caso de la costa central del Perú, donde se ubica Lima Metropolitana, sólo se cuenta con datos de unos pocos tsunamis ocurridos en los últimos 500 años, definitivamente insuficientes para aplicar métodos estadísticos que necesitan de mayores datos históricos para estimar el período de retorno de estos fenómenos naturales.

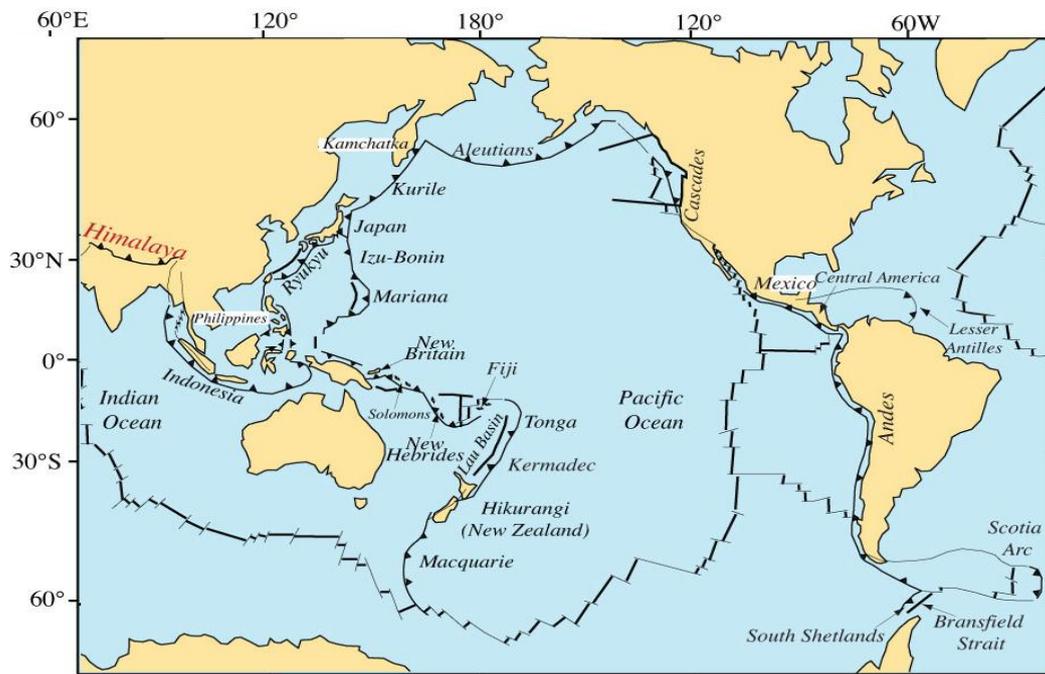
El tremendo impacto que causó en la comunidad técnico científica internacional el tsunami del océano Índico, que dejó más de 230 mil víctimas mortales en las costas de los países que bordean dicho océano y en islas ubicadas dentro de sus bordes, impulsó de manera muy importante las investigaciones sobre Paleotsunamis (Paleo = antiguo), que permiten investigar el pasado remoto, analizando por la técnica radiológica del Carbono 14, los estratos de arenas depositadas por el tsunami, lo que permite determinar cuándo los seres vivos perecieron, conociéndose así cuándo ocurrió el tsunami que depositó el estrato de arena que se investiga.

El Japón cuenta con una historia sísmica confiable de unos 2000 años. En el año 869 dC, ocurrió el tsunami Jogan-Sanriku, con una magnitud y características similares al terremoto y tsunami de Tohoku del 11 de marzo de 2011. La placa del Pacífico se introduce debajo del noreste de Honshu, la principal isla del archipiélago japonés, a razón de 8-9 cm/año. En la parte central oriental de la isla Honshu se ubica la ciudad de Tokio, capital de Japón.

En Sudamérica, en la costa oeste de Chile y Perú, la placa de Nazca, que subduce bajo la placa Continental, también converge a esta a razón de 7-8 cm/año. Los sismos en Tohoku-Oki, Japón, 2011, Maule, Chile, 2010 y en Lima, Callao, 1746, se produjeron por violentos desplazamientos de las placas en las zonas de subducción, con magnitudes entre 8.8 y 9.0 Mw.

Los métodos utilizados hasta la fecha a nivel internacional para determinar la máxima altura que el tsunami alcanza en la costa (*run up*) han estado basados en la experiencia japonesa, principalmente en las investigaciones de los tsunamis de 1896 y 1933, que afectaron las costas de la región Sanriku, Japón. Comparando las alturas de ola de los tsunamis de 1896 y 1933 con el evento de 2011, que tenía como antecedente el tsunami de Jogan, Sanrikú de 869 dC, que sucedió hace 1142 años, se tiene que la altura de ola en promedio fue más del 33% de la altura máxima esperada. De tal manera que, utilizando un coeficiente de ajuste de 1,4 en la fórmula de Yamaguchi, se tendrían resultados

con mayor aproximación para un período de retorno de tsunamis de 1,000 años.

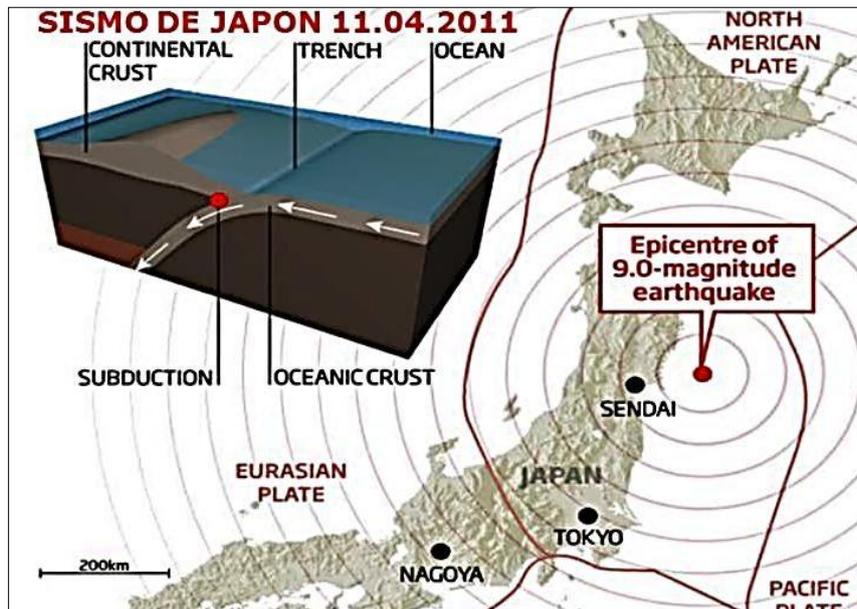


**F-2.01.** Zonas de subducción en la cuenca del océano Pacífico, donde ocurre el 80% de los sismos, actividad volcánica y tsunamis. Allí ocurrieron los megaterremotos de Maule, Chile, 2010 y el de Tohoku-Oki de 2011.

El período de retorno de sismos para su aplicación en ingeniería de diseño de edificaciones e infraestructuras se considera cada 100, 475 o 1000 años, dependiendo de la importancia de la construcción, lo que puede determinarse utilizando información histórica existente sobre sismos ocurridos en la zona de influencia de la subregión de interés, que son suficientemente abundantes para que se puedan aplicar métodos probabilísticos. En cambio, determinar el período de retorno de tsunamis que pueden afectar la costa central del Perú no es una tarea fácil, principalmente por la carencia de datos de sismicidad histórica.

El gran terremoto y tsunami de Tohoku-Oki, Japón del 11 de marzo de 2011, ocurrió en una de las regiones más densamente instrumentadas del mundo. Se efectuaron miles de medidas geofísicas en tierra y en mar, tanto en el fondo oceánico como en la superficie del mar con boyas flotantes. La Figura **F-2.02** muestra las placas tectónicas que interactúan en la región norte de la isla de Honshu, donde se observa que la placa del Pacífico se introduce debajo de la placa norteamericana.

Algunos de los avances científicos más importantes del año 2011 fueron los resultados de las investigaciones de los desplazamientos cosísmicos debidos al terremoto de Tohoku-Oki, ocurrido el 11 de marzo de 2011, que fue reportado por la revista Science, publicada por la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia /AAAS) en junio de 2011 (Simons et al., 2011).



**F-2.02.** Placas tectónicas que generaron el terremoto y tsunami de Tohoku-Oki el 11 de marzo de 2011. El diagrama en la parte superior izquierda muestra cómo la placa del Pacífico se introduce debajo de la placa Norteamericana, donde se ubica el sector norte de Honshu

### 2.3. DESPLAZAMIENTOS COSÍMICOS

El 17 de junio de 2011 la revista Science publicó el artículo “The 2011 Magnitud 9.0 Tohoku-Oki Earthquake. Mosaicking the Megathrust from seconds to centuries”.

Fue considerado como uno de los avances científicos más notables a nivel global del año 2011 y tiene gran trascendencia para la toma de decisiones ingenieriles para el diseño.

El modelo de generación de tsunamis en las zonas de subducción quedó validado y cuantificado, en función de lo que ocurrió en el mar y en las costas de Japón.

El terremoto de Tohoku-Oki del 11 de marzo de 2011 (9.0 Mw), ocurrió en el fondo oceánico, donde la placa del Pacífico subduce debajo del noreste de Honshu, la principal isla del archipiélago japonés, a razón de 8 a 9 cm/año en el sector de la zona de subducción que se fracturó durante el terremoto. El plano de ruptura tuvo unos 500 km de longitud, y más de 150 km de ancho.

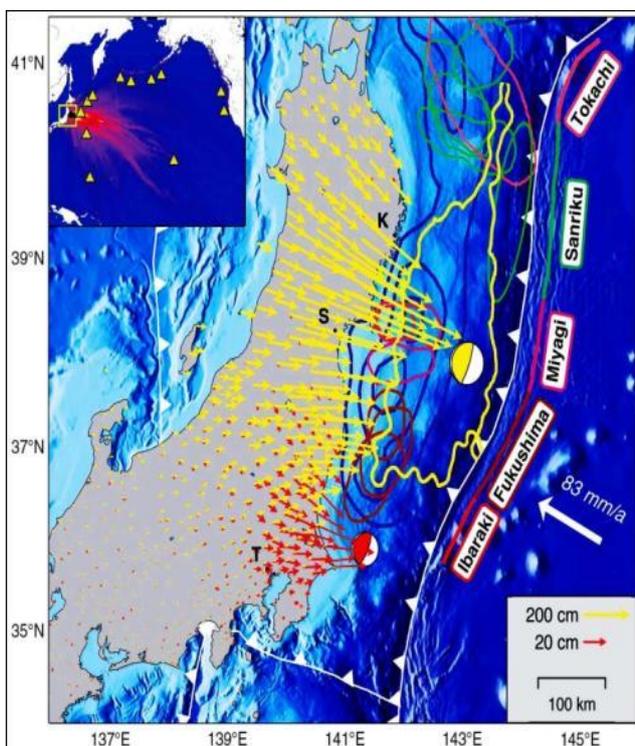
Entre fines del siglo XIX y 2005 han ocurrido una decena de terremotos de magnitud entre 7.0 y 8.0 Mw, de tal manera que no se esperaba un terremoto de magnitud 9.0 Mw como el de 2011. Explorando el pasado se encontró que el 13 de julio de 869 d.C. ocurrió el terremoto y tsunami de Sanriku-Jogan, con características similares al gran evento de 2011, es decir, hace más de 1140 años, de donde podría inferirse que son eventos con un período de retorno de 1000 años, para el noreste de la isla de Honshu, Japón.

El terremoto y tsunami de Tohoku-Oki de 2011 fue observado mediante una densa red regional de equipos geodésicos y también la red global de

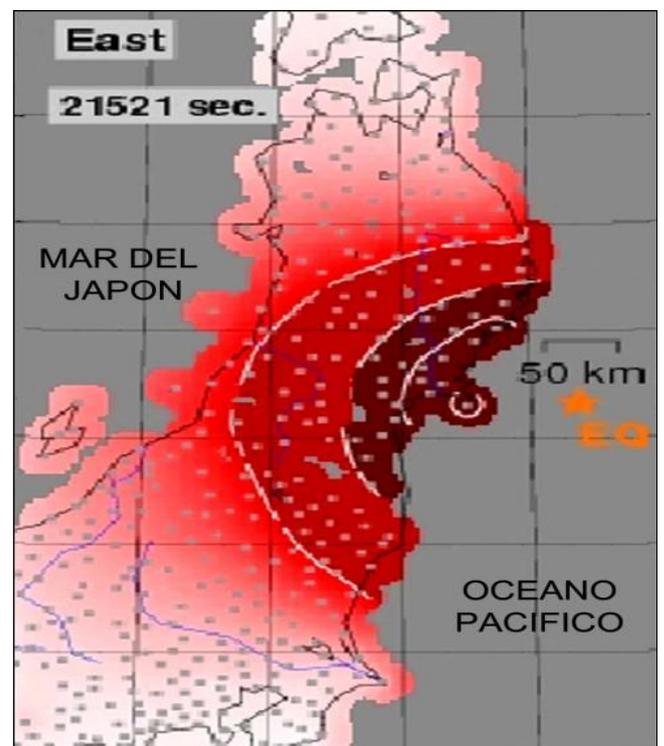
estaciones sísmicas de banda ancha, así como el registro del tsunami en el océano Pacífico. Ello permitió la construcción de una familia de modelos para describir la distribución y evolución de los deslizamientos sub-superficiales.

Los desplazamientos superficiales fueron observados de manera continua por más de 1200 estaciones GPS (Global Positioning System) instalada y operada por el Servicio Geodésico del Japón. Simons et al. (2011) usaron muestras tomadas cada 5 minutos para reproducir los procesos individuales de las tres componentes de las series medidas, de las cuales obtuvieron los desplazamientos cosísmicos. En la Figura F-2.03 se muestra los desplazamientos cosísmicos horizontales del evento principal de 9.0 Mw con vectores en color amarillo y una réplica de 7.9 Mw que ocurrió 30 min después del evento principal con vectores de color naranja. La Figura F-2.05 muestra en cambio los desplazamientos cosísmicos verticales. Nótese que en una franja de forma irregular en planta y elevación paralela al contacto entre las placas se tiene elevaciones de unos 6 m en el centro del “cerro” y la altura se va reduciendo hacia el norte y hacia el sur. En el fondo oceánico cerca de la costa y en la costa se han producido hundimientos de unos 0,20 m.

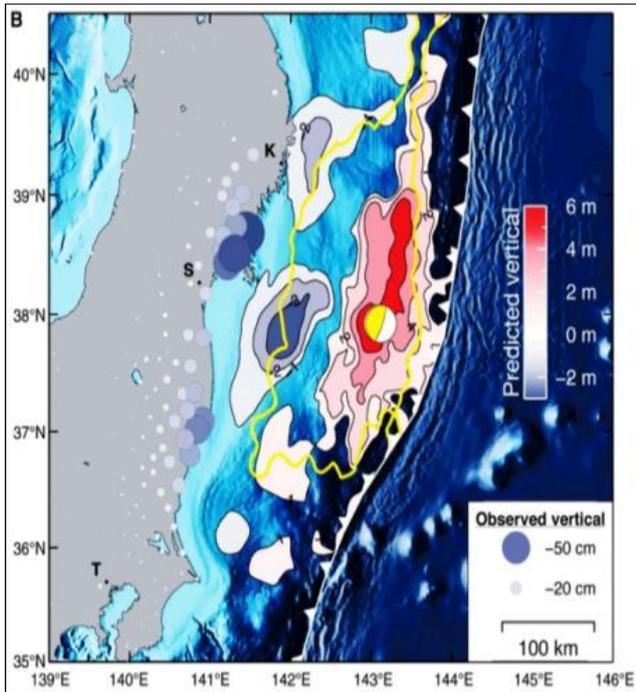
La F-2.04 muestra los desplazamientos horizontales de oeste a este del noreste de la isla Honshu. Obsérvese que en la península cercana al epicentro se registró un desplazamiento de 4,2 m. Nótese que las curvas con diferencia de 1,0 m de desplazamiento fue de cerca de 1,0 m en las costas del Japón.



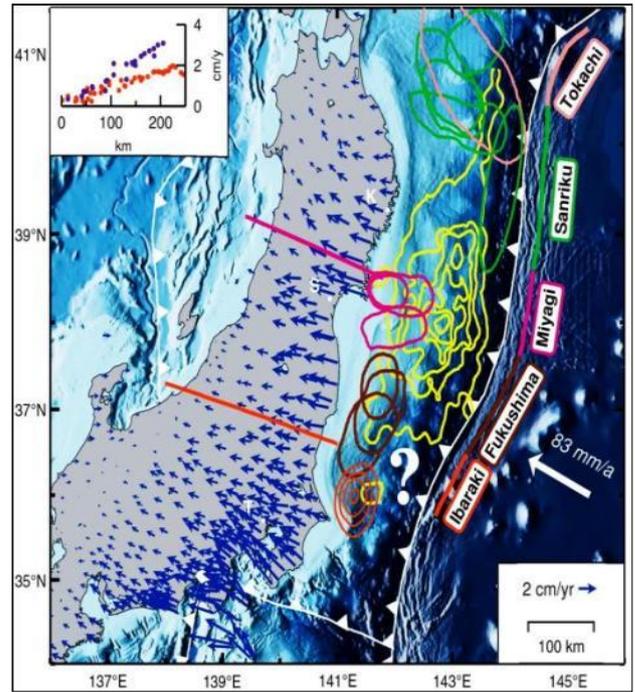
**F-2.03.** Desplazamientos horizontales de oeste (W) a este (E), vectores amarillos; evento principal, vectores naranja de una réplica el SW del evento principal.



**F-2.04.** Desplazamientos horizontales en NW, isla Honshu de W a E. en la península, 4.2 m y cerca al mar de Japón de 1.0 m.



**F-2.05.** Desplazamientos verticales durante el evento principal. En rojo, levantamientos; en azul, hundimientos.



**F-2.06.** Desplazamientos horizontales intersísmicos del norte de la isla Honshu. Nótese la escala de desplazamiento de 2 cm/año y la escala geográfica de 100 km. La mayor velocidad de desplazamiento se da cerca de La costa este de Honshu.

La Figura F-2.06 muestra los desplazamientos intersísmicos del norte de la isla de Honshu. Es un proceso que dura siglos y muestra cómo ese sector de la isla de Honshu está siendo comprimido acumulando energía elástica que luego será liberada al ocurrir un terremoto.

En el futuro, cuando se cuente con mayor información de sismicidad, el período de retorno de los terremotos no solamente estará basado en datos históricos de sismicidad en la zona de interés, sino que contará también con un patrón basado en un modelo físico cuya evolución se ha iniciado.

La gran magnitud del terremoto de Tohoku-Oki de 2011 no era esperada por los investigadores japoneses, como se ha mencionado anteriormente, en la región afectada en 2011, donde han ocurrido numerosos sismos de magnitud entre 7.0 y 8.0 Mw, tal como se muestra en la F-2.06, con el nombre de los eventos enmarcados al centro de un rectángulo. Ello sugiere que se debería considerar que en cualquier otra región de Japón podrían ocurrir terremotos de magnitud extrema.

Como una extensión de este tema debe considerarse a Sudamérica, sobre todo al tramo que abarca a Perú y Chile, donde interaccionan las placas de Nazca y Sudamericana; en esta región pueden ocurrir sismos de magnitud 8,8 – 9,5, como los producidos en 1960 y 2010.

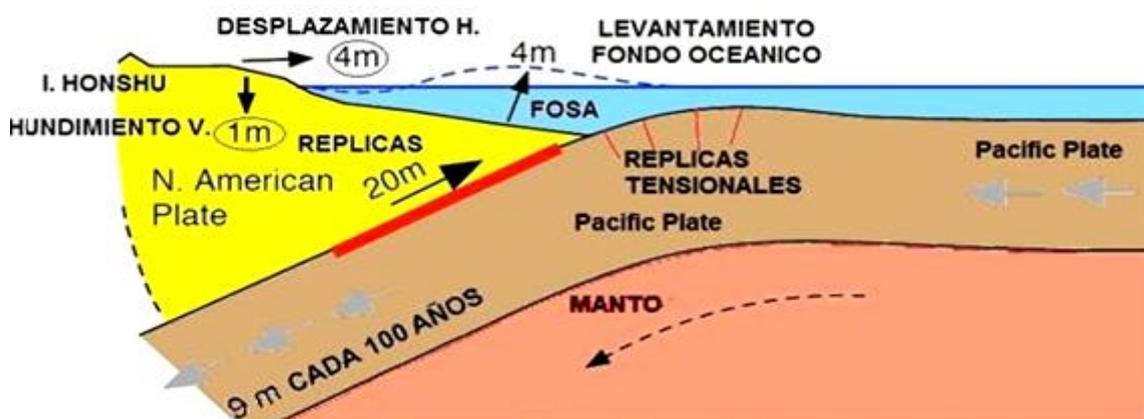
La región donde se ubica Tokio está en la parte sur de la placa Norteamericana; por ello, los investigadores sugieren que puede ocurrir un gran

sismo frente a la parte central de Honshu. Los desplazamientos antisísmicos generan los esfuerzos compresivos que sufre la corteza terrestre; dicho proceso dura siglos, acumulando energía potencialmente generadora de futuros terremotos y tsunamis.

En la Figura F-2.07 se muestra un corte este-oeste a lo largo de la zona epicentral donde, de manera esquemática, se muestran los desplazamientos horizontales y verticales. Nótese que hay un corrimiento de 20 m en el plano de contacto entre las placas. El levantamiento del fondo oceánico, de 4 a 6 m, generó un levantamiento de 4 m en la superficie del mar.

Este modelo de generación de tsunamis, que se ha estado utilizando de manera intuitiva, se ha verificado con mediciones reales.

Tratar el tema de los desplazamientos cosísmicos con la amplitud y la rigurosidad científica presentada en el artículo de la revista Science, va más allá de los objetivos de esta consultoría. Sin embargo, aquellos especialistas en Geofísica que se interesen en estudiar el tema con mayor profundidad, pueden acceder al trabajo original, cuya referencia se incluye.



**F-2.07.** Desplazamientos a lo largo de un corte oeste – este de Honshu a través de La zona donde se generó el gran terremoto. Nótese que en el borde del mar la placa se ha desplazado 4 m horizontalmente y se ha hundido 1 m. El fondo oceánico se ha levantado 4 m y ha ocurrido un desplazamiento interplaca de 20 m. Nótese que La placa que subduce se introduce a razón de 9 cm/año y que las grietas en la placa del Pacífico generan réplicas tensionales. Obsérvese que el brusco levantamiento del fondo oceánico fue el movimiento que generó el gran tsunami.

## 2.4. APLICACIONES DE DESPLAZAMIENTOS COSÍMICOS EN EL MODELAMIENTO DEL TSUNAMI DE CALLAO DE 1746

Dentro del marco de la cooperación del Gobierno de Japón con el Gobierno del Perú, se realizó el modelado del sismo y tsunami que afectó la costa central del Perú el 28 de octubre de 1746, ocasión en que el puerto del Callao fue destruido, causando la muerte del 95% de los 4 mil habitantes que tenía para entonces.

El objetivo principal de la simulación realizada por investigadores de la Universidad de Tohoku, y del Perú de la DHN, UNMSM y la UNI, Jiménez et al.

(2013) y Adriano et al. (2013) fue determinar la altura de la ola en la costa según la localización de 3 mareógrafos virtuales: en el Callao, donde se ubica la DHN; en La Punta, y al pie de los acantilados de la Costa Verde, donde el desnivel entre la playa y el malecón de Miraflores es de unos 80 m.

Para ello fue necesario aplicar los avances más importantes logrados en los últimos años: el tamaño y forma de la fuente sísmica, su ubicación, las deformaciones cosísmicas y la velocidad de propagación de la ruptura. De acuerdo con ello se modeló la fuente del tsunami, tomando como base los efectos macrosísmicos históricos del terremoto del Callao en 1746 (Silgado, 1978).

Se hace notar que la velocidad de propagación del tsunami depende solamente de la profundidad oceánica:  $V = \sqrt{gh}$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y es constante.

El modelo del avance del tsunami, paso a paso, consiste en asumir que la franja del avance del tsunami se produce en un tiempo determinado, generalmente un minuto, donde la profundidad se considera constante, de tal manera que la pendiente inclinada del fondo oceánico es reemplazada por escalones sucesivos de profundidad constante. Por ello, cualquiera que sea el método que se emplee, como lo hicieron Delgado y García en la FIC/UNI en 1982, o la última simulación realizada por el equipo principalmente integrado por investigadores de la Universidad de San Marcos, Perú, y Universidad de Tohoku, Japón, en 2013, dará resultados similares.

Sin embargo cerca de la costa, donde el perfil del litoral no es recto, sino accidentado, como en el caso del Callao, donde se tiene la interferencia de la isla San Lorenzo y el sector marino frente al Terminal Marítimo del Callao, que tiene forma de “bahía hundida”, el método del programa TUNAMI de Imamura da resultados más precisos.

El método gráfico puede ajustar la altura del tsunami que entra a una bahía, utilizando el método de Green, que incrementa la altura del tsunami conforme pierde profundidad y se va angostando; da, como en el caso de la simulación de Imamura, grandes alturas del tsunami en los vértices de bahías en forma de U, V y W. En el vértice de una de las bahías en Sanriku, la altura de ola alcanzó el máximo de 40,5 m de altura en el evento del 11 de marzo de 2011.

Como es comprensible, para la simulación de la propagación oceánica del tsunami se requiere información batimétrica (profundidad oceánica) por donde se desplazan las ondas del tsunami hasta su llegada a la costa. En dicha simulación, se ubicaron 3 mareógrafos virtuales para determinar la altura de ola en la costa en los puntos de interés.

Luego, con la información de la topografía y rugosidad (coeficiente de Manning) del suelo de la zona inundable tierra adentro a partir de la línea costera, se puede determinar el límite de inundación, que en esta simulación coincide bastante bien con la cota topográfica de los 10 msnm.

La hipótesis de trabajo fue un sismo de 9.0 Mw, el cual, como se muestra en la Figura F-2.08 y F-2.09, corresponde al tsunami con período de retorno de 1000 años.

Los parámetros geométricos de la falla generadora del tsunami asumido fueron:

Longitud (L) 550 km  
Ancho (W) 140 km  
Media deslizante 11,5 m  
Profundidad 8,0 km

Para una magnitud de 9.0 Mw las dimensiones de la falla serían:  $L = 575$  km y  $W = 140$  km, lo que corrobora que la hipótesis asumida por el equipo de trabajo fue Mw 9.0.

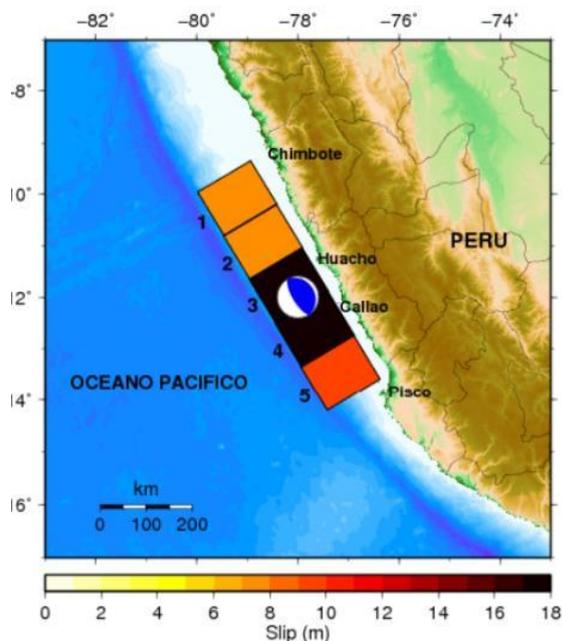
Se hace notar que en este informe sólo se reproducen los datos más relevantes, que hacen comprensible el proceso de modelamiento en todas sus fases, desde la fuente sísmica, hasta determinar la altura de ola en los mareógrafos virtuales ubicados en el Callao en la sede DHN, en La Punta y en la Costa Verde, así como el límite de inundación que es lo que interesa para esta consultoría.

El lector que desee seguir todo el proceso en detalle, incluyendo las fórmulas matemáticas utilizadas, puede revisar los trabajos de Jiménez C. et al. "Seismic Source of 1746 Callao Earthquake from Tsunami Numerical Modeling", Journal of Disaster Research Vol. 8 N° 2, 2013; y Bruno A. et al., "Tsunami Inundation Mapping in Lima, for two Tsunamis Sources Scenarios", Journal of Disaster Research. Vol. 8 N° 2, 2013.

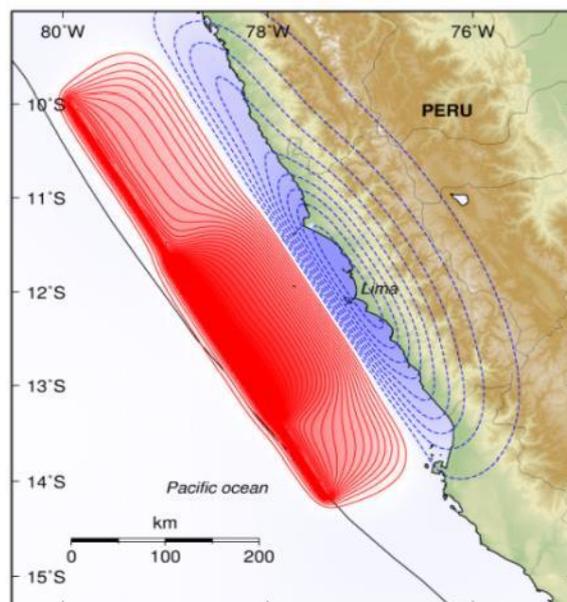
Al hacerlo, el lector podrá notar que, en el proceso de síntesis, el orden de presentación se ha cambiado, y se han agregado notas explicatorias de otras fuentes, así como comentarios propios, para lograr una mejor comprensión de las personas no familiarizadas con los últimos avances científicos referidos al proceso de generación de tsunamis de acuerdo con los desplazamientos horizontales y verticales de la superficie de la corteza terrestre, tanto en tierra como en el fondo oceánico que genera el tsunami.

También podrá referirse a la revista Science de junio de 2011, publicación de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS), donde se dan a conocer los avances anuales más importantes en las diferentes especialidades de la Ciencia del año en curso, en este caso los desplazamientos cosísmicos.

Los autores (Jiménez et al., 2013) tomaron como límite sur del sector de su sistema de falla para generar el sismo de 9.0 Mw la cordillera submarina de Nazca, latitud  $15^{\circ}\text{S}$ ; y por el norte la fractura de Mendaña, latitud  $9^{\circ}\text{S}$ , de donde han deducido la longitud de ruptura en 550 km y un ancho  $W$  de 140 km, de tal manera que la rugosidad interplaca, en su tramo central entre Cañete y Barranca, con mayor valor, haciendo su modelo de generación del sismo y tsunami compatible con la magnitud asumida de 9.0 Mw.



**F-2.08.** Segmentos de la fuente sísmica (distribución del deslizamiento).



**F-2.09.** Deformación inicial del lecho marino. Nótese que la mayor deformación se produce entre Barranca y Cañete.

Distribución del deslizamiento para cada uno de 5 segmentos.- Las coordenadas corresponden a la esquina inferior izquierda y la profundidad de la parte superior a lo largo de las fallas del eje vertical.

	Lat (°)	Lon (.)	Hi (km)	Desliz (m)
1	-14,2000	-77,4200	8,00	09,00
2	-13,3520	-77,9295	8,00	12,50
3	-12,5040	-78,4390	8,00	17,00
4	-11,6561	-78,9485	8,00	07,00
5	-10,8082	-79,4580	8,00	07,00

El tsunami generado en 1746 afectó con severidad desde La Libertad, donde a la nave Concepción, la fuerza del tsunami le abrió un boquete en su casco y se hundió, hasta cerca de Huacho, donde inundó la carretera, destruyó caminos y mató caballos. Hacia el sur, los puertos de Pisco y Caballas, en Ica, fueron afectados. El tsunami llegó hasta las costas de Acapulco en México y Concepción en Chile, según Silgado (1975), Soloviev et. al (1975), Ocola (1984) y Seiner (2011).

Los datos históricos existentes sobre el sismo y tsunami fueron utilizados para modelar la fuente de generación del tsunami, en un proceso hacia adelante y hacia atrás, visualizando también qué ocurrirá en el futuro, mediante el método de prueba y error. Así el modelo del tsunami se fue adaptando a los datos históricos que fueron los siguientes:

- El tiempo de llegada de la primera ola del tsunami fue de aproximadamente 30 minutos.

- La altura máxima de la primera ola del tsunami fue de aproximadamente 10 m en el Callao. El consultor estima que fue de 7,0 m., por datos históricos, verificados con las cotas de lugares claves, como altura de las murallas donde se salvaron unas pocas personas y la cota del lugar donde varó el barco San Fermín.
- La altura máxima de inundación (*run up*) fue de 22 m en los acantilados de la zona de Costa Verde. Lo que parece razonable, por la cercanía del acantilado a la línea costera, por lo que no hay espacio suficiente para disipar energía en tierra y la energía cinética se convirtió en potencial “*trepando*” el acantilado.
- Después del terremoto, se informó un hundimiento permanente en el Callao.
- La destrucción total se extendió desde Cañete, hasta el sur de Barranca y Pativilca, por el norte. Esto implica una gran aspereza, dificultando el deslizamiento de las placas, entre esos lugares.
- La inundación horizontal máxima fue de 4 km, probablemente en el lecho antiguo del río Rímac.
- Las olas del tsunami llegaron al Callao desde el noroeste, lo que está registrado en un gráfico de la época.
- De acuerdo con Silgado, la intensidad fue X-XI MM en Lima y Callao, en los lugares de suelo de grano fino saturado de agua, en los terrenos de cultivo cerca de las acequias de regadío. En el Callao existen sectores donde la profundidad de la napa freática es de 3-5 m, con suelo de grano fino y presencia de materia orgánica, condiciones para la gran amplificación de las ondas sísmicas.

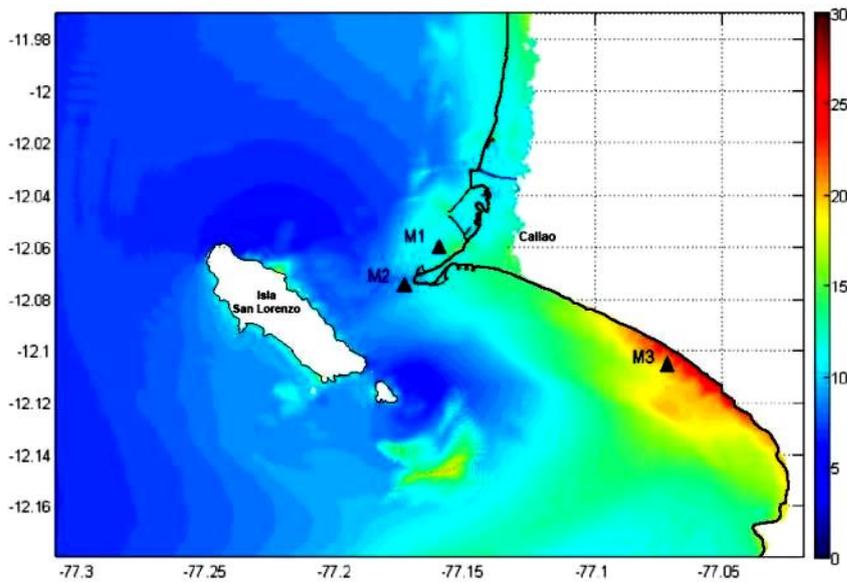
Estos datos fueron utilizados para modelar la fuente del terremoto, los desplazamientos y el mecanismo de generación del sismo tsunamigénico.

#### **2.4.1. Modelo de propagación oceánica del tsunami**

Para determinar las deformaciones cosísmicas producidas por las dislocaciones en la región de la fuente sísmica de 9,0; 17,5; 17,5; 7,5 y 7,0 m, respectivamente, de norte a sur, que generó el tsunami, fue necesario aplicar el modelo de propagación oceánica del tsunami para el cual se usó el modelo numérico TUNAMI, desarrollado por Imamura (1996), profesor e investigador de la Universidad de Tohoku, de la ciudad de Sendai, Japón.

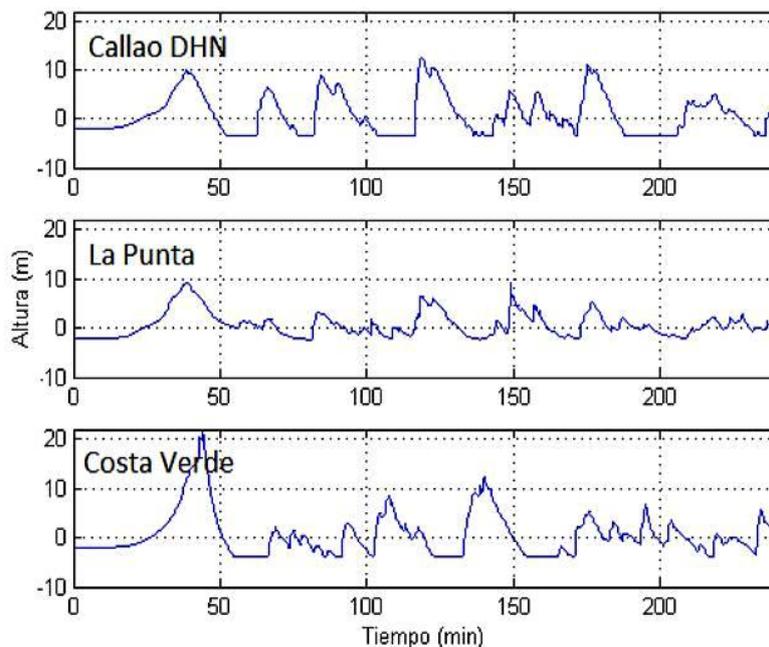
El modelo fue ajustado para que la primera ola del tsunami llegue al Callao en 30 minutos, de acuerdo con la descripción histórica del tsunami de 1746. Una velocidad de ruptura de la falla asumida fue 3 km/s y una duración de 3 minutos ( $3 \text{ km/s} \times 180 \text{ s} = 540 \text{ km}$ ).

Los mareógrafos virtuales ubicados en la estación DHN, La Punta y en Costa Verde se muestran en la Figura F-2.10.



**F-2.10.** Mapa de Inundación para la bahía del Callao y Miraflores. La altura en rojo corresponde a Miraflores. M1, M2 y M3: mareógrafos virtuales. (Fuente Jiménez et. al., 2013).

Los mareogramas virtuales registrados en las ubicaciones mencionadas se muestran en la Figura F-2.11.



**F-2.11.** Mareogramas virtuales. La altura de la primera ola en el Callao fue de 10 m. y la más alta fue la cuarta ola que llegó a unos 11,2 m, en La Punta fue de 9,5 m., mientras que la máxima altura fue de 22,0 m en Costa Verde.

En la Costa Verde el *run up* llegó a 22,0 m de altura, debido a que el acantilado se ubica a corta distancia de la orilla, entre 50-150 m, desde el borde costero, de tal manera que la ola “trepó” por el acantilado.

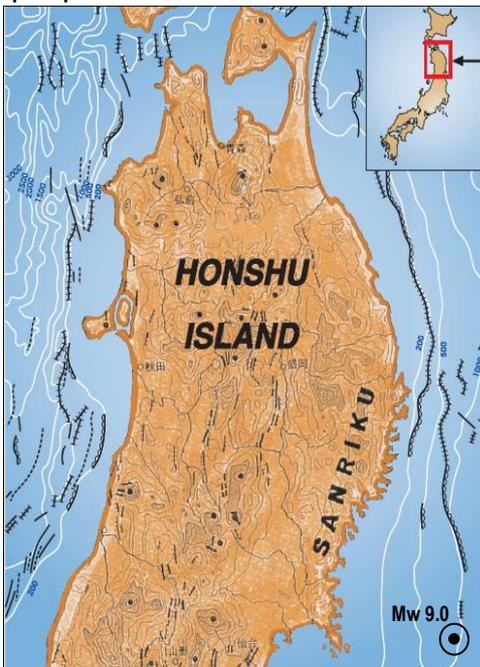
En este caso el significado de “*run up*” muestra el ‘porqué’ de su definición. Con las olas tan altas y la abundancia de piedras redondas (cantos rodados) de todo tamaño frente a las costas de Barranco y Miraflores, de acuerdo con la experiencia del tsunami de Tohoku de 2011, esas piedras se convertirán en

proyectiles arrastrados por el tsunami a una alta velocidad, con un gran poder destructivo que puede causar víctimas mortales y destrucción de construcciones y de los vehículos que se encuentran transitando por el Circuito de Playas.

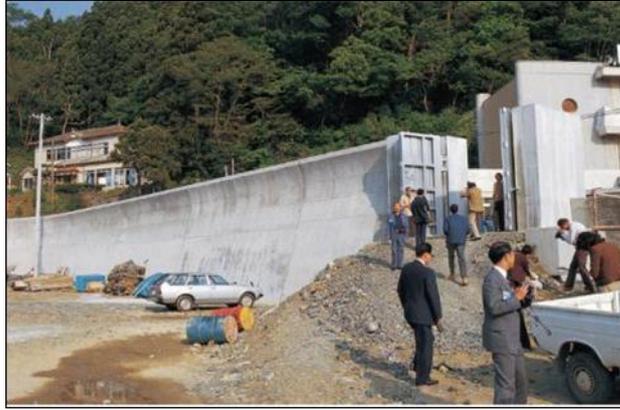
Los muros de concreto armado de defensa contra tsunamis utilizados en Japón muestran en su parte superior una curvatura hacia el mar, para rechazar la ola de tsunami que trepa por la pared. F-2.13 es una fotografía tomada por el consultor en Sanriku, durante un seminario taller sobre tsunamis realizado en la ciudad de Sendai, que concluyó con una visita técnica a la región Sanriku. Ello permitió una mejor comprensión de lo ocurrido en Sanriku en los años 1896, 1933 y 2011, y entender el mensaje de la NOAA, en la foto del día 12 de marzo de 2011 (F-2.12), donde sólo se presentó, el epicentro de un terremoto al sureste de Sanriku, su magnitud de 9.0 Mw y su accidentada costa. Las personas que conocen la geografía de esa región tan sensible al efecto de los tsunamis, dedujeron que allí se había producido un desastre de grandes proporciones, que la televisión propalaría en las horas y días siguientes del terremoto y tsunami, confirmando la magnitud de la tragedia.

La solución en Sanriku del muro ilustrada en F-2.13 puede ser utilizada para proteger los acantilados de la Costa Verde, para reducir el impacto de sucesivas olas que pueden erosionar su base, poniendo en riesgo construcciones existentes como Larcomar o las que se desarrollen en el futuro.

Como se muestra en la figura F-2.10, la investigación realizada por los investigadores peruanos y japoneses sobre el tsunami de 1746 define una línea de inundación que es consistente con los resultados de otros estudios, por lo que puede ser considerada como un aporte valioso.



**F-2.12.** Región Sanriku, Japón. Nótese que aguas oceánicas poco profundas se ubican cerca de la costa (isobatas en líneas blancas) muy cerca en un sector norte y la forma accidentada de su costa. La foto del día del 12 de marzo de 2011 fue el mapa de la región Sanriku, con el epicentro del terremoto y tsunami del 11 de marzo de 2011, indicada con un punto y círculo negro.



F-2.13. Muro de defensa contra tsunamis en la región Sanriku ubicada cerca de la línea costera. Nótese la curvatura del muro en su parte superior para reflejar el run up del tsunami. Foto del autor. Ref. p 238 del libro Disaster Reduction de Julio Kuroiwa. Obsérvese la puerta de acero para impedir que el agua avance más allá del muro.

## **2.5. AVANCES RECIENTES EN LA INVESTIGACIÓN DE PALEOTSUNAMIS. SU APLICACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DEL PERIODO DE RETORNO DE TSUNAMIS**

Desde el punto de vista histórico, los datos que existen a nivel internacional, en el banco de datos de las entidades geológicas de los EE.UU. aun los que existen en Japón, son insuficientes para determinar el período de retorno de tsunamis de 1000 años. Sin embargo, cuando el tiempo se mide en siglos o milenios, como en el caso de la geología, es posible, de manera científica estimar el período de retorno de tsunamis, mediante la investigación de Paleotsunamis. En el caso del Perú, la carencia de datos es aún más dramática, pues sólo se cuenta con datos históricos de unos pocos tsunamis ocurridos en los últimos 500 años.

Los estudios de Paleotsunamis se han desarrollado solamente en las tres últimas décadas, al comienzo con unas pocas investigaciones aisladas. Pero a raíz de la ocurrencia del tsunami del océano Índico el 26 de diciembre de 2004, los estudios de paleotsunamis se han intensificado a nivel internacional. Uno de los casos más emblemáticos fue el que generó el tsunami que en el año 1700 afectó severamente las costas de Sanriku, Japón, conocidas por sus características batimétricas y topográficas muy sensibles a los efectos de los tsunamis.

El estudio de depósitos de estratos de arena depositados por un tsunami en la costa noroeste de los EE.UU. permitió determinar que en el año 1700,  $\pm$  10 años, se había producido un gran terremoto, estimado en 9.0 Mw, en la zona de subducción de la falla geológica Juan de Fuca, frente a los estados de Oregon y Washington, que había generado el gran tsunami, que llegó hasta el otro lado del Pacífico, a las costas de Sanriku, en Japón. Hasta antes de conocerse los resultados de los estudios en Oregon y Washington, EE.UU., el origen del tsunami que afectó Japón en el año 1700 era desconocido.

### **2.5.1. Herramientas científicas para determinar la fecha de ocurrencia de los paleotsunamis**

Willard Libby, en 1949, presentó los resultados de sus trabajos, que permiten determinar cuándo una planta o animal deja de existir, hasta hace unos 60 mil años, mediante su técnica de datación de radiocarbono. Ello le mereció el reconocimiento del Premio Nobel en Química en 1960.

Su método se basa en que el carbono se encuentra en la naturaleza en varias formas de isótopos, incluyendo el más abundante y estable Carbono  $^{12}\text{C}$  y el isótopo inestable y escaso  $^{14}\text{C}$ . A través de la fotosíntesis, las plantas absorben carbono del bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que existe en la atmósfera. Cuando la planta muere, cesa su función de fotosíntesis y, desde una relación a  $^{12}\text{C}$  a  $^{14}\text{C}$  constante, la relación se vuelve variable debido a que el inestable isótopo  $^{14}\text{C}$  comienza su proceso de deterioro –sin posibilidad de recuperarse– a una velocidad constante en unos cinco mil años.

El isótopo  $^{14}\text{C}$  tiene una media vida relativamente corta, lo que se interpreta que una muestra que contiene  $^{14}\text{C}$  se reduce a la mitad de su contenido inicial en sus 57 mil primeros años.

A partir de esa fecha, el deterioro se vuelve irregular y la pérdida de la otra mitad remanente puede durar hasta unos 60 mil años. Casi todos los organismos vivos, plantas y animales, constantemente intercambian partículas del núcleo del átomo del isótopo  $^{14}\text{C}$  con el medio ambiente en que viven. Este intercambio cesa cuando el ser viviente muere.

Las investigaciones de paleotsunamis son multidisciplinarias y no es una investigación fácil de desarrollar e incluye ingeniería sísmica, sismología, geología, paleontología, geomorfología, oceanografía, sedimentología, geoquímica, ingeniería de costas y ciencias sociales.

Los resultados de investigaciones realizadas en los últimos 25 años, han permitido identificar registros de tsunamis que van miles de años al pasado. Por ejemplo, en las costas de la isla Hokkaido, Japón, investigadores de la Universidad de Hokkaido (2003) han determinado que han ocurrido grandes tsunamis que han inundado varios km tierra adentro, aproximadamente cada 500 años, en eventos ocurridos desde hace 2000 a 7000 años. De igual manera, Keslay et al. (2005), identificó estratos de arena transportada por 12 paleotsunamis, ocurridos desde hace más de 4600 años.

Pero los estratos de arena depositados por la invasión a tierra por mareas oceánicas, causadas por tormentas tropicales o invernales pueden causar confusión e inducir a errores por lo que es necesario distinguir aquellos depositados por tsunamis generados por sismos, de aquellos depósitos ocasionados por tormentas oceánicas.

Estudios comparativos de depósitos revelan algunas diferencias, mediante las cuales es posible distinguir el tipo de evento geológico, para identificar qué tipo de fenómeno depositó los estratos de arena que se investiga.

## **2.5.2. Investigaciones de Paleotsunamis después del Tsunami del océano Índico de 2004**

Al disponerse de la poderosa herramienta de datación de muestras orgánicas de seres vivos cuando dejan de existir, que causa el tsunami al erradicarlos de su hábitat marino y arrastrarlos tierra adentro, permite ampliar la información histórica en la medición del tiempo de unos pocos siglos. Mediante la geología de tsunamis se amplía este cálculo a miles de años, y es una forma adecuada de medir el tiempo, en la escala de la geología de tsunamis, en cuyo campo, estos fenómenos naturales son ya eventos frecuentes, y permite un proceso racional para estimar el período de retorno de tsunamis de diferentes magnitudes.

El Servicio de Geología de los EE.UU. (USGS) dio asistencia a científicos de Tailandia, Indonesia, Sri Lanka e India para identificar, de manera efectiva, la evidencia de la ocurrencia de tsunamis que han afectado las costas de los países con frente al océano Índico, durante miles de años.

Los estudios de paleotsunamis han logrado importantes descubrimientos, que están permitiendo mejorar sustancialmente la determinación del riesgo de tsunami. Por ejemplo, los equipos de científicos tailandeses, indios y norteamericanos han identificado la clara evidencia de ocurrencia de tsunamis antes del evento del 26 de diciembre de 2004, tal como se muestra en la F-2.14, donde se pueden apreciar los estratos depositados por 4 tsunamis, el último dejado por el tsunami del 26 de diciembre de 2004. Este es un caso de fácil interpretación, pero no sucede lo mismo en la mayoría de casos que requieren estudios detallados para su correcta interpretación.

El intercalamiento de 4 estratos de arena y de tierra que fueron cubriendo los estratos de arena dejados por tsunamis anteriores, se parece a un pastel de leche (blanco) y chocolate (tierra marrón oscuro).

El jalón que se muestra tiene marcas rojas y blancas de 10 cm de longitud, de tal manera que el segmento mostrado encima del nivel de agua es de unos 80 cm, y los 8 estratos de arena y tierra, tienen unos 10 cm de espesor en promedio.



**F-2.14.** La Dra. Kruawaun Jankaew, geóloga de la Universidad Chufanfon de Tailandia muestra una excavación, que identificó en una playa de Tailandia, donde se observa claramente el último estrato depositado por el tsunami del océano Índico del 26 de diciembre de 2004. El proyecto de investigación fue auspiciado por el Programa de los EE.UU. del Sistema de Alarma Contra Tsunamis del océano Índico (US, IOTW, sigla en inglés). Fuente U.S. IOTWS Program Final Progress Report. 1 August 2005 – 31 March, USA AID/Asia.

Se recuerda que uno de los grandes tsunamis registrados en la historia fue causado por la explosiva erupción del volcán Krakatoa en el año 1883, cuyas olas llegaron hasta las costas del Reino Unido, donde fue registrado en los mareógrafos.

El período de retorno de tsunamis en la región de la isla de Java, Indonesia, fue estimado estudiando trozos de coral depositados en el área de inundación, para estimar la potencia del tsunami de 1883.

Evidencias de campo de los estudios del Programa US IOTWS han dado resultados de utilidad práctica proporcionando la historia, geología y peligros de los tsunamis en el océano Índico, lo que permitirá tomar tanto medidas estructurales como no estructurales, para proteger a la población y a las construcciones que se ubiquen en zonas inundables por tsunamis alrededor y dentro del océano Índico.

### **2.5.3. Sismo y Tsunami de Tohoku, Japón del 11 de Marzo de 2011**

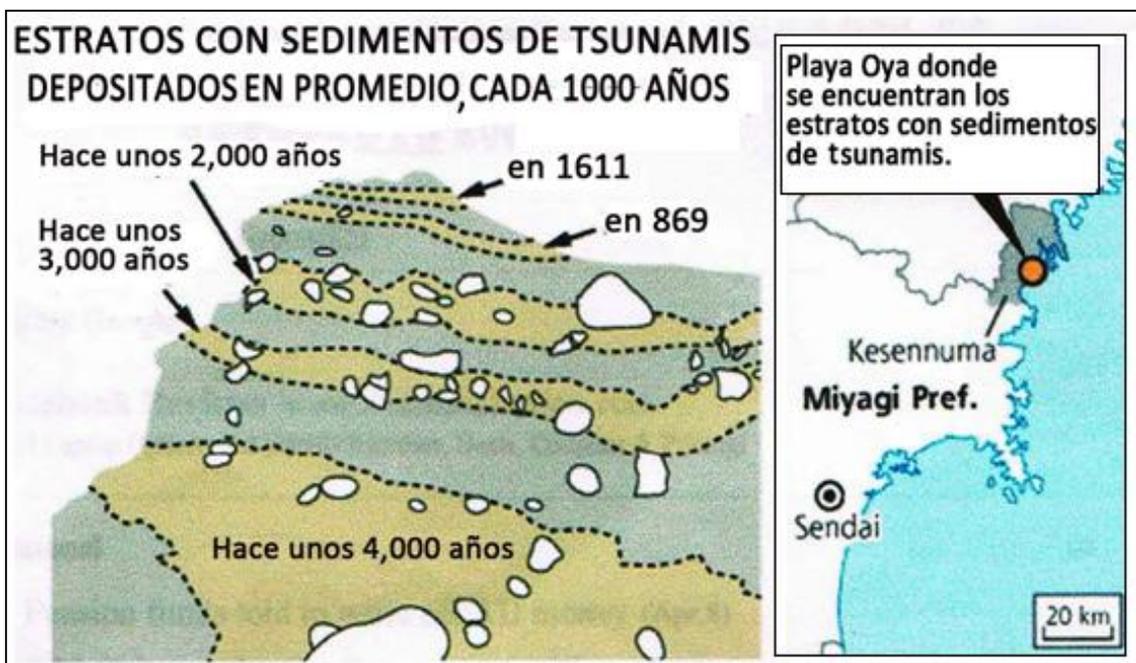
La estimación del período de retorno de tsunamis en el Japón mediante investigaciones de paleotsunamis también ha experimentado en este país un gran impulso después de la ocurrencia de los tsunamis del océano Índico de 2004 y de Tohoku de 2011. Uno de los resultados de los estudios efectuados en Japón coincide con los objetivos de esta consultoría -que es determinar la altura de ola de tsunamis en la costa (*run up*) en El Callao- fue el

descubrimiento e investigación de estratos depositados por tsunamis en un lugar elevado, donde sólo llegaron los depósitos transportados por los grandes tsunamis. En los últimos 6 mil años ocurrieron unos pocos eventos con dichas características.

Los estudios de Paleotsunami (tsunamis antiguos) han identificado que en un acantilado de la playa de la localidad de Kesennuma, prefectura de Iwate, en la costa de la región Sanriku, Japón, se han producido grandes tsunamis similares en magnitud a los tsunamis del año 869 y de 2011, aproximadamente cada 1,000 años en promedio, en los últimos 6 mil años, tal como se muestra en la F-2.15.

Se está asumiendo que las características sismotectónicas de Sanriku, Japón, y las costas de Perú y Chile tienen similitudes en sus zonas de subducción, donde las placas convergen una con la otra, prácticamente a la misma velocidad, 7-9 cm/año.

Ante la carencia de datos históricos en Sudamérica, suficientes para determinar la ocurrencia de tsunamis que se produjeron hace miles de años, que sí se conocen en Sanriku, Japón, por ahora no hay otro camino que asumir las similitudes que existen y que dan buena correlación en los resultados obtenidos con los 3 métodos utilizados que se reportan en este informe, que se están empleando para determinar la altura de un tsunami en tierra (*run up*) en El Callao, para eventos con 1000 años de período de retorno.



**F-2.15.** Sedimentos depositados por grandes tsunamis en un acantilado en Kesennuma, en la costa de Sanriku, prefectura de Iwate, Japón, aproximadamente cada 1,000 años. Fuente: Daily Yomiuri on line.

El descubrimiento que se muestra en la Figura **F-2.15**, fue efectuado por un equipo de expertos liderados por el Dr. Kazumi Hirakawa, distinguido profesor

de la Universidad de Hokkaido y especialista en geomorfología. Hirakawa en su informe sugirió que la región de Sanriku ha sido afectada aproximadamente cada 1000 años por terremotos con una magnitud Mw 9.0, similares al terremoto y tsunami de Tohoku de 2011.

#### **2.5.4. Desarrollo histórico de investigación sobre tsunamis**

A nivel internacional, los estudios sobre tsunamis se iniciaron después que el gran tsunami generado en las costas de Chile en 1960 (9.5 Mw) cruzara todo el océano Pacífico y causara numerosas víctimas en las islas de Hawái y en Sanriku, Japón.

Las islas hawaianas están ubicadas casi en el centro del océano Pacífico, con sus 360° amenazados por tsunamis generados en todo el borde del Cinturón Sísmico del Pacífico. Estas islas emergieron del fondo oceánico por sucesivos derrames de magma (lava), y tienen una batimetría muy profunda cerca de sus costas, de tal manera que, en sus cercanías, el tsunami disipa poca energía por fricción en el fondo oceánico. La mayor proporción de energía que se consume ocurre a profundidades menores a 100 m. Similarmente, el tsunami de 1960 causó severos daños y numerosas víctimas en las costas de Sanriku, Japón, una de las regiones más susceptibles a tsunamis en el mundo.

El 22 de mayo de 1960 ocurrió el gran terremoto y tsunami de Valdivia, Chile (9.5 Mw). Este es el sismo de mayor magnitud a nivel mundial ocurrido desde inicios del siglo XX, cuando se comenzaron a utilizar los registros de estaciones sísmicas para estimar la energía liberada por los sismos, relacionada con la magnitud del evento. El terremoto causó severos daños en las ciudades de Valdivia y Temuco. La región macrosísmica abarcó más de 800 km a lo largo de la costa chilena. El área macrosísmica abarcó unos 400 000 km<sup>2</sup>. El tsunami generado por el gran sismo de Chile de 1960 alcanzó en las costas chilenas una altura hasta de 25 m. El tsunami se expandió por todo el océano Pacífico, causando daños y muerte en Hawái, Japón, islas Filipinas, Nueva Zelanda y Australia.

El tsunami de Chile de 1960 causó la muerte de 61 personas en Ilo, Hawái, con olas hasta de 10 m y en la región de Sanriku, Japón, 22 horas después del sismo, perecieron 142 personas.

Después del sismo y tsunami de Chile de 1960, se creó el Centro de Alerta contra Tsunamis (PTWC, sigla en inglés) que se localiza en Honolulu, Hawaii. En las últimas cinco décadas ha logrado importantes avances. En la actualidad, al ocurrir un terremoto en el océano Pacífico, en corto tiempo (unos pocos minutos) se determina la magnitud del sismo, las coordenadas del epicentro y la profundidad del foco, a partir de los datos reportados por las estaciones sísmicas de la red mundial. Luego se determina si el sismo es lo suficientemente fuerte como para generar un tsunami. Si lo es, se realiza la vigilancia de su avance por el océano Pacífico a través de la red mareográfica y se compara con el respectivo modelado numérico previamente procesado.

Si el tsunami es potencialmente destructivo, inmediatamente se lanza la señal de alarma a todos los países localizados en la cuenca del Pacífico. En el caso del Perú, esta información la recibe el Centro Nacional de Alerta de Tsunamis (CNAT) de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN), en funcionamiento las 24 horas al día.

Después de procesar esta información, el CNAT envía la información procesada con los parámetros del tsunami (tiempo de arribo y máxima altura de ola) al Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), que se encarga de difundir la alerta o alarma a la población, a lo largo de la costa peruana.

## **CAPÍTULO 3**

### **PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES DE CONCRETO ARMADO RESISTENTES A SISMOS Y TSUNAMIS. LINEAMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS TSUNAMIRRESISTENTES.**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En el Perú se comenzó a estudiar el tema de los tsunamis de manera sistematizada desde 1980, cuando UNDR0 en la actualidad OCHA, proporcionó un fondo semilla para estudiar, mediante una tesis de Ingeniería Civil en la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC/UNÍ), los efectos que tendría un tsunami destructivo, entre el Callao y Pucusana, a cargo de Delgado A y C. García (1992). Gracias al apoyo de las Naciones Unidas y JICA principalmente, se pudo participar en numerosos seminarios Internacionales sobre tsunamis. Las numerosas investigaciones sobre tsunamis fueron realizadas mediante tesis de ingeniería civil y de maestría en la FIC/UNI de Lima, en el sur del Perú. También en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, para investigar los efectos de tsunamis en la costa de la región Lambayeque.

A raíz del Gran Terremoto y Tsunami del océano Índico de 2004 y del Gran Terremoto y Tsunami del Este del Japón, o Tohoku, de 2011, se consideró que era de interés intensificar las investigaciones sobre tsunamis, teniendo en cuenta la extensión de la costa peruana con más de 2500 km de longitud entre Tumbes y Tacna, donde existen numerosas ciudades y puertos con alta densidad demográfica ubicados en sectores inundables por tsunamis, como El Callao y Trujillo; y otros de menor población, que igualmente deben ser protegidos de los efectos destructivos de los desastres de origen natural y antrópico. En el caso de puertos comerciales, la existencia de grandes tanques de combustibles y otros materiales igualmente peligrosos, además de numerosos contenedores, fácilmente transportados por el tsunami tierra adentro convirtiéndose en enormes y destructivos proyectiles flotantes, hacen de los puertos lugares de alto riesgo para sus residentes, si las operaciones portuarias no son separadas estratégicamente de las zonas residenciales. Además, con el rápido crecimiento poblacional y la migración de la población alto andina, las ciudades de la costa están creciendo rápidamente y, como consecuencia de ello, las áreas bajas inundables por tsunami están siendo ocupadas urbanísticamente, cuyo uso es necesario proteger, mediante una planificación territorial racional e inteligente.

Se han identificado y estudiado una docena de tsunamis que han ocurrido globalmente, y en el Perú entre los siglos XVI y XXI, por interés directo con el desarrollo de la Guía Práctica, focalizada en el diseño de edificaciones de concreto armado y viviendas de albañilería, que son las construcciones que predominan a lo largo de la costa del Perú, entre Tacna y Tumbes, así como en la socavación que sufren las cimentaciones de edificaciones e infraestructura y los daños estructurales que han sufrido edificaciones de concreto armado por las acciones dinámicas de los tsunamis ocurridos.

Se inicia la lista con el tsunami generado en la zona de subducción de Cascadia al noroeste (NW) de los EE.UU., donde la placa de Juan de Fuca subduce bajo la placa Norteamericana. Un terremoto de magnitud entre 8.7 y 9.2 Mw generó un gran tsunami que inundó severamente las costas de los estados de Washington y Oregón, cuyas universidades, entidades públicas y privadas, investigan activamente cómo reducir los efectos del impacto de tsunamis sobre edificios e infraestructuras, incluyendo el diseño y construcción de edificios altos, refugios en caso de tsunamis, e investigan activamente los paleotsunamis. Por ejemplo, una misión de dichas universidades estudió el sismo tsunami del Santa (norte de Chimbote) de 1996. Ellos invitaron a investigadores del IGP y la UNI. El equipo estudió los efectos de dicho tsunami. El Dr. Harry Yeh, profesor e investigador de Ingeniería de Costas y experto en erosión ocasionada por tsunamis, visitó el Perú en 2013 y dictó una conferencia de su especialidad, en un evento técnico científico organizado por el MVCS del Perú.

Entre los eventos naturales adversos ocurridos en el Perú se incluye el terremoto de 1746, que destruyó Lima y cuyo tsunami arrasó al Callao, causando la muerte de cerca de 4 mil habitantes que tenía para entonces.

Los terremotos y tsunamis de Lima de 1966 y 1974 fueron investigados mediante una tesis profesional de Ingeniería Civil en la UNI. Dicha investigación aportó valiosas enseñanzas sobre los tiempos de arribo de las olas de tsunami, tiempo de llegada de la primera ola, curva de refracción, altura de ola en el Callao y otros lugares al sur de Lima, influencia de la marea en la altura de la ola de los tsunamis, que se deduce de los mareogramas registrados en la estación mareográfica de la Punta, a cargo de la DHN de la Marina de Guerra del Perú.

El tsunami del sur de Camaná de 2001 inundó una zona donde existían numerosas viviendas de albañilería y da luces sobre el comportamiento de este tipo de construcción al ser atacada por las olas de un tsunami, incluyendo la socavación de las cimentaciones, potenciadas por la pendiente a favor cuando las aguas regresan hacia el mar. Los posibles efectos del terremoto y tsunami de Pisco de 2007 fueron investigados en 2001-2002, 6 años antes que ocurriera dicho evento, determinándose la altura de ola y los límites de inundación, dentro del marco del Programa Ciudades Sostenibles INDECI/PNUD 1998 – 2015, al desarrollarse el mapa de peligros multiamenaza de Ica, Pisco, Chincha y otras ciudades de la Región Ica. En cuanto a estudios previos sobre tsunamis, estos fueron efectuados entre Tambo de Mora, en la provincia de Chincha y Lagunillas, en la provincia de Pisco, y las medidas de altura de ola en tierra fueron efectuadas principalmente por la DHN de la Marina de Guerra del Perú, y algunos otros lugares por investigadores del IGP y la FIC/UNI; las alturas de ola en tierra coincidieron bastante bien con la altura de los estudios efectuados 6 años antes del evento. Entre los tsunamis que ocurrieron globalmente y se incluyeron en esta investigación se tiene:

- El Gran Terremoto y Tsunami de Valdivia, Chile, de 1960, por ser el terremoto de mayor magnitud ocurrido hasta la fecha desde el inicio del siglo XX, cuando se comenzaron a utilizar registros sismográficos para

estimar la magnitud de los sismos. El tsunami generado se propagó por todo el océano Pacífico y causó más de 100 víctimas mortales en Hawái, Sanriku, Japón e islas Filipinas. Ello dio origen a la creación del Sistema de Alerta contra Tsunamis del Pacífico con sede en Honolulu, Hawai, e interconectado vía satélite directamente con las entidades que dan la alarma contra tsunamis en los países ubicados en la cuenca del Pacífico, miembros de dicha organización.

- El tsunami de Papúa, Nueva Guinea, de 1998, es un caso interesante pues, con una magnitud de sólo 7 Mw (límite inferior de los sismos que generan tsunamis), produjo, sin embargo, olas de 10 m de altura, que arrasaron varias aldeas de una estrecha franja terrestre que separa el océano de la Laguna Sisamo, causando la muerte de más de 2 mil personas. Hasta ahora existe polémica sobre la posibilidad de que el tsunami haya sido generado por enormes deslizamientos submarinos. El autor ha encontrado una explicación simple y práctica debido a que aguas oceánicas profundas se ubican muy cerca de la costa, como en el caso del norte de Sanriku, Japón, en los tsunamis de 1896, 1933 y 2011, que produjeron tsunamis de hasta 40 m. de altura.
- El terremoto y tsunami del océano Índico de 2004 y el tsunami de las islas Kuriles frente a la península de Kamchatka, Rusia aportan valiosos datos sobre socavación del suelo en tierra firme, información necesaria para proteger edificios e infraestructura de la socavación que causan los tsunamis. También destruyó prácticamente todas las viviendas de madera por la altura de ola de más de 2,0 m.
- El terremoto y tsunami de Maule, Chile, de 2010 indica que la licuación de suelos fue la gran responsable de severos daños en edificaciones importantes, incluyendo las viviendas de madera.
- El terremoto y tsunami de Tohoku, Japón, de 2011, es de mayor interés para el desarrollo de la Guía Práctica del SENCICO por las siguientes razones:
  - Causó la destrucción total de viviendas de madera, arrancándolas de sus cimientos y arrastrándolas tierra adentro, y sus escombros se convirtieron en peligrosos proyectiles flotantes que causaron numerosas víctimas y severos daños materiales.
  - Dañó edificios de concreto armado y de acero de diversas alturas, volcando edificios de 3 a 5 pisos de altura; sin embargo, un buen número de edificios de acero y de concreto armado de 6 a 8 pisos resistieron bien el impacto del terremoto y tsunami.
  - Causó severos daños en la infraestructura, como carreteras, vías del ferrocarril, puentes, aeropuertos y puertos, entre otros, lo que es de interés para la práctica ingenieril.

De acuerdo con los objetivos de la Guía Práctica, de los tsunamis ocurridos globalmente y de los que han afectado al Perú, se han seleccionado aquellos que han dejado las enseñanzas más valiosas, no solamente por la forma cómo ocurrieron, sino también porque han sido investigados de manera cuidadosa, de acuerdo con los siguientes subtemas:

- Daños causados por terremotos y tsunamis por licuación de suelos, una de las principales causas de las enormes pérdidas

económicas ocurridas en los terremotos de Maule, Chile, de 2010 y Tohoku, Japón, de 2011.

- Socavación de la cimentación de edificaciones e infraestructura urbana causada por tsunamis. Estudio de socavación en países relativamente cercanos al origen del tsunami del océano Índico de 2004. Voluminosas remociones de masas durante los terremotos en las islas Kuriles, en Rusia, de 1997 y 1998.
- Daños causados en edificaciones e infraestructura urbana causadas por los tsunamis del océano Índico de 2004 y Tohoku, Japón, de 2011.

## **3.2. LICUACIÓN DE SUELOS EN LOS SISMOS DE MAULE, CHILE DE 2010 Y TOHOKU, JAPÓN, DE 2011**

### **3.2.1. Introducción**

Los grandes eventos: el Terremoto y Tsunami de Maule, Chile, de 2010; y el Terremoto y Tsunami de Tohoku-Oki, Japón, de 2011, mostraron que el fenómeno de licuación de suelos fue el gran responsable de los severos daños y cuantiosas pérdidas económicas que causaron esos dos megasismos en edificaciones e infraestructuras.

El terremoto de Maule, Chile, afectó la región centro sur de ese país, y los daños por licuación de suelos en el evento de 2010 fueron severos, pues es una región lluviosa y con suelo húmedo, muy diferente que su desértica región norte, donde se ubica el desierto de Atacama, el más seco del mundo.

En Japón, durante el terremoto de 2011, los daños por licuación de suelos ocurrieron en toda el área macrosísmica. Las zonas inundadas por el tsunami que generó el sismo fueron muy extensas, sus efectos se superpusieron a los efectos erosivos de las olas del tsunami, y fue muy difícil distinguir los efectos de licuación de suelos. Sin embargo, es de interés e importancia para el Perú, lo que ocurrió a más de 300 km del epicentro del sismo, en el área metropolitana de Tokio, donde se ubica la ciudad de Chiba, a 40 km al este de Tokio, que incluye tramos costeros sobre la bahía de Tokio, y márgenes de ríos que desembocan en el océano Pacífico. Allí no hubo inundación de tsunami, de tal manera que la licuación de suelos se investigó sin interferencias de otros fenómenos.

En el caso de Perú, el área macrosísmica del sismo de Arequipa 2001 abarcó los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Esta zona es muy seca, pues es la prolongación del desierto de Atacama, una de las regiones más áridas de la Tierra. Ocurrió licuación de suelos en muy pocos lugares, sólo donde hubo existencia de agua en el suelo, lo que enfatiza la importancia de su presencia, para que la licuación de suelos ocurra.

Para el sismo de la Región Ica de 2007, se desarrollaron los mapas de peligro múltiple para las ciudades más importantes de esa Región, los que fueron realizados en 2001-02 dentro del marco del Programa Ciudades Sostenibles (PCS) INDECI/PNUD 1998-2015. Ello permitió visualizar anticipadamente

donde se presentaría licuación de suelos, de acuerdo con la granulometría del suelo, su grado de compactación y el nivel freático. En Tambo de Mora, tal como se previó 6 años antes que suceda el sismo de 2007, ocurrió licuación generalizada, y provocó su destrucción casi total. En Pisco Playa, la licuación de suelos sólo fue parcial, pero debido a que también la intensidad sísmica fue alta allí, causó daños importantes en viviendas de albañilería sin refuerzo adecuado.

Como antecedentes importantes se tienen que, en el año 1964, ocurrieron los terremotos de Alaska, EE.UU., y Niigata, Japón, donde los daños por licuación de suelos fueron catastróficos. Ello atrajo la atención de investigadores de suelos e ingenieros dedicados a la práctica profesional. Desde entonces investigadores norteamericanos y japoneses comenzaron a estudiar intensa y sistemáticamente dicho fenómeno, para reducir los daños que causan y, desde entonces, se irían logrando importantes avances.

Uno de los resultados más notables de esos esfuerzos, fue la monografía MNO-9 publicada en 1983, desarrollada por el Instituto de Investigaciones de Ingeniería Sísmica (EERI, sigla en inglés) con sede en Oakland, California. El trabajo titulado *Movimientos Sísmicos y Licuación de Suelos*, por H. Bolton Seed e I. M. Idriss, (1983), marcó un hito en la difusión sobre licuación de suelos en forma integrada. Es una publicación a la que recurrieron muchos estudiosos del tema, durante las décadas de 1980 y 1990.

Dentro de la segunda serie de monografías publicadas por el EERI destaca la MNO-12, publicada en 2008, que tuvo como autores a I.M. Idriss y R.W. Boulanger, quienes actualizaron el trabajo anterior e incluyeron los avances logrados sobre licuación de suelos durante los 25 años que separan a estas dos publicaciones. Es una publicación vigente de 242 páginas que los interesados en el tema no deben dejar de estudiar, para tener una visión global moderna sobre licuación de suelos.

Aunque el tema sobre licuación de suelos recibió notoriedad después de los terremotos de Alaska y Niigata, ambos ocurridos en 1964, marcando el inicio de las investigaciones sistemáticas, su gran importancia ha sido revelada nuevamente por los severos daños que causaron, recientemente, los terremotos de Chile de 2010 y Japón de 2011.

La licuación de suelos siempre ha ocurrido durante los grandes terremotos, pero no fue reconocida como tal. Basta con revisar las fotografías de los efectos del Gran Terremoto de Valdivia, Chile, del año 1960. Es el evento de mayor magnitud (9.5 Mw) registrado instrumentalmente, a nivel global, desde inicios del siglo XX.

Existen numerosos estudios sobre licuación de suelos producidos en Chile y Japón en 2010 y 2011, respectivamente; sin embargo, después de efectuar una revisión de la extensa bibliografía disponible de los resultados de las investigaciones realizadas, se decidió recurrir, como referencias, principalmente a dos interesantes trabajos para tratar de sintetizar lo que ocurrió en cuanto al fenómeno de licuación de suelos en los terremotos de

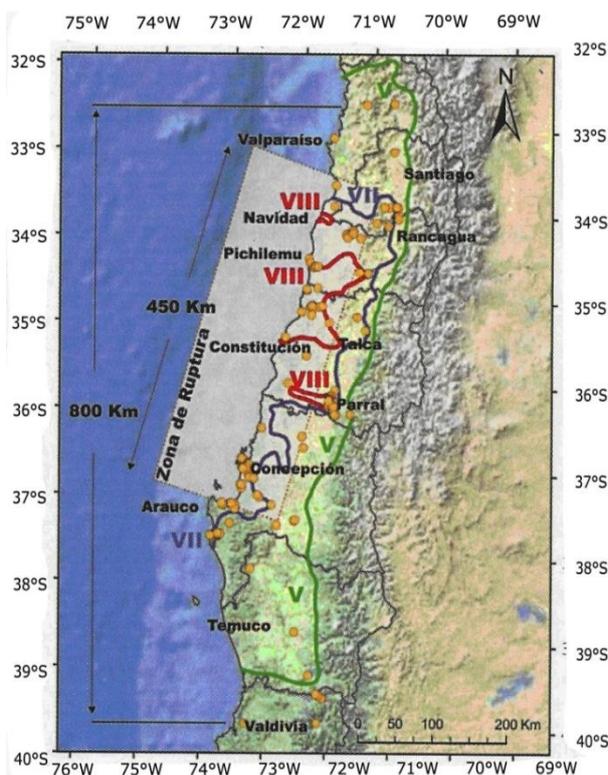
Maule y Tohoku. Estas investigaciones fueron realizadas por profesores de las Universidades de Chile y de Chiba, respectivamente.

### 3.2.2. Licuación de suelos. Terremoto de Chile de 2010

La principal referencia para esta parte es el trabajo titulado *Características y Efectos del Fenómeno de Licuación*, por Ramón Verdugo (2011), profesor adjunto e investigador del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

El trabajo de R. Verdugo es el Capítulo 4 del informe de la Universidad de Chile titulado *Terremoto de  $M_w = 8.8$ , Terremoto de Chile, 27 de febrero de 2010*, de 324 p., publicado por el Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias, Física y Matemáticas de la Universidad de Chile. El libro fue donado al autor por el Dr. Mauricio Sarrazín, profesor e investigador en la Universidad de Chile, lo que se agradece.

La zona de ruptura de la falla abarcó 450 km de longitud, paralela a la costa chilena. En la F-3.01 se muestra las intensidades sísmicas ocurridas en la escala MSK, europea, muy similar a la escala de intensidades Mercalli Modificada (MM+), usada en casi todos los países de las Américas. También ocurrió licuación hasta la ciudad de Valdivia, ubicada a más de 300 km al sur de la zona de ruptura. En la F-3.02 se muestra la ubicación de las minas donde ocurrieron daños por licuación en relaves localizados a más de 100 km al norte de la zona de ruptura, de tal manera que la licuación de suelos ocurrió en una extensión de aproximadamente el doble de la longitud de la zona de ruptura.



**F-3.01.** Zona de ruptura e intensidades sísmicas. Por el sur ocurrió licuación de

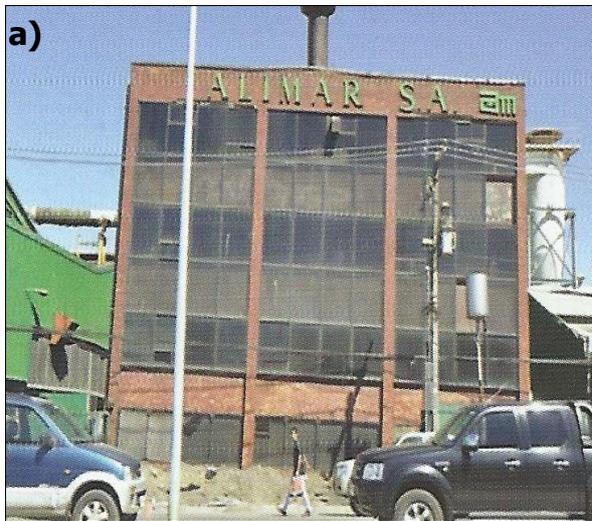


**F-3.02.** Por el norte ocurrieron daños en depósitos de relaves ubicados a más de 100

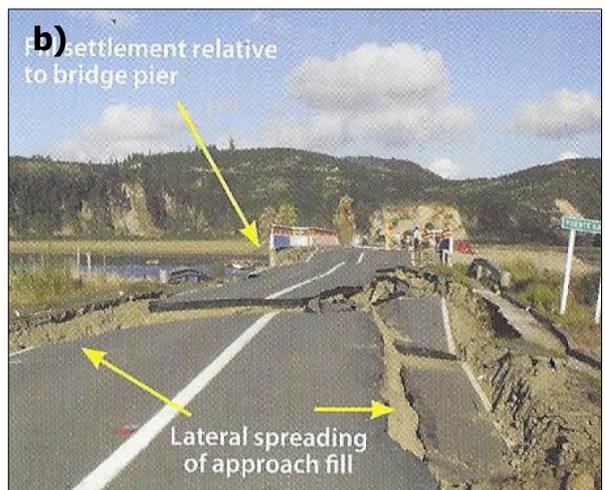
suelos hasta Valdivia, ubicada a más de 300 km al sur de la zona de ruptura. (Verdugo, 2011).

km del borde de la ruptura. (Verdugo, 2011).

De las dos figuras anteriores se deduce que la longitud de la falla fue de 450 km, pero ocurrieron licuaciones de suelos a lo largo de más de 800 km. Tal como se muestra en la F-3.03 a y b, la licuación de suelos causó asentamientos diferenciales en edificaciones, lo que ocasionó la inclinación de estas. Este es un problema que ocurre cuando la cimentación no se apoya sobre pilotes, cuya sustentación segura debe ubicarse debajo del estrato licuable. Al igual que en el Japón, en el Perú y en Chile ha sido muy común la ocurrencia de licuación de suelos a la orilla de ríos, con desplazamiento lateral hacia el curso de agua, como muestra la F-3.04a. Así como también rellenos de carreteras que se aproximan perpendicularmente al río en sus bordes F-3.04b.



F-3.03 a y b. Inclinación de edificios por asentamiento diferencial, causado por licuación de suelos.



F-3.04 a y b. Licuación de suelos al borde de ríos y desplazamiento lateral hacia el curso del agua.



a) Destrucción de uno de los puentes por licuación de suelos.



b) El terremoto de Chile de 2010 ocurrió a las 3:00 a.m. A esa hora había tráfico intenso en la zona urbana.

**F-3.05.** Daños en puentes en Chile, por licuación de suelos en 2010.

Las cajas de desagüe y tanques de combustibles cuando no están llenas, en su conjunto volumétrico resultan menos densas que el agua, por lo que, al ocurrir licuación, flotan, tal como se muestra en la F-3.06 a y b.



**F-3.06 a y b.** Flotación de cajas de desagüe y tanque de combustible por licuación de suelos.

**3.2.3. Licuación de suelos en El Gran Terremoto del Este de Japón (GTEJ) o Tohoku del 11 de marzo de 2011**

El GTEJ, 9.0 Mw, fue un evento extremo, con período de retorno de 1,000 años. Abarcó un área macrosísmica muy extensa y severa de más de 500 km de longitud, afectando principalmente las áreas costeras del noreste de la isla Honshu, la principal del archipiélago japonés, en cuyo centro sureste se ubica su capital, Tokio. F-3.07. En la F-3.08 se observa una estrecha calle en el sector de Mihama de la ciudad de Chiba, donde hubo gran volumen de eyección de arena.



**F-3.07.** Ubicación de la zona investigada. Nótese que se trata del área metropolitana de Tokio y que el sector Mihana de Chiba es un tramo de la orilla de la bahía de Tokio. Nakai y Sakiguchi (2012).



**F-3.08.** En las calles hubo gran cantidad de eyección de arena, llegando en algunos lugares a formarse estratos hasta de 0.45 m de altura. Nakai y Sakiguchi (2012).

No solamente las sacudidas sísmicas fueron muy violentas en una extensa área, que fue mayor a la que afectó el tsunami, también superó en violencia el área de inundación de los tsunamis de 1896 que dejó unas 25 mil víctimas, y el tsunami de 1933, que causó 3 mil muertos. Las investigaciones sobre tsunamis de los eventos de 1896 y 1933 estaban basadas principalmente en el último evento, aplicando la ciencia y tecnología de tsunamis para reducir sustancialmente pérdidas humanas y materiales existentes hasta antes que suceda el Gran Terremoto de Tohoku-Oki de 2011. Los últimos estudios están permitiendo avances muy notables que están cambiando de manera importante la aplicación de la ciencia y tecnología en la práctica ingenieril sobre tsunamis. Es necesario que los especialistas que se dedican al tema se actualicen; este trabajo trata de contribuir en ese sentido.

En el año 869 d.C. el terremoto de Johan-Sanriku tuvo la misma violencia (magnitud) que el evento de Tohoku de 2011, y el tsunami que generó, inundó prácticamente la misma área geográfica que cubrió dicho evento; por ejemplo, la planicie donde se asienta la ciudad de Sendai, capital de la prefectura de Miyagui, con más de un millón de habitantes. Allí es donde se localiza la Universidad de Tohoku, la cual por décadas ha sido y es el centro académico y de investigación por excelencia sobre tsunamis, y el que más trabajos ha producido sobre la ciencia y tecnología de tsunamis.

En las costas del noreste de Honshu, se produjo licuación de suelos en extensas zonas, ero las señales de su ocurrencia fueron alteradas por el poder erosivo del tsunami, desprendiendo y transportando masas de suelo, destruyendo de este modo las evidencias de las ocurrencias de licuación de suelos.

Por ello, para la captación de las lecciones sobre licuación de suelos del terremoto y tsunami de Tohoku-Oki, se presentan las que ocurrieron en el área Metropolitana de Tokio, ubicada a más de 300 km del foco del terremoto, sector que no fue afectado por el tsunami y que no tuvo interferencias, como la

erosión de suelos por el oleaje; lo que habría borrado las evidencias de la licuación de suelos.

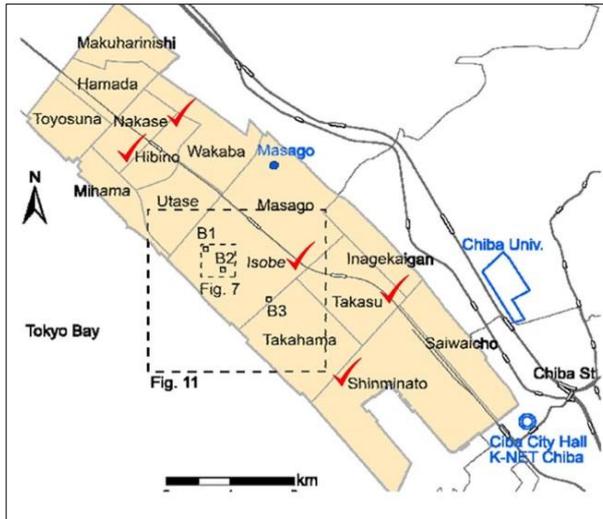
El trabajo de Shoichi Nakai y Toru Sekiguchi (2012) *Daños debidos a licuación durante el Terremoto de Tohoku de 2011*, llena los requisitos planteados. A continuación, se incluye un resumen de dicho trabajo, que es de interés ingenieril, pues las investigaciones fueron realizadas de manera intensa durante 10 días, inmediatamente después de ocurrido el terremoto con las evidencias de licuación de suelo intactas, con las arenas y limos aún muy húmedos y presencia de charcos de agua, condiciones que el autor también observó en Tambo de Mora durante la inspección que realizó 3 días después del terremoto de la Región Ica del 15 de agosto de 2007.

Nakai y Sakiguchi seleccionaron para sus investigaciones sobre licuación de suelos los daños ocurridos en el área metropolitana de Tokio, en el borde noreste de la bahía de Tokio y en el valle del río Tone, que corre de oeste a este y desemboca en el océano Pacífico. Las investigaciones fueron muy extensas y detalladas y se focalizaron en el sector de Mihama de la ciudad de Chiba, ubicado a unos 50 km al este de Tokio.

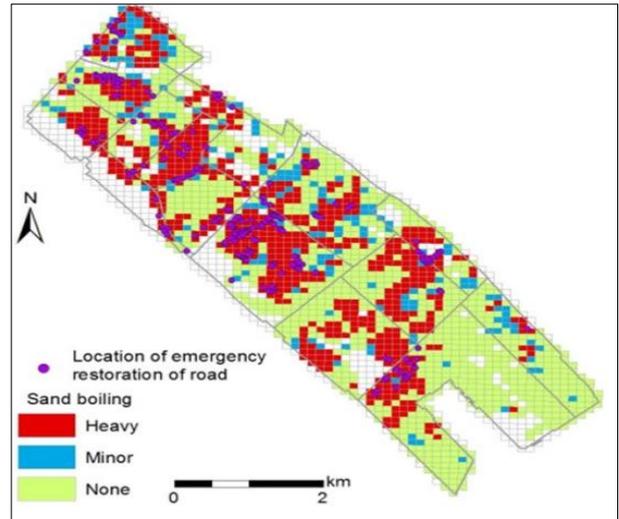
¿Por qué Mihama? Porque es un sector de la ciudad de Chiba cuyo suelo fue formado íntegramente con relleno marino del fondo de la bahía de Tokio, consistente principalmente en arena fina, limo y arcilla, que puede calificarse geológicamente de muy reciente, efectuado en la década de los 60 hasta mediados de los 80, por lo que el proceso de consolidación del suelo, es todavía incipiente.

A continuación se incluye un resumen de los resultados de los estudios de los profesores Nakai y Sakiguchi, con comentarios del autor, que trata de vincularlos con su aplicación práctica en el Perú, en franjas costeras bajas donde suele existir humedad, para su ocupación urbana planificada y segura.

La F-3.09a muestra el sector Mihama de la ciudad de Chiba, que es un tramo del borde noreste de la bahía de Tokio. En los distritos de Nakase, Hibina, Isobe, Takasu y en el extremo noroeste Shinminato, que en japonés significa “puerto nuevo”, ocurrió lo que los autores califican de licuación densa (*heavy*), donde la expulsión del suelo alcanzó más de 1,0 m de altura, que está marcada con un *check* en los distritos donde ocurrió el fenómeno. En la F-3.09b se ven las cuadrículas de 100 m x 100 m, de color rojo en los lugares donde ocurrió licuación de suelo severa, las cuadrículas de color azul señalan las expulsiones de las licuaciones que fueron menores a 1,0 m de espesor y las de color verde a aquellos sitios donde no ocurrió licuación de suelos.



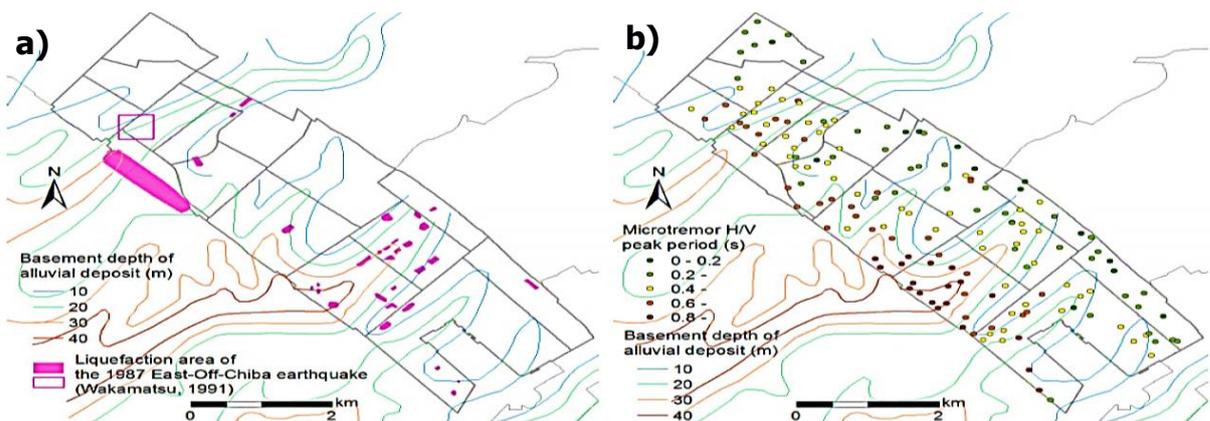
a) Mapa del sector de Mihama de la ciudad de Chiba y su división distrital. Ref. Nakai y Sakiguchi (2012).



b) Distribución de áreas de licuación de suelos. Ref. Nakai y Sakiguchi (2012).

**F-3.09 a y b.** El sector Mihama de la ciudad de Chiba: límites distritales y lugares de licuación de suelos. Distribución de los distritos marcados con un *check*, donde ocurrieron los mayores volúmenes de emisión de arena fina y limo. Nótese la ubicación de los pozos de exploración B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub>, en el cuadrado pequeño citado en la F-3.10.

Las **F-3.10 a y b**, muestran respectivamente los contornos de la profundidad de los depósitos aluviales. Comparando la ubicación de los estratos de mayor espesor, lo que se produjo en Nakase y Mihama y también en Isobe y Takase y en el NW de Shinminato, se puede deducir que, en general, sobre los estratos aluviales de mayor espesor fue donde ocurrieron las más severas licuaciones de suelo, lo que se trató de estimar con las medidas de microtrepidaciones F-3.10b, que dan mayores espesores del estrato aluvial cerca al borde marino y menor espesor tierra dentro.



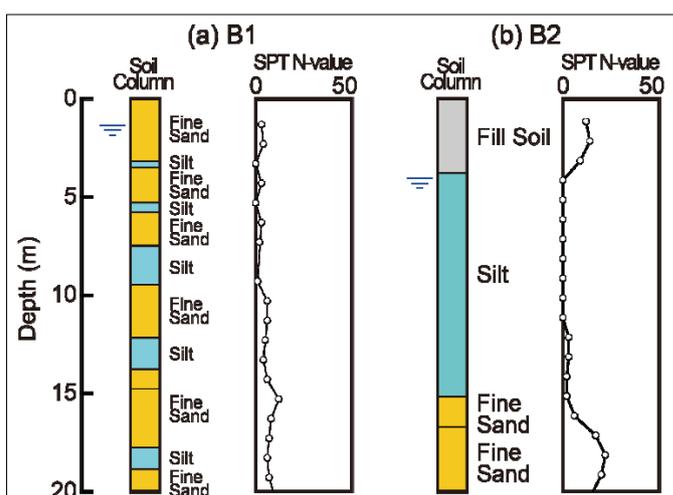
**F-3.10 a y b.** Las marcas rojas indican dónde históricamente ha ocurrido licuación de suelos. La barra roja dónde ocurrieron las mayores licuaciones de suelos durante el terremoto del este de Chiba de 1987. En los períodos predominantes del estrato superficial del suelo y mediante mediciones de microtrepidaciones. Nótese que los puntos rojos indican períodos predominantes del suelo mayores a 0,6 s, y el sector noreste, a unos 1,2-2,0 km de la orilla del mar, con puntos azules y verdes, períodos entre 0,1 y 0,45 s, indicando que el espesor del suelo aluvial es menor.

En la F-3.10a se marca con puntos rojos los lugares donde ocurrió licuación de suelos en terremotos pasados, lo que en general muestra buena correlación con los espesores de los estratos aluviales en los distritos de Isobe, Takahama y Takasu, donde se concentraron los lugares de mayor ocurrencia de licuación de suelos en terremotos pasados, y donde se espera volverían a ocurrir nuevamente licuaciones en el futuro. En el terremoto de 2011, la licuación de suelos en Chiba fue mucho mayor y más severa que en sismos anteriores. La barra roja indica dónde ocurrieron importantes licuaciones en el Terremoto del Este de Chiba de 1987.

### Resultado de Medidas de Microtrepidaciones, Perfiles de Suelos y Licuación de Suelos

Los resultados de las mediciones de microtrepidaciones en estratos de suelos rellenados en Mihama no muestran buena correlación con los perfiles de suelos y la ocurrencia de licuación de suelos, tal como se muestra en la F-3.11, con lo cual se presentan los perfiles de suelo B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub> con períodos de vibración medidos mediante microtrepidaciones, que dan valores similares. La ubicación de los puntos de exploración B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub> se muestra en el recuadro más pequeño de la F-3.09a.

Nótese que el perfil B<sub>1</sub> de la F-3.11 está compuesto por estratos de arena fina y limo hasta 20 m de profundidad, con la napa freática muy cerca de la superficie y con el valor N de la *Prueba de Penetración Estándar* (SPT), bastante menor que 10 hasta unos 10 m de profundidad. Mientras que en el perfil de suelos B<sub>2</sub>, los 4,0 primeros metros son rellenos artificiales con SPT mayores que 10 y debajo subyace un estrato de limo que va de los 4,0 m hasta los 15,0 m de profundidad, con valores N aún menores con respecto al estrato anterior.

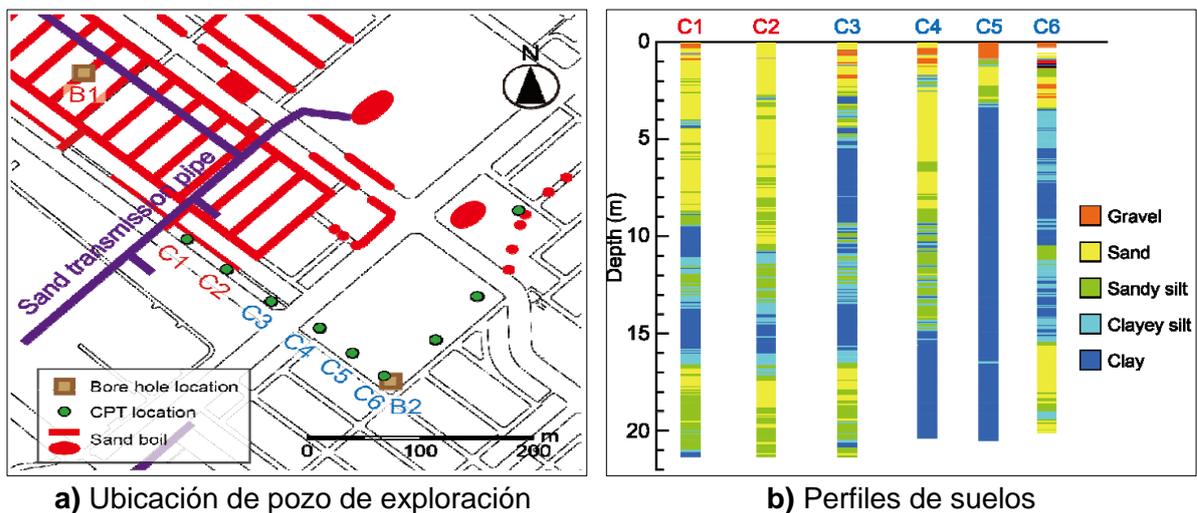


**F-3.11.** Perfiles de suelo B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub>, con períodos de vibraciones similares en la superficie. En B<sub>1</sub> hubo severa licuación de suelos, pero no en B<sub>2</sub>.

En B<sub>1</sub> ocurrió licuación de suelo severa, pero no en B<sub>2</sub>, aunque los períodos naturales de vibración eran similares. Se puede deducir entonces que lo dominante es la característica del suelo licuable, área fina y limo –que es ampliamente aceptado como suelo licuable–. En el perfil B<sub>2</sub> se tiene un potente estrato sólo de limo, que amplifica de manera importante las ondas sísmicas, pero, en general, en suelos de este tipo raramente ocurren licuaciones. En el

relleno de los últimos 4,0 m de superficie, con suelo grueso que se asume bien compactado, tampoco ocurrió licuación de suelos.

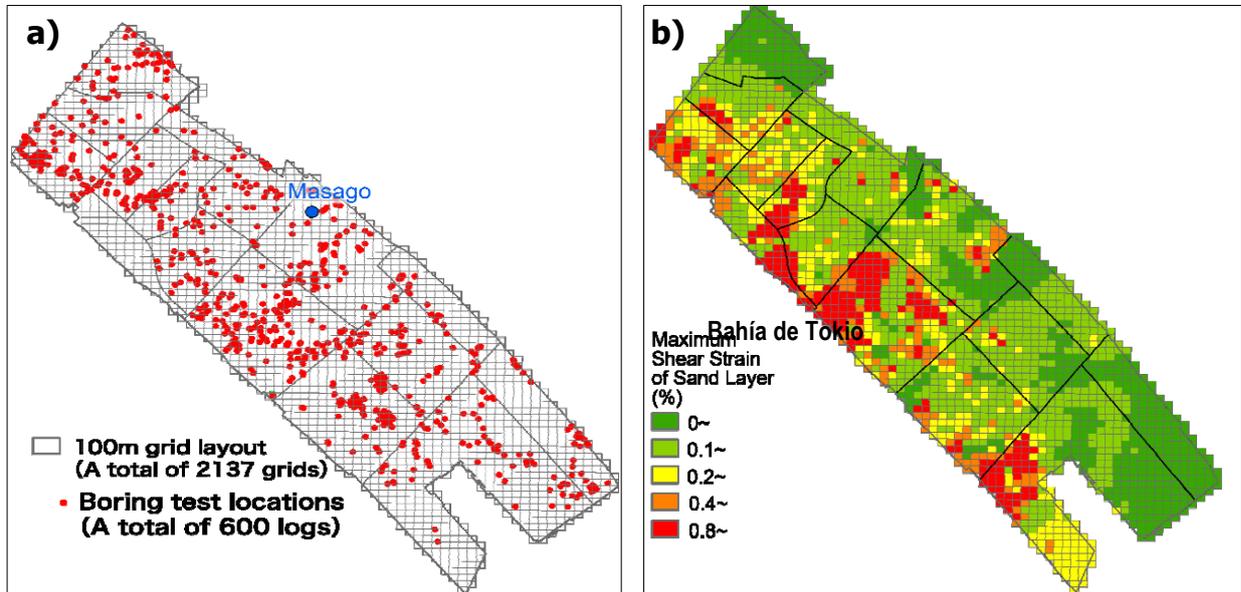
En la **F-3.12a**, se observan los lugares donde ocurrieron licuaciones severas de suelos. Obsérvese en la parte superior izquierda que en las calles angostas ocurrieron severas licuaciones de suelos que han cubierto casi enteramente las superficies de dichas calles. Las calles se ordenan en forma de paralela y con las calles perpendiculares forman una especie de parrilla. Nótese la ubicación de los puntos de exploración utilizando la *Prueba de Penetración de Cono* (CPT, sigla en inglés) desde C<sub>1</sub> hasta C<sub>6</sub>. La ubicación del pozo de exploración B<sub>1</sub> está en medio de la zona donde hubo gran licuación de suelos (Nótese su ubicación dentro de la cuadrilla), mientras B<sub>2</sub> se ubica cerca al punto C<sub>6</sub>. Nótese que en C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> hasta unos 10 m de profundidad predominan suelos arenosos y estratos de limo arenoso, donde ocurrió licuación de suelos, mientras que en los perfiles C<sub>3</sub>, C<sub>5</sub> y C<sub>6</sub>, donde no ocurrieron licuaciones de suelos predominan estratos de suelos de limo y arcilla. Estos resultados no hacen sino corroborar que el suelo arenoso fino con contenido de limo, es muy susceptible a la licuación de suelos.



**F-3.12a** y **b**. Ubicación de perfiles de los pozos de exploración C<sub>1</sub> al C<sub>6</sub>. Nótese la ubicación de los pozos B<sub>1</sub> y B<sub>2</sub> mencionados anteriormente, sus entornos y las características del suelo.

En la F-3.12a se nota la ubicación de la tubería utilizada para el bombeo de suelos desde el fondo oceánico. La granulometría del suelo depositado dependió de la distancia de la salida del tubo. Como el depósito de suelos no resultó uniforme a pesar que todo el suelo del sector de Mihama fue reclamado, cerca de la salida de la tubería se acumuló arena con poco limo, mientras que lejos de las tuberías de descarga se depositó arena limosa, con alto contenido de arcilla y limo. Los autores consideran que dicha forma de distribución del suelo reclamado, explica por qué ocurrieron respuestas tan diferentes frente al sismo de 2011, en lo que respecta a licuación de suelos, que fue muy aleatoria y errática, puesto que cerca de donde ocurrieron severas licuaciones de suelos existen áreas donde no ocurrió este fenómeno.

La F-3.13a muestra que el área investigada fue dividida en cuadrantes de 100 m x 100 m, resultando 2137 unidades, y 600 pozos explorativos. En la F-3.13b se muestra los valores de las deformaciones unitarias en los estratos arenosos. Nótese que en los valores altos mayores a 0.80 fue donde ocurrieron mayores licuaciones, cerca del borde de la bahía de Tokio.



**F-3.13a y b.** El área investigada fue dividida en cuadrantes de 100 m x 100 m resultando 2137 unidades, donde se efectuaron 600 pozos explorados. En b) Se muestran las máximas deformaciones unitarias por corte en estratos de arena. Nótese que los valores altos se ubican cerca de la línea costera y fueron los lugares donde ocurrió licuación de suelos con mayor severidad.

Las principales conclusiones del estudio pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

1. La distribución de daños por licuación de suelos en el sector de Mihama de la ciudad de Chiba resultó extremadamente desordenada, debido a la diferencia de la granulometría del suelo, bombeado desde el fondo de la bahía de Tokio: como era de esperarse, las mayores licuaciones ocurrieron cerca de la boca de salida de la tubería de impulsión, donde se depositó arena fina y limo. A mayor distancia de la salida del tubo de impulsión hubo arcilla y limo, menos susceptibles a la licuación.
2. El tipo de suelo cerca de la superficie y las características de amplificaciones de las ondas sísmicas, son los factores más importantes en la ocurrencia de daños por licuación de suelos.
3. La gran variabilidad de los perfiles de suelos en lugares cercanos entre sí, puede ser la causa y el resultado del proceso de rellenado de Mihama utilizando sedimentos del fondo de la bahía de Tokio, como acaba de explicarse en el punto 1.

### **3.2.4. Licuación de Suelos durante los Sismos en el Perú, de Arequipa de 2001 e Ica de 2007**

Bajo los auspicios del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, oficina de Lima (UNDP/Perú), el autor investigó inmediatamente después de ocurridos y durante 6 meses los efectos del terremoto de Arequipa de 2001 y, durante 12 meses, los daños causados por el terremoto de la Región Ica de 2007. Los estudios estuvieron focalizados en la influencia de la geología superficial en la intensidad sísmica, los daños que ocasionaron en edificaciones e infraestructuras; estas y la distribución geográfica de daños, que son de especial interés para la comprensión de la ocurrencia de licuación de suelos en regiones áridas, como en el sur del Perú y en la región Ica, que son diferentes a lo observado en Chile 2010 y Japón 2011, que son lugares muy húmedos por la gran intensidad de las lluvias en esas regiones, mientras la costa peruana es muy árida y eso marca una diferencia importante en la ocurrencia del fenómeno de licuación de suelos.

#### **Licuación de Suelos en el Sismo de Arequipa de 2001**

La región macrosísmica del terremoto de 2001 comprendió los departamentos, actualmente regiones, de Arequipa, Moquegua y Tacna, una macroregión muy seca, pues no es sino la prolongación del desierto de Atacama, una de las zonas más desérticas del mundo. Por ello, la presencia de agua en el suelo se da en muy pocos lugares, precisamente allí donde ocurrieron licuaciones de suelos. Ello pone en evidencia la importancia de la presencia del agua para que suceda éste fenómeno.

Hacia el oeste de la ciudad de Arequipa, un cerro represa el agua subterránea del río Chili, lo que eleva el nivel de la napa freática hasta cerca de la superficie del suelo, donde el suelo es en general de arena fina y limo. La F-3.14 muestra una vivienda construida en dicha zona, cuyo suelo en la parte posterior de la casa se ha hundido y se observa una grieta en él. Ello ocurrió en el sector de Lara, distrito de Socabaya, Arequipa, por licuación de suelos, que provocó asentamientos del suelo. En un extenso terreno que un urbanizador había rellenado con una capa superficial de 1.20 m de espesor, depositado sobre suelo arenoso y limo muy húmedo, se rajó en varios lugares y se expulsó agua, arena fina y limo, poniendo en evidencia que dicho terreno no es utilizable para fines urbanos. Si dicho terreno continuara siendo utilizado con fines urbanos, según la experiencia relatada en este informe, volverá a ocurrir licuación en futuros terremotos en dicho lugar.



**F-3.14.** Hundimiento de suelo y grieta en suelo causado por licuación de suelo, por tener suelo granular fino y la napa freática a muy poca profundidad.



**F-3.15.** Licuación de suelos y desplazamiento lateral del suelo en la aproximación sur al puente Camiara de la Carretera Panamericana Sur.

Por otra parte, en el ingreso sur del relleno de la plataforma de la vía al puente Camiara, de la carretera Panamericana Sur, en el tramo Tacna-Moquegua, ocurrió licuación de suelo y desplazamiento lateral (*lateral spread*) de la plataforma de la carretera. El puente tiene una luz total de 33 m y, cuando ocurrió el sismo del 23 de junio de 2001, el pequeño río estaba seco. Usualmente, en los meses de febrero y marzo de cada año, discurre un pequeño volumen de agua. La humedad remanente del suelo fue suficiente para generar licuación en dicho lugar, en junio de 2001. F-3.15.

En lo que respecta al objetivo principal de los estudios en la región Arequipa, la conclusión es que los mayores daños ocurrieron en los sectores previstos en estudios previos, donde la geología superficial tiene características sísmicas desfavorables. En la ciudad de Arequipa, en su parte baja, en el distrito de Socabaya, ya mencionado anteriormente; en Moquegua en pendientes inestables, como en el barrio de San Francisco, y en Tacna en el Cono Norte, en rellenos recientes, pues allí se realizaron cortes y rellenos para su desarrollo urbano.

### **Licuación de suelos en el terremoto de la Región Ica de 2007**

Los mapas de peligro múltiple desarrollados en los años 2001-02, dentro del marco del Programa Ciudades Sostenibles (PSC) INDECI/PNUD 1998-2015 (*Ver Tabla 3.01.*) indicaban que ocurriría licuación de suelos en la ciudad de Pisco y en Tambo de Mora, como realmente sucedió durante el terremoto de la Región Ica en el año 2007.

**Tabla 3.01**

Ciudades con mapas de peligro múltiple. Nótese que en el Dpto. de Ica se incluyen las ciudades de Pisco, San Andrés y Tambo de Mora, mencionado en este informe.

**PROGRAMA DE CIUDADES SOSTENIBLES 1998 - 2015**

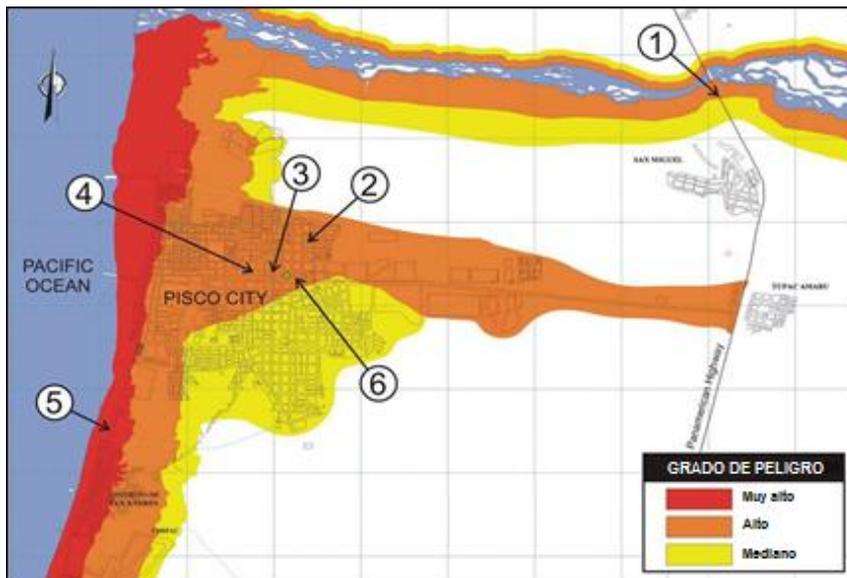


1 TUMBES	Tumbes (88.4*), aguas Verdes (10.3), Zarumilla (22.5), Papayal (5.0).
2 PIURA	Talara (135.0), Sullana (180.0), Paíta (57.4), Sechura (16.7), Chulucanas (55.2), Huancabamba (6.8), Ayabaca (6.0), Castilla (115.0), Catacaos (64.3), Piura (450.4), Suyo (1.5).
3 LAMBAYEQUE	Chiclayo (535.4), San José (7.59), Pimentel (14.2), Santa Rosa (13.0), Monsefú (24.6), Eten (11.9), Puerto Eten (2.5), Reque (9.7), Morrope (4.7), Túcume (6.7), Lambayeque (40.9), Ferrelate (32.3), Olmos (36.6), Písci (4.8).
4 CAJAMARCA	Cajamarca (98.2), Baños del Inca (5.35), Jaén (54.7).
5 LA LIBERTAD	Trujillo (615.0), Pacasmayo (26.1), San Pedro de Lloc (12.2), Guadalupe (20.7), Huanchaco (44.8).
6 ANCASH	Chimbote (313.2), Huarmey (17.1), Carhuaz (7.2), Recuay (3.1), Catac (2.6), Ticapampa (2.5), Huaraz (93.3), Caraz (11.3), Yungay (5.9), Ranrabirca (0.8), San Vicente de Cañete (40.8), Cerro Azul (6.6), San Luis (11.7), Imperial (35.7), Nuevo Imperial (14.5), Lunahuaná (3.8), Ollimansi (12.5), Asia (14.1), Mala (22.8), San Antonio (3.4), Chancay (38.0), Huacho (63.2), Supe Puerto (12.4), Barranca (55.0), Paramonga (30.5), Chosica (145.5), Santa Eulalia (5.5), Ricardo Palma (3.9), Matucana (4.4), Laderas de San Juan de Lurigancho (8.0).
8 ICA	Ica (138.5), San José de los Molinos (2.9), La Tiniebla (30.1), Parcona (29.6), Subtanzilla (16.2), Guadalupe (8.3), Santiago (5.7), Los Anzáes (2.5), San Juan Bautista (0.9), Tate (2.0), Pueblo Nuevo (1.5), Palpa (8.2), Nazca (37.7), Chincha Baja, Tambo de Mora, Chincha Alta, Pueblo Nuevo, Sunampe, Grocio Prado, Alto Larán (143.8), Pisco y San Andrés (64.6).
9 AYACUCHO	Ayacucho (107.4), Huanta (26.1).
10 AREQUIPA	Arequipa (1.073), Cocachaca (6.6), Punta de Bombón (6.3) Dean Valdivia (4.9) Camaná (51.4), Chuapibambá (4.1), Caraveli (3.2), Aulao (3.5), Corle (2.1), Cosos (1.4), La Real (0.5), Huancarequí (1.4), Lara (2.9), Viraco (1.9), Pamascolca (2.7), Machaguay (0.6), Islav Pro Mataraní (3.0) Molendo (25.0), Huanca (1.5), Ihta (0.6), Callali (1.8), Sibayo (0.8).
11 PASCO	Oxapampa (14.2)
12 UCAYALI	Pucallpa (272.6).
13 MOQUEGUA	Omate (1.7), Puzúna (1.5), Moquegua (36.0), Ilo (73.8).
14 TACNA	Locumbá (1.1) Cercado, Pocolay, Gregorio Albarracín, Guad Nueva y Alto Alianza (242.7), Tarata (4.7), Candarave (2.3).
15 CUSCO	Cusco (256.0) Ollantaytambo (2.5), Urubamba (11.4), Calca (10.5), Pisac (2.6), Sicuani (37.1), Anta (16.3), Zúñe (3.7), Lucre (3.9), Urcos (10.1), Limatambo (9.1) Taray (4.3), Santa Teresa (7.0).
16 MADRE DE DIOS	Puerto Maldonado (35.2), Iberia (6.0), Inapari (1.3).
17 APURIMAC	Abancay (43.9)
18 SAN MARTÍN	Moyobamba (37.3), Tarapoto (87.9), Juníni (18.0), Bellavista (8.2), San Hilarión (3.0), Lamas (11.3), Nueva Cajamarca (15.8), Yuracyacu (3.8), Rioja (19.0)
19 AMAZONAS	Chachapoyas (24.5).
20 JUNÍN	Huancayo (323.1), San Ramón (15.4).
21 HUANUCO	Huánuco (149.2), Ambo (8.0)
22 HUANCAYEUGA	Huancavelica (41.3).

**170 ciudades con 7.5 millones de habitantes**

★ Incluye 4 ciudades ecuatorianas de Proyecto Binacional Perú-Ecuador. Financiado por OEA.

En Pisco ocurrió licuación parcial de suelos en Pisco Playa, cerca de los humedales que allí existen. Los daños fueron severos en las viviendas de ladrillos de ese sector, tanto por asentamientos, por licuación parcial de suelos como por las altas intensidades sísmicas. En el mapa de peligro múltiple F-3.16, el grado de amenaza estaba marcado como muy alto (color rojo).



**F-3.16.** Mapa de peligros de Pisco y San Andrés, elaborado en 2001-2002 por el PCS INDECI/PNUD.



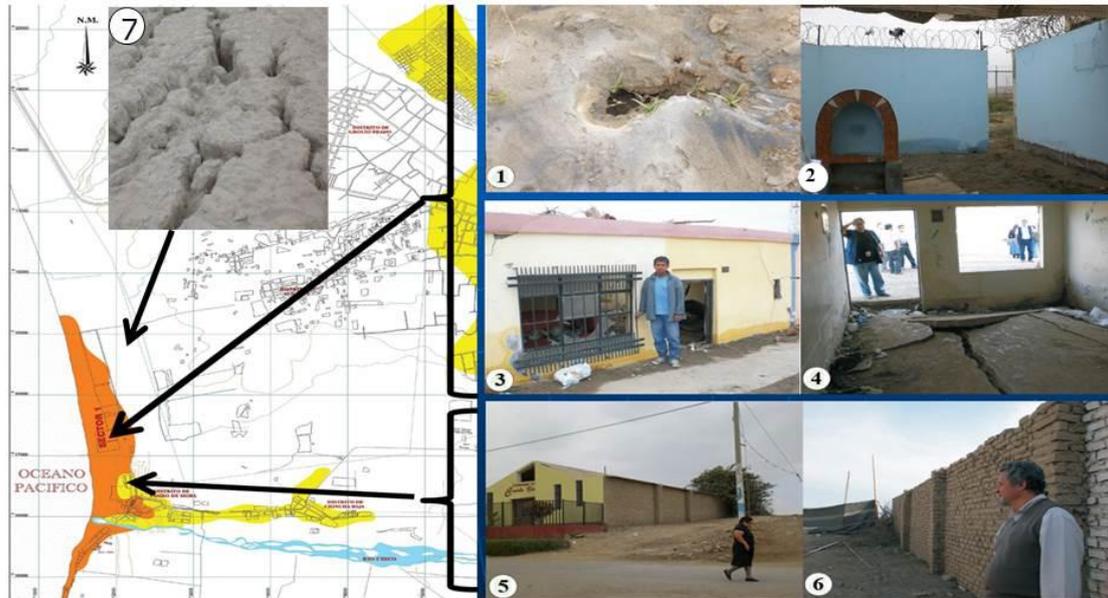
**F-3.17.** Daños en Pisco en el sismo del 15 de agosto de 2007.

**Nota:** en la Figura 5.17 (1), la aproximación sur indica el puente Huamaní que cruza el río Pisco, los daños son similares a los ocurridos en el puente Camira durante el sismo de 2001.

En la ciudad de Pisco y San Andrés, los mayores daños ocurrieron en los sectores con grado de peligro alto y muy alto. Casi todas las viviendas de adobe colapsaron o sufrieron severos daños, así como colapsaron las construcciones de albañilería y edificaciones de concreto armado sin diseño sísmico. Es importante destacar que la Oficina de la Aduana de Pisco, un edificio de concreto armado de 3 pisos ubicado en la Plaza de Armas de la

ciudad, quedó fuera de servicio por un buen tiempo, debido a los graves daños que sufrió en sus elementos no estructurales y en su contenido. Su sistema estructural resistente sufrió daños menores. Se estima que allí la intensidad fue VIII-MMI.

## EFFECTO DE MICROZONA EN TAMBO DE MORA



- 1-Licuación de suelos "Volcán"
- 2-Desplazamiento lateral (lateral spread)
- 3-Hundimiento
- 4-Al hundirse los muros el piso se levantó y rajó

- 5-Iglesia evangélica sin daños
- 6-Muro de adobe construido a unos 12 m al sur de la iglesia sin daños
- 7-Licuación generalizada y grandes grietas en la parte alta de Tambo de Mora.

**F-3.18.** Daños en Tambo de Mora en el sismo del 15 de agosto de 2007.

En el mapa de peligro múltiple para la ciudad de Chincha, desarrollado 6 años antes del terremoto, se incluyó a Tambo de Mora F-3.18. La licuación generalizada de suelos ocurrió en los sectores marcados con peligro muy alto/alto. En F-3.18, donde señalan las flechas y a sólo unos 300 m al este de la plaza de armas un pequeño sector estaba marcado con peligro bajo/muy bajo. Es una explanada lograda al haberse cortado un pequeño cerro. A nivel de cimentación se encuentra suelo seco y compacto.

Una iglesia evangélica de altos muros de adobe de unos 3.80 m de altura, y el cerco de un depósito, con paredes de adobe de 2.80 m, sin otro refuerzo que un ensanchamiento del muro (*machote*) y sin arriostre en sus partes superiores no sufrió daño alguno F-3.18 (5) y F-3.18 (6). Se estima que la intensidad allí fue de V - VI MMI o menor que en la parte baja de Tambo de Mora, en donde la intensidad llegó a IX MMI, la máxima del área macrosísmica. A este fenómeno de intensidad sísmica de grados tan diferentes se le llama efecto de microzona, el cual depende principalmente de las condiciones del sitio: características del suelo, geología y topografía.

### **3.2.5. Conclusiones Generales sobre Licuación de Suelos y Medidas de Reducción de Desastres**

1. Se han estudiado casos de la licuación de suelos ocurridos en la región de Tohoku, Japón al noreste de la isla Honshu, causados por el megasismo de 2011; la ocurrencia de licuación de suelos generados por el sismo de Maule, Chile, de 2010, los efectos de los sismos de Perú, de Arequipa, en 2001 y de Ica, en 2007.
2. Las conclusiones a las que se han llegado son de interés para la práctica de la ingeniería de reducción del desastre focalizada en uno de los efectos más destructivos de los sismos.  
Han ocurrido licuaciones de suelos al noreste de la isla Honshu en Japón y en la región media central de Chile; ambos escenarios muy lluviosos, con sus ríos con agua discurriendo todo el año, por lo que la humedad del suelo es alta.  
Dichas zonas son sensibles a la licuación de suelos y fueron sacudidas por terremotos extremos y el área macrosísmica alcanzó cientos de miles de km<sup>2</sup>.  
En ambos casos, ocurrió licuación de suelos a cientos de kilómetros de los focos de los sismos y en los extremos de la zona de fractura de las placas geológicas que interactúan.
3. En el caso de los sismos del Perú, el de Arequipa de 2001 ocurrió, en contraste con los terremotos de Japón y Chile, en una de las áreas más secas del mundo, pues el área macrosísmica del sismo de 2001 al sureste del Perú, que abarcó los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, está sobre una franja costera que es la continuación del desierto de Atacama, el más árido del mundo.

En el sureste del Perú, en 2001, sólo se detectó la ocurrencia de licuación de suelos en la parte baja de la ciudad de Arequipa, donde el río Chili represa el agua del río y el nivel de la napa de agua casi llega a la superficie del suelo.

El otro lugar donde ocurrió licuación de suelos fue en la aproximación sur de la carretera Panamericana al puente Camiara, con agua que fluye en el lecho en pequeño volumen, solamente en los meses de enero, febrero y marzo. Sin embargo, la humedad remanente debajo del río y en sus alrededores fue suficiente para causar licuación de suelos.

En el caso del terremoto de la Región Ica, un ámbito un poco menos seco que la región suroeste del Perú, ocurrió licuación de suelos en varios lugares. En la aproximación sur al puente Huamaní, que cruza el río Pisco, en Pisco Playa, ocurrió licuación parcial y en Tambo de Mora, por las filtraciones de los humedales, ocurrió licuación generalizada con severas consecuencias.

Al norte de Tambo de Mora ocurrió un desplazamiento masivo de un bloque de unos 300 m de ancho y algo más de 3 km de largo, por licuación de un

estrato inferior que le sirvió como lubricante. Algo parecido sucedió en Alaska en 1964, cuando manzanas enteras de edificios construidos sobre un bloque, se deslizaron hacia el lado no confinado, causando severos daños.

En un suburbio de la ciudad de Chiba, ubicado a unos 40 km al este de Tokio y a más de 300 km del foco del terremoto de Japón de 2011, en el barrio de Mihama, que se desarrolla al borde del mar, se realizaron extensas investigaciones. Las principales lecciones dejadas son: En los lugares que son vulnerables a sacudidas sísmicas donde ocurrió licuación de suelos en sismos anteriores, los efectos fueron más severos debido a que el sismo de 2011 fue de magnitud mucho mayor.

En suelos con estrato de igual espesor, aunque con períodos naturales del suelo de valores similares, el comportamiento frente a vibraciones sísmicas intensas es, en ciertos casos, diferente: aquellos suelos conformados por estratos de arena fina y limo son muy susceptibles a la licuación, pero los suelos limosos y arcillosos no lo son, a pesar de que en ambos casos la napa freática estuvo cerca de la superficie y el valor N de la Prueba de Penetración Estándar (SPT) tuvo valores menores que 10.

### **3.3. PROTECCIÓN DE CIMENTACIÓN DE EDIFICACIONES Y DE INFRAESTRUCTURAS URBANAS CAUSADO POR SOCAVACIÓN DE TSUNAMIS**

#### **3.3.1. Introducción**

La socavación causada por tsunamis en la cimentación de edificaciones e infraestructuras urbanas dañadas severamente durante los tsunamis del océano Índico 2004 y Tohoku-Oki, Japón, de 2011, es de interés para el desarrollo de la Guía Práctica sobre Tsunamis.

La socavación que causan los tsunamis es parte de un problema mucho más amplio y complejo como es la erosión y el transporte de sedimentos que causan los tsunamis en las áreas que inundan, tierra adentro.

Uno de los estudios más significativos para los objetivos de esta investigación es el informe de la socavación causada en extensas áreas, desde sectores relativamente cercanos al origen del tsunami, hasta miles de kilómetros de distancia, pero que también son afectados severamente por la direccionalidad de las olas del tsunami desde su zona de generación. Según exploraciones en el fondo oceánico efectuadas con equipos de sonar por la Marina de Guerra del Reino Unido, el tsunami del océano Índico fue generado por desplazamientos verticales de varias decenas de metros, que ocurrieron en unos pocos minutos, lo que explica el poder destructivo del Gran Tsunami del océano Índico.

El informe de mayor interés para esta consultoría ha sido redactado por un ingeniero estadounidense profesional especialista en el tema y con experiencia, el Sr. Mathew J. Francis. Se trata de un trabajo de investigación auspiciado por *EERI / FEMA NEHRP 2006, Professional Fellowship Report*, de gran interés

práctico, desde la parte introductoria de su trabajo, pues considera el estado actual del tema incluyendo las erosiones causadas en los cursos de ríos, así como en los deltas de desembocaduras de ríos causados por tormentas tropicales.

También el Manual del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. proporciona información sobre cómo se produce la socavación alrededor de elementos estructurales, como las columnas de muelles apoyados sobre pilotes y otros tipos de estructuras.

El estudio de paleotsunamis permite investigar tsunamis que ocurrieron hasta hace unos 57 mil años, mediante la aplicación de la datación de radiación de Carbono 14. En ese sentido, se pudo determinar que antes del siglo XX en el océano Índico ocurrieron tsunamis destructivos, *“que fueron olvidados”* por los países que rodean el océano Índico o las islas dentro de dicho océano. Ese descuido, por decir lo menos -pues los países del océano Índico carecían de un sistema de alerta contra tsunamis-, esa omisión y la falta de conocimientos elementales sobre estos fenómenos naturales adversos, causó la muerte de 230 mil víctimas en 14 países.

Es necesario comprender en su complejidad la erosión y transporte de sedimentos causada por el flujo y reflujo de las olas del tsunami que invaden tierra. La visión integral de la zona inundable ha demostrado que el problema es mucho más complejo que lo que pareciera ser. Los estudios de paleotsunamis pueden proporcionar una visión clara de cómo ocurrieron las erosiones y deposiciones en toda el área inundable. Se han realizado estudios de las erosiones en Papúa, Nueva Guinea, causadas por el tsunami de 1997, que formó una laguna de gran tamaño, debido a importantes hundimientos cosísmicos ocurridos durante terremotos pasados. Llama la atención de los investigadores internacionales que un sismo de magnitud 7.0 Mw produjo una máxima altura de inundación (*run up*) de 10 m causando por lo menos 2 mil víctimas mortales. En Papúa, Nueva Guinea, la erosión y exposición de arena fue de unos pocos centímetros, pero ha permitido ampliar la comprensión sobre estudios de paleotsunamis.

Otro evento de interés para esta consultoría es lo que ocurrió en las islas Kuriles, frente a las islas Kamchatka, en Rusia. El tema fue estudiado por científicos norteamericanos y rusos. La erosión fue causada por los tsunamis del 7 de noviembre de 2007, y en los inicios de 2008. El transporte de sedimentos hacia el mar fue varias veces mayor que el material depositado en Tierra. Esto fue posible determinar debido a las investigaciones previas de tipo ambiental que se estaban realizando en las islas Kuriles, lo que permitió precisar con cierto detalle el antes, durante y después de la ocurrencia de los tsunamis. La detallada investigación que se efectuó después de que ocurrió el tsunami, se realizó hasta en dos oportunidades.

Son de suma importancia las lecciones aprendidas sobre las erosiones causadas por dichos tsunamis y la difusión del aspecto ingenieril sobre la erosión que causan los tsunamis cuando invaden tierra firme.

### 3.3.2. Socavación de la Cimentación de Edificaciones Causadas por el Tsunami del océano Índico de 2004

#### Antecedentes

El Gran Tsunami del océano Índico (GTOI), que dejó unas 230 mil víctimas en 14 países ubicados en sus bordes o en islas dentro del mismo, impulsó las investigaciones de dos importantes temas:

- Los estudios de paleotsunamis.
- La socavación causada por tsunamis en la cimentación de edificaciones e infraestructura urbana, incluyendo puentes, carreteras y tuberías de agua y alcantarillado

Tal como menciona la Agencia Federal para la Atención de Emergencias de los EE.UU. (FEMA, sigla en inglés), que, para entonces, era la única institución que daba alguna orientación para determinar la socavación que causan los tsunamis, aclaró que los métodos para determinar la socavación en la cimentación de construcciones estaba todavía en su infancia.

A fines del año 2004, cuando ocurrió el Gran Tsunami del océano Índico, los métodos para diferentes tipos de socavaciones estaban bien determinados:

- **Socavación en ríos.** Es un tema de amplia aplicación en la práctica ingenieril y existen software muy usado, como Hydraulic Engineering Circular (HEC), que permite el análisis de un amplio número de problemas, explicados adecuadamente en los manuales HEC.
- **Socavación causada por mareas.** Los efectos de la socavación causada por mareas es evaluada por los métodos incluidos en el software HEC 25, (FHWA, 2004) y utiliza además otras versiones del HEC. En la aplicación de HEC 25 se proporciona métodos en cursos de agua no estrechadas, como estuarios y bahías, y cursos de agua confinados como ríos. Para el caso de cursos de agua no confinados se puede aplicar el software HEC 18, usando la velocidad del flujo modificada con base en la superficie del área; las características de la marea son: la amplitud y el rango de la marea, es decir, la diferencia entre la marea máxima y mínima.
- **Socavación del fondo marino.** Modificando la función del fondo marino desarrollado en los años 1950 por Einstein para el flujo horizontal de ríos. Este aporte fue adaptado a los movimientos de las olas, asumiendo una longitud de onda relativamente grande y pequeña amplitud con una turbulencia de la acción de la onda, considerando el efecto de frontera que produce fluctuaciones verticales y horizontales de las fuerzas de flotación en sedimentos de muy poca profundidad (Chien, 1999; Degroot et al 2006).

## Las Investigaciones de Mathew J. Francis

Una de las investigaciones de mayor interés para los objetivos de la Guía Práctica es el trabajo del Ing. Mathew J. Francis (profesional estadounidense), titulado: *“Tsunami Inundation Scour of Roadways, Bridges and Foundations Observations and Technical Guidance from the Great Sumatra Andaman Tsunami”*, que contó con la asesoría de un conocido maestro, el Prof. Harry Yeh, profesor e investigador de Geología de Costas, de la Universidad de Oregón, quien visitó el Perú en 2012, y dictó una conferencia en su especialidad, que incluyó socavaciones causadas por tsunamis.

El estudio e investigación de la erosión causada por tsunamis, que es una amenaza natural con múltiples facetas, es de gran complejidad. Para ilustrar el estudio actual de la socavación hidráulica, el autor hace una distinción básica entre los bien establecidos métodos de socavación, tales como los que ocurren en los ríos y las mareas, y los métodos de evaluación de socavación por tsunamis, como está establecido en el Manual para la Construcción de Edificaciones Costeras de FEMA y en el Método de Socavación Incrementada por Licuación de Suelos de Yeh y Tonkin.

El autor reconoce las limitaciones para evaluación de licuación de suelos causadas por tsunamis tierra adentro y en los fondos oceánicos, por la diferencia de presión entre las crestas y depresiones de las alturas de las olas del tsunami que se acercan a la costa, y en los primeros tramos de tierra que invade el tsunami.

### Área Geográfica Investigada

El área que investigó Francis sobre socavación causada por el tsunami del océano Índico del 26 de diciembre de 2004, que tuvo una magnitud 9.2 Mw, se muestra en la F-3.19.



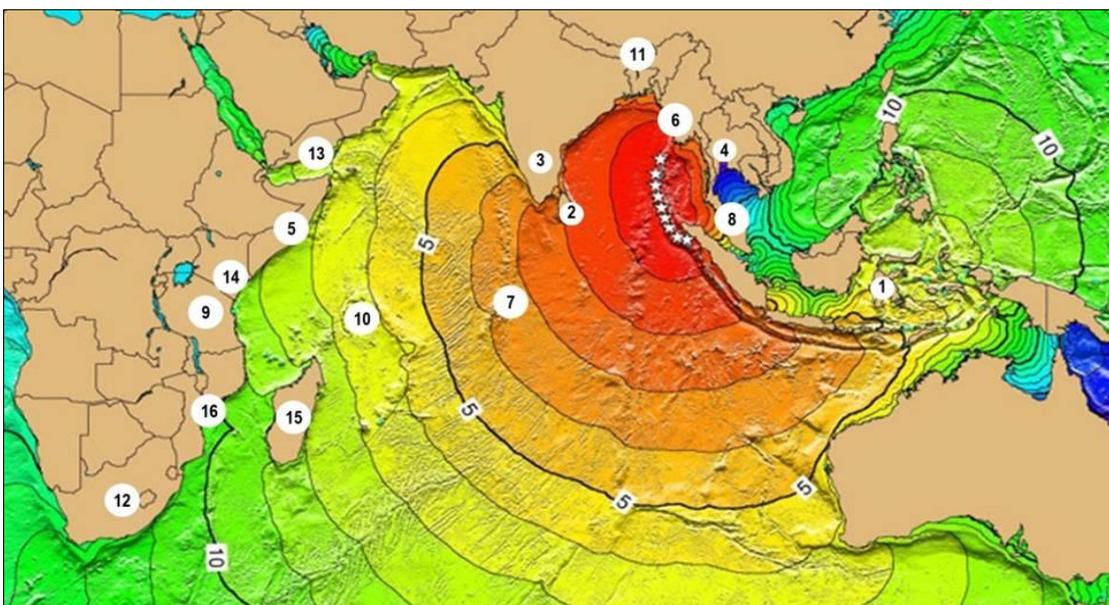
F-3.19. Lugares que fueron fotografiados para evaluar la socavación de tsunamis.

Se observa en dicho gráfico que las áreas investigadas fueron:

- El norte de la isla Sumatra, en cuyo lado noreste, en el océano Índico, se generó el tsunami.
- En las islas Andamán, al norte de Sumatra, bajo la jurisdicción de la India, hasta cuyas cercanías se propagó la falla geológica que generó el gran tsunami.
- La costa oeste de Tailandia, donde afectó sobre todo sus balnearios reconocidos internacionalmente.
- Las islas Maldivas.
- La isla Sri Lanka, ubicada a miles de kilómetros del origen del tsunami, pero que fue afectada severamente por la direccionalidad del tsunami desde su origen.
- La costa este del subcontinente hindú.

En los dos últimos lugares, los daños fueron severos por la gran energía que transportaban las olas del tsunami, pues las grandes olas que salieron del noroeste de Sumatra y de las islas Andamán, se dirigieron directamente hacia el este de la isla Sri Lanka y la costa sureste de la India; fueron directamente afectadas por el tsunami, y ocurrieron muchas bajas humanas, severos daños materiales e importantes socavaciones en las cimentaciones de las construcciones.

Para poder comprender cómo el tsunami avanzó en el océano Índico, en la figura F-3.21 se muestran las curvas de refracción del tsunami, graficadas cada hora, lo que demuestra que hubo tiempo suficiente para evacuar a quienes estaban en las playas bajas próximas a ser inundadas por el tsunami, pero las víctimas no tenían conocimientos elementales sobre estos adversos fenómenos marinos y perdieron la vida. Tampoco existía un sistema de alerta contra tsunamis en el océano Índico, que tardíamente fue implantado después del año 2004.



**F-3.21.** Origen del gran tsunami generado en el océano Índico al noreste de la isla Sumatra, Indonesia, curvas de avance del tsunami, y tiempo de llegada de las olas a

los 14 países donde causó víctimas. Al norte de Sumatra e islas Andamán las olas llegaron en unos 30 minutos. A Sri Lanka en 2 h.; al oeste de la India en algo más de 2 h.; a Tailandia en 4 h. y a las islas Seychelles en 3 h. Al lugar más remoto, Somalia en 13 h, tiempo suficiente para salvar muchas vidas.

En la Tabla 3.02 se incluye el número de víctimas en los 14 países que tuvieron víctimas mortales.

**Tabla 3.02.**

PAÍSES	Nº DE VÍCTIMAS	( TIEMPO )	PAÍSES	Nº DE VÍCTIMAS	(TIEMPO)
1 Indonesia	167,799	(20-30 min)	9 Tanzania	13	(9h)
2 Sri Lanka <sup>I</sup>	35,322	(2h)	10 Seychiles	3	(6h)
3 India <sup>II</sup>	18,045	(20m-2h)	11 Bangladesh	2	(2h)
4 Tailandia	8,212	(2h)	12 África Sur	2	(11h)
5 Somalia	289	(8h)	13 Yemen	2	(7h)
6 Birmania	500	(1h)	14 Kenia	1	(81/2h)
7 Maldivas	76	(6h)	15 Madagascar <sup>III</sup>	S/D	(III)
8 Malasia	76	(4h)	16 Mozambique <sup>eIV</sup>	—	
			<b>Total</b>	<b>230,000</b>	

Tiempo de llegada de la primera ola, obtenida del gráfico por el autor de la Guía Práctica.

**Notas:**

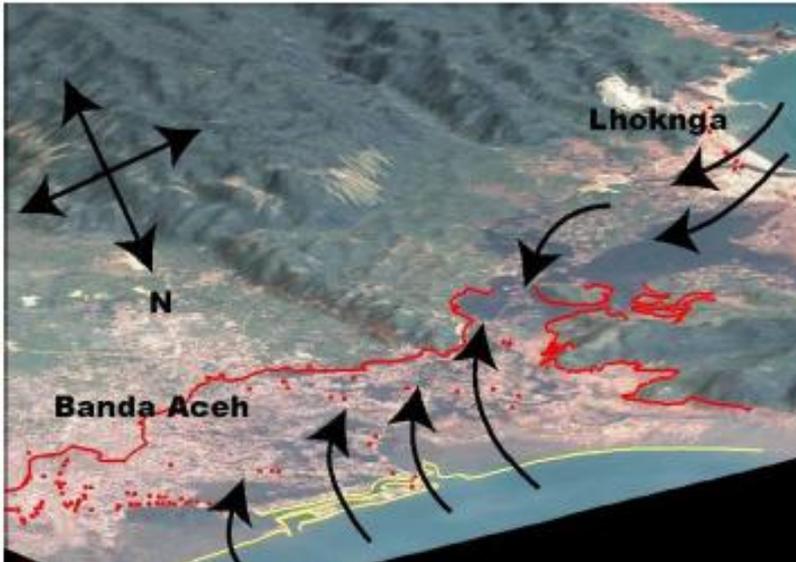
- I. La isla de Sri Lanka fue violentamente inundada en el lado este, que se ubica justo al frente de la zona de generación del tsunami. La inundación continuó dando la "vuelta" hasta su extremo suroeste.
- II. A las islas Andamán, ubicadas al norte de Sumatra, el tsunami llegó en 20 minutos. Al continente hindú en algo más de 2 horas.
- III. Madagascar, en 15 horas (sin datos), probablemente sin víctimas.
- IV. Mozambique (16 h.). Sin víctimas. Se cree que la isla Madagascar con su eje mayor casi paralelo a la dirección de ataque del tsunami de más de 1000 km de longitud, protegió a dicho país del tsunami.

**Comparación de Socavación entre Banda Aceh y Lhokanga, en el norte de Sumatra, Indonesia**

El trabajo de M.J. Francis incluye un interesante estudio comparativo de los efectos del tsunami de 2004 sobre las ciudades de Banda Aceh, capital de la isla Sumatra, que tiene una población de un millón de habitantes, con la vecina ciudad de Lhokanga. Estas dos ciudades costeras están ubicadas cerca del origen del terremoto que generó el gran tsunami, el cual causó una severa inundación, con altura del flujo del tsunami en tierra de más de 10 m. En estas

dos ciudades se produjeron más de la mitad de las víctimas mortales que causó el terremoto y tsunami.

La F-3.22 muestra la dirección de ataque de las olas, que cubrió varios km<sup>2</sup> de un área densamente poblada. La comparación revisa las condiciones del suelo superficial de la socavación, licuación de suelos y daños en las infraestructuras, revelando varios contrastes y contradicciones.



**F-3.22.** Observe que la invasión de las grandes olas en tierra cerca de costas con perfil irregular ocurre en forma perpendicular a las curvas de refracción del tsunami. La vista muestra las ciudades de Banda Aceh y Lhokanga al norte de la isla Sumatra, Indonesia. Nótese que las olas provenientes del oeste, trepan un promontorio y luego bajan a gran velocidad por la otra pendiente, causando severa erosión del suelo.

Los resultados fueron obtenidos gracias a trabajos publicados poco después del gran tsunami, y por las investigaciones de sitio efectuadas por Francis, un año después del desastre, para observar las condiciones de la recuperación del área, que pudo realizarse gracias al subsidio de EERI/FEMA. NEHRP, cuyos estudios fueron complementados con gran cantidad de fotografías conseguidas de otras fuentes por dicho autor correspondiente a todas las áreas de interés que habrían sido inundadas por el gran tsunami.

### Condiciones Superficiales del Área Inundada

En la F-3.22, se puede distinguir una “zona marrón”, en la costa de Banda Aceh, en la cual toda la vegetación y construcciones fueron borradas del mapa por el tsunami. Aparece el subsuelo, que es una mezcla de limo aluvial y depósitos marinos asociados con la desembocadura del gran río Krun Aceh, así como también cuenta con la protección natural de olas oceánicas provenientes del oeste que son proporcionadas por una península sobreelevada que se ubica al sur de la ciudad. En la zona marrón, Francis no encontró mayores cambios, cuando visitó el área un año después del gran tsunami.

En contraste, la costa de Lhokanga está formada por una playa de arena blanca coralina, que enfrenta directamente las olas de tsunamis provenientes del oeste donde se origina el fenómeno, con un *run up* mayor de 20 m. En la ubicación de Lhokanga el terreno está cubierto con *grass* y palmeras, y está cruzado por pequeños ríos que bajan de las montañas. Aunque las aguas del río contienen algo de sal, la salinización causada por el tsunami fue

rápidamente anulada y la vegetación se regeneró un año después del tsunami. En el caso de los terrenos de cultivo al sur de Camaná, afectados por el tsunami de 2001, según información verbal comunicada al suscrito, por el entonces Coordinador Regional de Defensa Civil para Arequipa, los cultivos se normalizaron tres años después del tsunami. Esa diferencia se debió a las lluvias torrenciales que ocurrieron en Sumatra, mientras que en Arequipa las lluvias casi no ocurrieron y tardó más la desalinización.

Ambas ciudades están conectadas por una quebrada que las une, tal como se aprecia en la F-3.22.

## **Socavaciones del Tsunami**

De las fotografías observadas y de la visita de campo de Francis se concluye que la erosión máxima en ambas ciudades fue de unos 3 m, mientras que en el resto del área estudiado los socavones fueron menores que 2 m.

Se verá más adelante que en las islas Sakhalín, que son parte del archipiélago que une la península de Kamchatka, Rusia, con la isla Hokkaido, Japón, que tienen cerros cerca de la costa, las olas, en su etapa de recesión, ganaron gran velocidad y energía, causando una erosión de más de 2 m de profundidad y de 5 a 8 m de ancho.

En el norte de Sumatra, en el sector investigado, no se encontró correlación aparente en cuanto al relieve, cercanía de estructuras al mar y las vastas erosiones ocurridas en las inmediaciones de la orilla marina. El autor de la presente Guía Práctica cree que tanto en Banda Aceh, donde el agua bajó con gran energía luego de rebasar un cerro, como en las islas Sakhalín, donde el tsunami trepó la parte inferior de las montañas y en su fase de regreso al mar, con gran pendiente a favor, adquirió mucha energía, velocidad y poder erosivo, ocurrieron las erosiones más profundas de todos los casos revisados por Francis.

Tanto en Banda Aceh como Lhokanga, las viviendas y los edificios comerciales ubicados dentro del área inundada por el tsunami sufrieron destrucción casi total. Además, los cuatro puentes instalados en el frente marítimo fueron destruidos, quedando solamente los pilotes y partes de los tableros de los puentes.

Tres componentes de la infraestructura local se comportaron razonablemente bien, dada la severidad de la evolución del *run up* de más de 10 m. Entre ellos se incluye la mezquita Aceh Harbor y, en general, las líneas de ferrocarriles. Es notable la sorprendente supervivencia de las mezquitas ubicadas frente al mar, tanto en Banda Aceh como en Lhokanga. Estos edificios de 3 y 4 pisos de altura, que están constituidos por pórticos abiertos de concreto armado, rellenos con muros de albañilería de ladrillo, experimentaron inundación hasta el techo y las construcciones sufrieron un mínimo impacto de los restos que arrastraba el tsunami, mientras eran inundadas por el torrente hídrico. Tampoco se observaron socavaciones en las cimentaciones. Por otra parte, se

encontraron fragmentos de grava de arena en el techo de la mezquita Tlhokgna.

## SOCAVACIÓN EN CIMENTACIÓN DE EDIFICACIONES



**F-3.23.** Mezquita en Lock Naga, Sumatra. *Run up:* 20 m. Foto: Hwang.

El tsunami cubrió completamente la mezquita. Se encontró piedra y arena en el techo del edificio. Debido a las grandes aberturas del primer piso, la edificación no sufrió daños estructurales, ni socavación en su cimentación.



**F-3.24.** Nótese la mezquita en el centro izquierdo de la foto. En la parte superior derecha, el mar. Obsérvese la suave pendiente del terreno cubierto completamente de *grass*. (Crédito Hwang).

Se hace notar que ambas mezquitas tienen el primer nivel abierto y pocos muros, lo que permitió el paso de las olas del tsunami sin transmitir mucha presión a las columnas. En Japón, los edificios de acero y de concreto armado que sobrevivieron al tsunami de Tohoku-Oki de 2011, también tenían libre el primer piso.

Hace algunas décadas, se realizó el diseño estructural del entonces edificio de la Corporación Peruana de Vapores, CPV, en la actualidad SUNAT, en

Chucuito, Callao. Este edificio también tiene libres los dos cuerpos laterales para permitir el paso del tsunami sin mayores obstáculos. La cimentación está cubierta por una gran caja de concreto armado de 5,5 m de altura, de los cuales 3,0 m están enterrados. De acuerdo con la experiencia reciente, se confirma que los 3,0 m referidos podrían definir la erosión que provocaría un futuro tsunami, sin poner en peligro la estabilidad de ese alto edificio, que también puede ser utilizado como refugio contra tsunamis, con evacuación vertical. La SUNAT, recientemente, hizo reforzar estructuralmente este edificio de concreto armado adecuándolo a la Norma Sismorresistente vigente.

### **Galería de Fotografías de Socavación causadas por el Tsunami del océano Índico**

Dado lo complicado que es determinar teóricamente la profundidad de socavaciones, por los numerosos parámetros que hay que considerar, algunos de ellos utilizando métodos complicados, y por carecer en el Perú de equipos de laboratorio para determinarlos, se ha adoptado el método desarrollado por Francis, quien encontró que, en ningún caso, la erosión en cimentación de edificios pasó de 2,0 m.

En lo que respecta al puerto de Banda Aceh, se observa en la **F-3.25** parte del daño por socavación de los caminos de acceso, los *rip rap*, pequeñas grúas y muros de defensa marítima.

De la Tabla de Fotografías de M. J. Francis, el autor de la Guía Práctica ha seleccionado sólo un número limitado de fotografías, para ilustrar los objetivos de esta parte de la investigación que se está llevando a cabo.

### **GALERÍA DE FOTOGRAFÍAS ILUSTRATIVAS SOBRE SOCAVACIÓN DE TSUNAMIS**



**F-3.25.** Lugar: puerto de Banda Aceh, Sumatra. *Run up*: 12m. Crédito de la foto M. Francis. En el primer plano, la carretera que conduce al puerto, cuya carpeta asfáltica fue totalmente erosionada. Obsérvese el color marrón del suelo original. Al fondo de la foto, restos de viviendas dañadas por el sismo y tsunami.



**F-3.26.** La playa Marina Chennai. *Run up:* 5 m. Foto: H. Yeh.

La ola del tsunami sobrepasó la vereda y la pista. Nótese que el tsunami ha socavado la parte inferior de la vereda y que se parece bastante a algunas playas peruanas. Algo parecido, pero con menores efectos erosivos ocurrió en San Andrés, Pisco, Perú, durante el tsunami de 2007. En San Andrés, la altura de ola en la costa fue de 2,5 m.

**Nota.-** Para la protección de plataformas de carreteras en sectores inundables por tsunamis se recomienda: a) utilizar pavimento rígido y losas de concreto armado, pues los pavimentos flexibles, como los asfaltos, son fácilmente arrancados por la fuerza erosiva de los tsunamis, tal como se observa en la F-3.25, y b) Las plataformas de carreteras hacia el lado del mar pueden ser protegida contra la erosión por tsunamis construyendo faldones de 0,50 -0,80 m de profundidad y, donde se prevea corrientes de gran velocidad, colocar rocas frente a la fachada.



**F-3.27.** Playa Phuket, Tailandia. *Run up:* 6 m. Crédito de la foto: Bergado.

Por su distancia al origen del terremoto, esta vivienda no sufrió daños estructurales por el sismo. Nótese que toda la pared de esta casa de playa es de albañilería, pero la cimentación ha sido socavada. Está apoyada sobre pilastres de ladrillos, muy débiles sísmicamente.



**F-3.28.** Lugar: Khan Lak, Phangnaa, Tailandia. *Run up:* 12 m. Crédito de la foto: Francis.

El edificio es de concreto armado y es un hotel de playa que fue inundado hasta el tercer piso. Ocurrió socavación en su esquina suroeste.



**F-3.29.** Lugar: Koh Khao Jomtien. Phangaa, Tailandia. *Run up:* 10 m. Crédito de la foto: Francis.

Vivienda recreacional de playa de dos pisos, apoyada sobre pilotes. Se inundó hasta el techo, donde el tsunami dejó arena. Los pilotes del perímetro fueron socavados. Suelo: arena limpia uniforme de grano medio.



**F-3.30.** Lugar: Koh Khao Jomtien, Phangaa, Tailandia. Crédito de la foto: Francis.

Una residencia de playa de bloques de concreto, completamente destruida. La losa de concreto del piso falló. Se destrozó la tubería de desagüe. Falla típica de las residencias de playa. Suelo: arena limpia de grano medio uniforme.

### **3.3.3. Enseñanzas de Socavación del Tsunami del océano Índico**

Las socavaciones causadas por el gran terremoto y tsunami del océano Índico proporcionan valiosa información sobre las condiciones de sitio que contribuyen a la socavación de la cimentación de edificaciones e infraestructura urbana.

Una detallada evaluación de esta evidencia muestra el potencial de licuación según el método Yeh y Tonkin, para estimar la profundidad de socavación.

La evaluación detallada de la socavación fue realizada por Francis en 20 lugares seleccionados, representando un rango de ubicaciones, condiciones de inundación y profundidad de socavación, que se observaron después del gran tsunami del 2004.

Los sitios fueron escogidos donde los datos de campo sobre *run up* estaban disponibles y donde la profundidad de socavación podía ser claramente estimada en la fotografía.

Los datos disponibles sobre las mareas fueron identificados en siete lugares asociados a cada sitio, para estimar las propiedades de las olas del tsunami.

#### **Parámetros de Sitio**

Los lugares fotografiados, de los cuales se han mostrado sólo algunos, fueron evaluados utilizando fotografías aéreas para verificar la topografía, las marcas de la altura del *run up*, la distancia de la estructura o edificación a la orilla del mar, y las coordenadas. La elevación estimada y las distancias fueron determinadas mediante imágenes aéreas y fueron corroboradas con los registros de trabajo de campo. Otras características tabuladas incluyen las condiciones del sitio, vegetación superficial o cobertura, descripción de la socavación, así como la profundidad observada.

Las distancias al epicentro del sismo fueron clasificadas como las de menos de 500 km, las que estaban entre 500 y 1000 km, y las de más de 1000 km, considerando la relativa directividad del tsunami desde el origen y la presencia de obstrucciones y protecciones en las direcciones este-oeste y norte-sur. Los parámetros de los sitios seleccionados proporcionaron un amplio rango de *run up* hasta de 20 m y distancias de inundación hasta de varios kilómetros; sin embargo, todas las socavaciones evaluadas están situadas a menos de 200 m de la línea costera, excepto la mezquita de Lock Nga, en Sumatra, que se ubica a unos 600 m del mar. Las características del suelo incluyen varias gradaciones de suelo limoso, arena y granos típicos de zonas costeras.

Coincidentemente, todas las profundidades de socavación fueron de 2 m o menos, a excepción de un caso, ubicado en una abrupta carretera costera cerca del origen del sismo en las islas Nicobar, donde la socavación fue estimada en 4 m.

## **Parámetros de la Marea**

Los datos de la marea para el análisis de la socavación fueron obtenidos de varias fuentes, como, por ejemplo, la NOAA, Universidad de Hawái y agencias gubernamentales de Sri Lanka y la India, así como de datos digitales no publicados de la Universidad de Chulalongkorn de Tailandia.

Los registros de control de mareas se ubicaban entre 5 y 750 km de los sitios de socavación; sin embargo, la mayoría de los lugares estaban a menos de 200 km del sitio, excepto los lugares muy cercanos al origen del tsunami, en Sumatra y en las islas Nicobar, donde los equipos de registros de mareas fueron destruidos por el tsunami. En el otro extremo se ubica Somalia, el lugar afectado más distante y remoto, donde, sin embargo, también hubo víctimas mortales.

Cuando la ubicación de los lugares donde se realizaron las mediciones de mareas fue distante a la localización de los *run up*, en un medio ambiente mecánicamente protegido del impacto directo de la ola del tsunami, los datos registrados proporcionaron un estimado conservador del *run up* en los sitios de socavación que fueron estudiados.

Un parámetro clave usado en la evaluación fue el máximo cambio de presión, que depende de la altura de ola por tiempo mínimo. La máxima altura registrada varió de 120 a 260 cm y los períodos menores variaron entre 5 y 50 minutos.

## **Cálculo de la Profundidad de Socavación y Resultados**

M. Francis utilizó el método propuesto por Yeh y Tonkin, usando la altura del tsunami, los períodos de los mareógrafos y los parámetros estimados del sitio, incluyendo la unidad de peso de flotación y el coeficiente de consolidación obtenido de la evaluación de la licuación de acuerdo con la topografía del lugar. No se contó con muestras no disturbadas de los sitios donde se evaluó la socavación y la unidad de peso de flotación se estimó en 0,9 de la gravedad específica. El coeficiente de consolidación en suelos granulares es un parámetro difícil de medir en el campo, así como en laboratorio, debido a la gran variabilidad.

Tratar de aplicar el método de Yeh y Tonkin para el caso del Perú no sería práctico, por ahora, por no disponer de datos y, además, no contar con equipos de análisis comparativos de laboratorio para efectuar ensayos claves, por lo que no se ha proporcionado en esta Guía el método de manera detallada. Sin embargo, los interesados en el tema pueden estudiar el trabajo de Mathew J. Francis y allí obtener las referencias especializadas para investigar el problema con profundidad, de manera detallada.

También hay otros métodos basados en elementos finitos, que permiten modelar con redes pequeñas en los lugares que se requiere precisión y considerar la no linealidad del proceso; pero estos métodos son aún más complicados que el propuesto por Yeh y Tonkin. El ingeniero profesional M. J. Francis, contando con fondos del EERI y FEMA/NEHRD, tuvo que asumir varios de los valores que utilizó para poder aplicar dicho método, lo que -se

puede entender- le quita cierta precisión y algo de confiabilidad a los resultados, pero es compensado por la amplia experiencia y criterio profesional de Francis.

### **3.3.4. Erosión de Tsunami Detalladamente Documentado. Caso de las Islas Kuriles en Kamchatka, Rusia**

El título de esta parte de la Guía Práctica, ha respetado el título original del trabajo de los investigadores norteamericanos y rusos.

Gracias a inspecciones previas realizadas en la costa de las islas Kuriles, al sur de la península en Kamchatka, Rusia, antes y después del tsunami que afectó las islas, se pudo determinar, con bastante precisión, el paisaje antes de este fenómeno natural adverso y cómo queda afectado después del tsunami.

Las investigaciones se realizaron con motivo de un proyecto de biodiversidad en las islas Kuriles, realizado en el verano boreal del año 2006 (junio-agosto), e investigaciones posteriores realizadas también durante los veranos de 2007 y 2008, después que ocurrieron los terremotos de 8.3 Mw que generaron el tsunami del 15 de noviembre de 2006 y el terremoto de 8.1 Mw, que también generó tsunami, el 13 de enero de 2007.

Los investigadores que estudiaron las costas de las islas Kuriles, antes de los tsunamis, fueron científicos norteamericanos y rusos y los gastos fueron financiados por sus respectivas academias de ciencias.

Cuando los científicos norteamericanos y rusos visitaron las costas de las islas Kuriles, en el verano de 2006, estaban completamente cubiertas de vegetación. Los resultados de los estudios de campo después de ocurrido el tsunami fueron una sorpresa, habiéndose encontrado, en algunos lugares, que la arena y la tierra removida por el tsunami había sido unas 50 veces superior a los materiales depositados por el tsunami.

El equipo de investigación encontró que, de la orilla del mar, habían sido arrancadas las plantas desde sus raíces y pequeños cerros de tierra y dunas de arena habían sido removidos por el tsunami, exponiendo grandes rocas e incluso en algunos lugares, equipos militares abandonados al finalizar la II Guerra Mundial.

El trabajo fue publicado en el Journal of Geology, siendo los autores investigadores de la Universidad de Washington de los EE.UU. y de la Oficina del Lejano Este de la Academia Rusa de Ciencias.

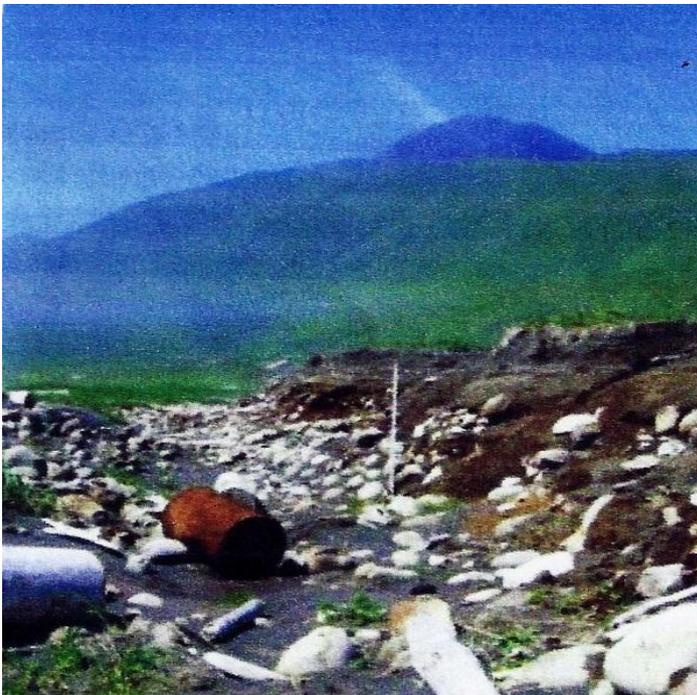
El terremoto ocurrido el 15 de noviembre de 2007 fue lo suficientemente potente como para activar al Sistema de Alarma contra Tsunamis del Pacífico. En la vecina isla de Hokkaido, Japón, por la dirección y velocidad del tsunami, el evento generado tuvo poca altura; sin embargo, al otro lado del Pacífico, en el puerto Crescent City, ubicado al norte de las costas del estado de California, el tsunami alcanzó una altura de 1,80 m. Este puerto es conocido por su alta

sensibilidad frente a tsunamis. Allí a 4500 km del origen del tsunami, el evento causó daños por US\$ 10 millones.

Este es un nuevo caso de directividad de las olas de un tsunami. Al igual que los tsunamis originados en Chile, tienen pocos efectos en las costas peruanas.

Las costas de las islas Kuriles fueron alcanzadas, en algunos lugares, por olas de más de 20,0 m y el cambio topográfico que provocó en sus costas fue dramático.

La severidad de la erosión del tsunami dependió de la topografía de la zona inundada, pero se entiende más que nada debido a la fuerza de las olas. Los investigadores encontraron que en Soretta Bay de la Matua, se habían perdido 50 m<sup>3</sup> de material por metro de ancho erosionado. En la Bahía Ainu, la erosión de sedimentos llegó a 200 m<sup>3</sup> por metro de ancho del terreno.



**F-3.31.** Enorme socavación causada por el tsunami. La profundidad fue de más de 2,0 m. La mira blanca tiene 1.80 m de altura. El ancho es de 7-8 m con respecto a la ubicación del poste blanco. Se asume que la gran energía que se generó durante el retorno de las aguas desde las faldas del cerro provocó la gran erosión que se muestra. (Crédito de la fotografía: Breanyn Mancinnes de la Universidad de Washington).

En el lugar llamado bahía Dushanaja, donde el tsunami tuvo relativamente poca altura a la máxima distancia de la orilla el mar, la erosión ocurrida fue de unos 5 m<sup>3</sup> por metro de ancho de erosión.

En otros lugares, el suelo constituido de arena volcánica y otros materiales de mayor tamaño, fueron erosionados de la orilla del mar y depositados a gran distancia tierra adentro, pero el material depositado por el tsunami fue bastante menor que el material erosionado por este.

En lugares donde el paisaje había sido perturbado por la presencia humana, como con la construcción de bases militares o incluso con la colocación de postes, se produjo una erosión más profunda.

Uno de los investigadores ha hecho notar que los geólogos han considerado, desde hace buen tiempo, que el estado de erosión es un importante tema cuando se estudia los efectos de los tsunamis, enfatizando que aquello es importante para determinar el riesgo de una comunidad ubicada a la orilla del mar.

Durante la primera inspección del área mostrada en las cercanías de la bahía Ainu, en el verano boreal (junio-agosto) de 2006, el terreno estaba cubierto por unos estratos de unos 2,0 m de altura, aun por encima del poste blanco mostrado que tiene 1,80 m de altura. Cuando los investigadores excavaron el área antes del tsunami no encontraron las grandes piedras mostradas al fondo del "cana" erosionado, de unos 6-7 m de ancho, dependiendo de la sección transversal.

*¿Por qué olas de tsunami de hasta 20 m de altura, causaron una erosión tan extrema?*

Debido a la experiencia que se tiene por el estudio de la inundación de varios tsunamis se puede llegar a la siguiente conclusión: por ejemplo, los efectos de la etapa recesiva de las olas del tsunami que afectó el sur de Camaná, en junio de 2001, a pesar de la suave pendiente de esa zona, fueron los que causaron la mayor erosión del suelo y la socavación de la cimentación de las viviendas.

Tratándose de olas de 20.0 m de altura, estas deben haber alcanzado y subido por la pendiente del fondo de la foto, que son las faldas de un cerro (F-3.31). Por lo tanto, las aguas, al regresar al mar, con la pendiente a favor, adquirieron gran velocidad, fuerza erosiva y capacidad de transporte. Esto puede explicar la extrema erosión ocurrida en las cercanías de la bahía Ainu y el transporte de grandes piedras desde las faldas del cerro que la fotografía (F-4.31) muestra al fondo del paisaje.

Referencia. University of Washington. "First Detailed Documentation Of Tsunami Erosion." Science Daily., 30 October 2009. <[www.sciencedaily.com/releases/2009/10/091028112803.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2009/10/091028112803.htm)>.

## **Conclusiones**

La gran variedad y complejidad de las condiciones para analizar las socavaciones que produce un tsunami son evidentes y se refuerzan revisando las hipótesis y limitaciones. Sin embargo, los métodos existentes para estimar la socavación en ríos, causados por mareas y la socavación en el fondo marino son conocidos y están bien establecidos para la práctica ingenieril.

Las inspecciones de campo y las fotografías del gran tsunami de Sumatra-Pilares de Andamán indican distintas tendencias asociadas con socavaciones en edificaciones y puentes, así como en puertos, estructuras de concreto armado y acero, y canales de erosión. Las características de la ocurrencia de socavación son complejas y permanecen irregulares, afectadas por la orientación del origen, la batimetría de las aguas pocas profundas y la

topografía en tierra que invade el tsunami y los flujos de la inundación, así como la rugosidad del suelo.

El método simplificado de Yeh y Tonkin para determinar la socavación de tsunamis ha sido aplicado durante el estudio de Francis, usando datos de marea, en mayor medida de *run up*, hasta en 20 lugares para demostrar el potencial de la relación presión de poro mayor que 0.5, validando y reforzando el potencial de licuación de suelos durante la fase recesiva de las olas del tsunami. Sin embargo, el problema es sumamente complejo y difícil de analizar.

Las conclusiones más importantes de las observaciones efectuadas se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. La profundidad de socavación parece limitada a menos de 2,0 m en ubicaciones dentro de los 200 m desde de la línea costera, o menos de la mitad de la máxima distancia de inundación. Esta sorprendente tendencia fue consistente en un amplio rango de casos estudiados. Las hipótesis y métodos para determinar la máxima socavación permanece elusiva y las discrepancias con las teorías existentes sobre socavación son aún importantes.
2. Es difícil realizar la determinación del origen de las licuaciones de suelo observadas y generadas por terremotos y tsunamis, y los desplazamientos de las estructuras debido a la excesiva fuerza hidráulica y a la pérdida de resistencia de la cimentación, en el caso de extrema energía cercana al origen del tsunami, como en el caso del norte de la isla de Sumatra.
3. Si se considera un incremento de la resistencia a la socavación de la cobertura vegetal, ello no se evidenció durante los estudios.
4. La altura del *run up*, la distancia de inundación y las características del suelo son los parámetros que más frecuentemente influyen en el potencial de licuación y profundidad de socavación del tsunami.
5. La socavación crítica generalmente ocurre durante la fase de recesión del tsunami, lo que se evidencia en la orientación de los cráteres generados por la socavación.
6. En Banda Aceh, isla Sumatra, Indonesia, durante el tsunami del océano Índico, de 2004, en las islas Kuriles, Rusia, durante los tsunamis del mapa del recorrido del tsunami en Banda Aceh, en Sumatra, 2006 y 2007, la profundidad de socavación sobrepasa los 2,0 m. Si se observa la foto de las islas Kuriles (F-3.31), en el primer caso, cuando el tsunami sobrepasó un cerro y en el segundo, el tsunami trepó un cerro, que se ve al fondo del alineamiento del canal erosivo. Se puede deducir que, en muchos casos, con las pronunciadas pendientes a favor, cuando el agua regresa al mar, adquiere gran velocidad y poder erosivo. Esto puede explicar por qué, en ambos casos, la profundidad de erosión pasó de 2,0 m.

La conclusión más importante, coincidiendo con lo mencionado por FEMA y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU., es que las teorías y métodos para determinar la socavación que producen los tsunamis está todavía en su etapa inicial de desarrollo y el método disponible de Yeh y Tonkin, aunque se dice simplificado, requiere todavía de numerosos datos que son difíciles de

obtener, más aún, en países que se encuentran en vías de desarrollo, como el Perú.

Por ello, el trabajo de M.J. Francis, ingeniero profesional estadounidense con gran experiencia, sostiene que la tendencia del gran tsunami del océano Índico da como profundidad máxima una socavación de 2 m, excepto en la región de Banda Aceh, inundada por el tsunami por el oeste, cuando las olas sobrepasaron un cerro, y las olas ingresaron con gran poder erosivo.

La cuarta conclusión es la que más fuertemente influye en el potencial de licuación. La altura de *run up*, la distancia de ubicación y el tipo de suelo se pueden determinar sin mucha dificultad. Tomando como base la tendencia general de 2,0 m de profundidad de socavación, que podría reducirse en 40% o incrementarse en 20%, si el tsunami trepa en un cerro bajando luego con gran poder erosivo. Realizar dicha estimación con criterio ingenieril práctico depende de los factores indicados en la conclusión 4. Sin embargo, este es un tema que requiere mayor investigación.

# CAPÍTULO 4

## CRITERIOS PARA EL PLANEAMIENTO URBANO DE CIUDADES UBICADAS EN ZONAS INUNDABLES POR TSUNAMIS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

En el planeamiento urbano de las zonas costeras inundables por tsunamis, la visión del proceso de este tipo de peligro debe ser integral, debiéndose tener en cuenta el impacto generado por la fase invasiva del oleaje y por el retorno de las aguas, en las estructuras urbanas. Para ello, debe considerarse i) la selección y el acondicionamiento del sitio; ii) el diseño y la construcción de las lotizaciones urbanas y de las edificaciones; y iii) la protección de las viviendas y de los elementos claves, conformados por los servicios públicos vitales: agua, desagüe, energía, transporte y comunicaciones; y los servicios esenciales: hospitales, centros educativos, centros de operaciones de emergencia, cuarteles de bomberos y comisarias, entre otros. Son elementos igualmente importantes los espacios públicos de las ciudades costeras, por su potencial de constituirse en espacios propicios para el acondicionamiento de refugios temporales.

#### **Respecto a la selección y el acondicionamiento del sitio:**

- a. Deben segregarse los terrenos inmediatos a la confluencia o entrega de los cursos de quebradas intermitentes y de ríos (delta de eyección) en el mar.
- b. Debe restringirse la ocupación de suelos con potencial de licuación.
- c. Deben seleccionarse terrenos con pendientes mayores al 2% o que permitan el escurrimiento de las aguas del mar por gravedad.
- d. Deben eliminarse las oquedades u hondonadas del terreno y compactarse adecuadamente el Área de Terreno Edificable.

#### **Respecto al diseño y construcción de las lotizaciones urbanas de las edificaciones:**

- a. Debe programarse la localización del Área Edificable en la zona más alta y segura de la lotización urbana.
- b. Deben diseñarse lotizaciones urbanas con vías de acceso jerarquizadas (principales y secundarias); y con dirección predominante en sentido transversal a la orilla del mar, a fin de programar eficientes rutas de evacuación y de rescate.
- c. Deben diseñarse lotizaciones urbanas y áreas verdes recreativas localizadas también en zonas altas, seguras y con capacidad para constituirse en refugios temporales para atender a la población afectada.
- d. Debe programarse la profundidad de la cimentación de las estructuras hasta encontrar suelo firme o compacto.
- e. Debe utilizarse preferentemente el sistema de concreto armado para los equipamientos urbanos y la albañilería confinada para las viviendas.
- f. Deben diseñarse techos que permitan el escurrimiento de las aguas marinas por gravedad.

- g. Debe restringirse la ocupación del subsuelo en las edificaciones de los sectores urbanos inmediatos al borde costero.
- h. Deben destinarse los espacios de mayor frecuencia de uso, en los niveles superiores de las viviendas.

**Respecto a la protección de las viviendas y elementos clave:**

- a. Deben construirse rompeolas en dirección opuesta al mar, a fin de disminuir el empuje generado por las olas.
- b. Deben construirse diques en dirección paralela a la orilla del mar a fin de evitar el ingreso de las olas.
- c. Debe preverse una franja marginal de protección comprendida entre la orilla del mar y el área de terreno edificable.
- d. Deben implementarse en todas las edificaciones los sistemas privados de drenaje articulados al sistema integral de drenaje de la ciudad.
- e. Deben exigirse los retiros laterales de las edificaciones a fin de facilitar el escurrimiento de las aguas marinas al interior de los lotes de terreno.
- f. Debe evitarse el uso de gibas o camellones en las vías urbanas locales que conforman rutas de evacuación, a fin de facilitar el desplazamiento de la población en casos de emergencia.
- g. Debe implementarse un sistema integral de drenaje para la evacuación de las aguas pluviales y marinas.
- h. Debe restringirse la colocación de postes de alumbrado público en los sectores urbanos de la ciudad inmediatos a los bordes costeros, o en todo caso reforzarse la estructura de los postes para el alumbrado público.
- i. Debe sancionarse la ocupación informal de los espacios públicos y de los ejes que conforman las rutas de evacuación en casos de emergencia.

De acuerdo con estas consideraciones, se irá disponiendo de soluciones que ya se encuentran determinadas para los tipos de viviendas más adecuados para ser desarrollados cerca de la orilla del mar, de conformidad con las lecciones aprendidas gracias a las investigaciones de los grandes tsunamis ocurridos en los últimos 15 años, y frente al planeamiento urbanístico destinado a reducir al mínimo el impacto de terremotos y tsunamis desarrollados en zonas inundables por tsunamis.

Para las viviendas se han considerado tsunamis con período de retorno de 500 años, a fin de fijar los límites de inundación y la altura de ola que discurre, así como tsunamis con un período de retorno de 1000 años.

La Guía Práctica se focaliza en los dos tipos de construcción que constituyen casi el 100% de las edificaciones que se construyen a lo largo de la costa peruana, entre sus fronteras norte y sur.

Estos tipos de construcción son:

- Las viviendas de albañilería.
- Edificaciones de departamentos de concreto armado de varios pisos.

En cuanto a las viviendas de madera estas deben ser prohibidas en las zonas inundables por tsunamis, por dos razones:

- Según la experiencia de los daños causados por tsunamis en varios países alrededor del océano Pacífico, como en Japón e Indonesia, los tsunamis de pequeña magnitud, con una altura de ola de unos dos metros, pueden destruir fácilmente las casas de madera, es decir, estas son muy vulnerables frente a los tsunamis.
- En el Gran Terremoto del Este del Japón (GTEJ) o Tohoku-Oki, como también se le denomina a dicho evento, las viviendas de madera fueron arrancadas fácilmente desde sus cimientos y arrastradas, convirtiéndose en peligrosos proyectiles flotantes que causaron numerosas víctimas.

### **Viviendas de Albañilería**

Es el tipo de construcción más común para viviendas. Cuando las familias peruanas inician el desarrollo urbano de nuevos asentamientos, ellas aspiran a vivir en una “*vivienda de material noble*”, es decir, de ladrillos.

Las viviendas de albañilería deben ser sismorresistentes y resistentes a las diferentes presiones hidráulicas que ejerce el tsunami sobre ellas.

#### **4.2. VIVIENDA DE ALBAÑILERÍA SISMORRESISTENTE. ALBAÑILERÍA CONFINADA CONCEBIDA Y DESARROLLADA EN EL PERÚ**

El terremoto de Áncash del 31 de mayo de 1970 dejó 67 mil víctimas mortales, la mayoría de ellas debido a la avalancha originada en el pico norte del nevado Huascarán, y pasó a la historia como el evento más mortífero de las Américas durante el siglo XX. En Chimbote, debido al *boom* pesquero de los años 60, se habían construido miles de viviendas de albañilería.

En julio de 1970, el consultor del SENCICO, que suscribe, fue nombrado por Resolución Suprema miembro de la Subcomisión Técnica de CRYRZA: Comisión de Reconstrucción y Rehabilitación de la Zona Afectada por el Sismo, en representación de la UNI. Los otros dos miembros fueron el Ing. geólogo Hugo Jaén, en representación del INGEMMET, y el sismólogo Ernesto Deza, por el IGP.

El suscrito propuso —y su planteamiento fue aceptado por la alta dirección de CRYRZA—ser el responsable de dos funciones indispensables para la reconstrucción de Chimbote, con miras al desarrollo seguro de la ciudad:

- Proporcionar asistencia técnica a las familias para la reparación y reforzamiento de las viviendas de albañilería.
- Conjuntamente con los Ings. Hugo Jaén y Ernesto Deza, que formaban parte de la Subcomisión Técnica de CRYRZA, ser la contraparte peruana de la Misión Científica Japonesa para desarrollar el mapa de peligros multiamenaza de Chimbote y sus zonas de expansión, como base para el Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad.

## **Desarrollo de la Albañilería Confinada**

Para proporcionar asistencia técnica a los miles de familias damnificadas en Chimbote por el terremoto del 31 de mayo de 1970, se hizo previamente una inspección técnica de la ciudad a fin de evaluar la magnitud y complejidad de la tarea. La conclusión fue que el soporte técnico debía focalizarse en la reparación y reforzamiento de los miles de viviendas de ladrillo que habían sido dañadas por el terremoto, y que la tarea sería inmensa y tardaría algunos años. El plan esquemático de acción que se formuló indicaba que sería necesario un equipo técnico numeroso, a cuyos integrantes había que capacitar.

Para entonces, en 1970, el consultor del SENCICO era profesor del curso de Ingeniería Antisísmica, que él había introducido en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC/UNI), en 1963.

Entre setiembre de 1970 y fines de 1974, 25 egresados de la FIC/UNI viajaron a Chimbote a proporcionar asistencia técnica, mediante acciones que se concentraron en los años 1971 y 1972. Algunos egresados de la FIC/UNI se retiraron y fueron reemplazados por otros egresados de las promociones siguientes.

CRYRZA, inicialmente, proporcionó a los egresados de la FIC/UNI los costos de mantenimiento y un pasaje de ida y vuelta a Lima mensualmente. Progresivamente se fueron mejorando las condiciones administrativas. Estos egresados donaron, desde setiembre de 1974 hasta 1975, más de 600 meses/hombre de trabajo voluntario. El suscrito fue nombrado, con carácter ad-honorem, por CRYRZA, para dirigir el grupo de trabajo y para darle asistencia técnica, empezando por la capacitación en el campo y en el aula a los egresados de la FIC/UNI. Luego, en equipo con ellos, se capacitó a más de 200 maestros de obra, para que dirigieran los trabajos de reconstrucción de las viviendas.

Una de las conclusiones más importantes de las inspecciones de campo previas fue que las viviendas que carecían de columnas de concreto armado y tenían una baja densidad de muros en la dirección paralela a la fachada, habían colapsado; otras habían sufrido daños, más allá de la posibilidad de ser rehabilitadas; pero también había un gran número de viviendas reparadas y reforzadas con el 15-20% de su valor.

Se nombró como líder del Grupo de Reparación y Reforzamiento (GRR) al entonces egresado de la FIC/UNI Manuel Hermoza Conde, en la actualidad (marzo de 2016) decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Pedro de Chimbote.

El GRR de la FIC/UNI desarrolló los proyectos de RyR de 2,500 viviendas y proporcionó asesoría técnica durante los trabajos de reconstrucción. Simultáneamente, se capacitó a más de 200 maestros de obra, los que con gran interés acudían a clases vespertinas. En aquellos meses, la actividad de Chimbote estaba, casi en un 100%, concentrada en la reconstrucción de la ciudad.

### **4.3. DESARROLLO DEL MÉTODO DE REPARACIÓN Y REFORZAMIENTO DE VIVIENDAS**

Se consideró que el área macrosísmica de la ciudad de Chimbote era un inmenso laboratorio a escala natural, donde el sismo con intensidad VIII en la escala Mercalli Modificada acababa de someter a miles de viviendas a pruebas reales de violento sacudimiento; los resultados de la prueba a escala natural estaban a la mano y, de aquello, los egresados de la FIC/UNI y los profesores aprendimos mucho, desarrollando una experiencia que hasta ahora resulta necesario compartir.

Descartando aquellas viviendas que eran irrecuperables y unas pocas que no sufrieron daño y no requerían intervención, se inició el proceso de reparación y reforzamiento.

#### **Método de Desarrollo**

- a) Con los respectivos planos de las viviendas, que no fueron muchos, como en Chimbote Sur por ejemplo, donde se tenían grupos de viviendas pertenecientes a los servidores del Banco de la Nación, que no contaban con columnas y sufrieron severos daños. En la gran mayoría de casos, hubo que hacer el levantamiento de los planos de las casas.
- b) El levantamiento arquitectónico de las casas incluyó todos los muros, y sobre estos planos se dibujaron todos los daños que habían sufrido, fisuras de menos de 1 m y grietas de mayor espesor. De acuerdo con los datos, con una visión integral de su comportamiento sísmico, se determinaron las causas de los daños. En el estudio se hizo el análisis de la densidad de muros, teniendo como ancho unitario el de los muros de 0,25 m de espesor y, para los muros de soga de 0,15 m, se multiplicó por  $15/25 = 0,6$ . Después, se cambió a áreas de muros en la dirección, considerando dividir entre el área de construcción por encima del nivel considerado. Por ejemplo, para la división de muros del primer piso en una casa de dos pisos, se dividió entre el área del segundo piso + el área del primer piso. Es un buen indicador de la resistencia sísmica de la vivienda, pues el numerador es el área resistente de la casa, mientras que el denominador es directamente proporcional a la sollicitación sísmica, ya que es el resultado de multiplicar el área de construcción por el peso por  $m^2$ , el cual, multiplicado por el coeficiente sísmico, nos da la fuerza sísmica actuante.

Si la densidad de muros era menor que  $3 \text{ cm}/m^2$ , se debían agregar columnas de concreto armado y, si no eran suficientes, había que emplear pequeños muros de concreto armado, para tener una resistencia sísmica equilibrada en ambos sentidos de la vivienda.

- c) Se colocaron columnas más rectangulares de 0,15 x 0,25 m<sup>2</sup>, con la mayor dimensión en la dirección paralela a la fachada, cuando no afectaba de manera notoria la arquitectura de la casa. Cuando había viga collar, se colocaron vigas invertidas en el techo del segundo piso para formar un sistema espacial continuo, firmemente conectado en las uniones viga-columnas.
- d) Para cada tipo de fisura o grieta se desarrollaron métodos propios de reparación. Para el caso de grietas, se colocaron mallas de acero fijadas en los bordes con grapas de acero y luego tarrajeadas.

Así se desarrollaron los proyectos de reparación y reforzamiento basados en los resultados de las inspecciones de campo en Chimbote, y aplicando la tecnología japonesa de la década del 60, densidad de muros y la utilización de pequeños muros de concreto armado.

El gráfico que será mostrado en la Guía Práctica es el resultado de haber estudiado en detalle los daños producidos en 2500 viviendas de 1 y 2 pisos y más de 1,000 que colapsaron o sufrieron daños más allá de ser recuperadas o que no sufrieron daño alguno.

De tal manera que el gráfico representa los resultados de haber estudiado en detalle 3500 viviendas, no muestras de laboratorio, sino casos reales. Se consideró que los resultados de esta investigación tecnológica y asistencia técnica son un aporte del Perú al conocimiento y la experiencia global sobre la Ingeniería Sísmica.

#### **4.4. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE TSUNAMIS**

En la actualidad se dispone de gran cantidad de datos sobre los efectos de los tsunamis en zonas urbanas y, principalmente, los resultados de las investigaciones técnico-científicas de los tsunamis ocurridos en el océano Índico en 2004; Maule, Chile, en 2010, y Tohoku-Oki, Japón, de 2011.

Las Naciones Unidas, por su parte, como resultado de la Segunda Conferencia Mundial sobre Reducción del Riesgo de Desastres, realizada en la ciudad de Kobe, capital de la Prefectura de Hyogo, Japón; y en 2015 la Tercera Conferencia Mundial sobre Reducción de Desastres celebrada en la ciudad de Sendai, Japón, en marzo de 2015, ha producido y publicado los resultados de dichas conferencias, sintetizadas dentro del Marco de Acción de Hyogo para la Reducción del Riesgo de Desastres 2005-2015, y el Marco de Sendai para la Evaluación Global del Riesgo de Desastres 2015-2030. El último informe fue presentado oficialmente por las NN.UU., con su versión en español, en su sede en Lima, Perú, en julio de 2015.

En dicha presentación, este consultor del SENCICO fue el panelista del Grupo 2, justamente sobre el tema de desarrollo urbano. Fue, además, miembro del Comité Consultor de la Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la

Reducción del Riesgo de Desastres, para la promoción del “*Programa Making My City Resilient, My City is Getting Ready*”, 2005-2015.

El Cap. 4.2 del libro Disaster Reduction Tsunamis fue considerado por las NN.UU. una de las publicaciones de interés internacional por su enfoque teórico-práctico del tsunami. Dicho libro fue donado por las NN.UU. a los países afectados por el tsunami del océano Índico de 2004.

Con la información disponible y la experiencia ganada trabajando en equipo, se pueden plantear los criterios para el planeamiento urbano de la ciudades ubicadas en las franjas costeras inundables por tsunamis, que incluyen además los tipos de construcción más adecuados para desarrollar viviendas en zonas inundables por tsunamis, con protección adicional en sus muros y cimentación, para evitar su socavación, de modo que puedan proteger adecuadamente la vida y propiedades de las familias que residen en estas zonas inundables por tsunamis.

#### **4.5. CRITERIOS URBANÍSTICOS**

En primer lugar, para lograr un desarrollo urbano seguro debe plantearse, como base, contar con el mapa de amenaza múltiple, que se elabora efectuando estudios de microzonificación, considerando el peligro de un tsunami para un período de retorno de 1000 años.

Debe aprovecharse al máximo la morfología del terreno donde se desarrolla la ciudad, considerando no sólo la dirección del ataque de las olas del tsunami, sino también visualizando las posibles trayectorias del agua que retorna al mar, pues en esta fase de regreso, con la pendiente a favor, genera, con el incremento de su velocidad, efectos destructivos sobre edificios e infraestructuras, así como un gran poder erosivo sobre sus cimentaciones.

Se puede dar el caso especial de que las olas del tsunami inunden sectores con gran pendiente, como sucedió en el tsunami del océano Índico en Banda Aceh, al norte de Sumatra, y en las islas Sakhalin, frente a la península de Kamchatka, Rusia, donde las aguas del tsunami de regreso al mar ganaron gran velocidad y poder erosivo. En Banda Aceh, la profundidad de socavación llegó a unos 4,0 m, mientras que en las islas Sakhalin las franjas de socavación tuvieron una profundidad de más 2,0 m y el ancho erosionado de 6-8 m. Erosiones con estas características destruyen edificios e infraestructuras.

En los numerosos casos investigados en las costas de varios países ubicados en el océano Índico, la socavación en los centenares de edificios e infraestructuras no pasó, en ningún caso, de 2.0 m, respecto al entorno geográfico. Teniendo en cuenta la susceptibilidad del suelo a la erosión se puede determinar la profundidad de las cimentaciones de edificaciones e infraestructuras, para luego protegerlas del poder erosivo de las olas del tsunami, sobre todo en su fase recesiva hacia el mar.

Pero en las franjas costeras predominan los suelos arenosos, con la napa freática cerca de la superficie del terreno y, además, el suelo es suelto, por lo

que se crean las condiciones propicias para la ocurrencia de licuación de suelos. Según los resultados de los estudios de los efectos de los tsunamis de Maule, Chile, de 2010 y Tohoku, Japón, de 2011, los impactos causados por licuación de suelos fueron responsables del gran porcentaje de daños en edificaciones e infraestructuras, incluso a gran distancia del origen de los sismos. Por ejemplo, a orillas de la bahía de Tokio, la capital del Japón, ubicada a más de 300 km del origen del terremoto, ocurrieron licuaciones generalizadas que dañaron las viviendas e infraestructuras urbanas.

En el caso de las licuaciones generalizadas de suelo ocurridas en Tambo de Mora, provincia de Chíncha, región Ica, se incrementó la severidad de éstas licuaciones por la presencia de humedales. En Tambo de Mora, la destrucción de edificaciones e infraestructuras fue total en la parte baja de la ciudad, donde, además, la intensidad sísmica llegó a IX MMI, la más alta de toda el área macrosísmica.

En las franjas costeras cercanas a la desembocadura de ríos, se debe tener especial cuidado, pues, a través de los cursos de agua que desembocan en el mar, los tsunamis suelen tener gran penetración tierra adentro, como ocurrió en varias islas de Sumatra, durante el gran tsunami del océano Índico de 2004.

Por ello, para delimitar los suelos inundables que deben tenerse en cuenta en el planeamiento de ciudades costeras, es necesario determinar los límites de inundación del tsunami, con el agua que penetra a través del cauce de los ríos.

En los terremotos de Maule, Chile, de 2010 y Tohoku, Japón de 2011, ocurrieron severas licuaciones de suelos en la orilla de los ríos, pues se presentan las condiciones propias para su ocurrencia: suelos arenosos mezclados con partículas finas y presencia de agua; el lado no confinado de los bordes de los ríos hacia su curso produce deslizamientos hacia el río, efecto que se produjo en casi todos los sismos que han sido investigados en las Américas y Asia.

#### **4.6. COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES GENERALES**

Por el hecho de contar con informaciones relativamente abundantes y tener alguna experiencia en el desarrollo de ciudades sostenibles, que es la base para lograr centros urbanos seguros, es posible diseñar y desarrollar ciudades seguras cerca de las orillas marinas inundables por tsunamis.

Gracias a las informaciones proporcionadas por las Naciones Unidas respecto del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, en el desarrollo de ciudades seguras se está considerando de manera especial el tratamiento de las instalaciones esenciales en casos de desastres, así como también en lo correspondiente a los servicios públicos vitales.

El hecho de trabajar en equipo y con modestia, contando con la colaboración de los egresados más destacados de la FIC/UNI, por medio de tesis profesionales y de Maestría en Ingeniería Civil, se ha podido lograr el desarrollo

de los estudios de microzonificación y su principal producto: el mapa de peligro multiamenaza.

Pero no basta planificar y diseñar ciudades urbanas seguras, sino que es también necesario que las edificaciones levantadas con los tipos de materiales más comunes que se utilizan en el Perú para viviendas estén adecuadamente protegidas contra terremotos y tsunamis.

La Norma NTE 0.30, aprobada en 2006 por el MVCS, que ha sido traducida y desarrollada en el SENCICO, da protección adecuada en casos de terremotos. Mediante este proyecto de investigación las construcciones quedan protegidas contra tsunamis, utilizando los últimos adelantos técnico-científicos globales y la experiencia peruana que comenzó a desarrollarse en los años de la década del 80.

Con esta visión de desarrollo de la Guía Práctica de Tsunamis, se puede tener la seguridad de que se logrará un producto valioso, no solamente para nuestro Perú, sino que también se proporcionarán aportes a nivel internacional, al presentarse de manera ordenada los avances técnico-científicos globales, con ingredientes nacionales que son originales.

# **ANEXOS**

# ANEXO I

## PROPUESTA PRELIMINAR PARA LA NORMA PERUANA DE EDIFICACIONES TSUNAMIRRESISTENTES

### 1. VISIÓN HISTÓRICA Y EXPERIENCIAS RECIENTES SOBRE TSUNAMIS

Hasta hace un par de décadas, en general, la estrategia para proteger a los residentes de las zonas bajas inundables por tsunamis, era la evacuación. Esta sigue siendo la principal herramienta no estructural para salvar vidas y proteger la integridad física de las comunidades amenazadas por tsunamis.

Sin embargo, las investigaciones sistemáticas efectuadas después del Gran Terremoto del Este del Japón (GTEJ) del 11 de marzo de 2011, que afectó principalmente la región de Tohoku, que es el sector noreste de Honshu, la principal isla del archipiélago japonés, han demostrado que edificios de concreto armado de 7 o más pisos, con diseño sismorresistente, soportaron sin mayores problemas las altas olas del tsunami generado por un terremoto con período de retorno de 1000 años.

Edificios de acero de la altura mencionada, estructuralmente resistieron el terremoto y posterior tsunami, pero las fachadas y las divisiones internas de los edificios soldados a las estructuras fueron arrastradas por el tsunami, quedando en esqueleto de columnas y vigas.

Varios edificios de concreto armado y de acero de 3-4 pisos fueron volcados o dañados por el sismo y tsunami.

En cambio, las viviendas de madera, por su poco peso y poca resistencia a la presión lateral y debido a la flotabilidad propia de la madera y al aire atrapado debajo de techos, incrementaron su flotabilidad. El tsunami, entonces, las arrancó de sus cimientos y fueron arrastradas, convirtiéndose en peligrosos proyectiles flotantes que causaron numerosas víctimas mortales y daños materiales, y constituyeron millones de m<sup>3</sup> de escombros que tuvieron que ser removidos.

Estas conclusiones del GTEJ, de 2011 o Tohoku, como también se le denomina, dan esperanzas y pautas que demuestran que se pueden concebir, diseñar y construir edificios sismorresistentes y que estas sean a la vez resistentes a las fuerzas que generan los tsunamis.

La costa este de la región de Tohoku, es la subregión de Sanriku, muy susceptible a los efectos de los tsunamis, pues las aguas profundas llegan hasta muy cerca de la costa, por lo que la pérdida por fricción de las olas del tsunami en el fondo oceánico recién empieza a ser significativa, a partir de la isobata de los 100 m.

Las costas de Sanriku tienen un perfil muy accidentado, con sucesión de bahías en forma de U, V y W, que, al angostarse y perder profundidad, concentran la energía tsunamigénica en los vértices de las bahías.

Sanriku ha sido afectada por los tsunamis de 1896, que dejaron cerca de 30 mil víctimas mortales y el tsunami de 1933, que dejó unos 2 mil muertos. El terremoto de Valdivia, Chile, de 1960, con magnitud, 9.5 Mw, fue el más potente registrado hasta la fecha desde inicios del siglo XX, cuando se empezaron a utilizar los registros sismográficos para determinar la magnitud de los terremotos.

El terremoto de Valdivia de 1960 generó un gran tsunami el cual al cruzar el océano Pacífico causó más de un centenar de víctimas en las islas Hawai, Las Filipinas y las costas de Sanriku, donde pereció la mayoría de las personas, a miles de kilómetros de las costas de Chile.

En las costas de Sanriku, la máxima altura del tsunami, en el evento de 2011, fue de 40,5 m, que puede considerarse un caso extremo, pues se trata del vértice de una bahía en forma de V y la isobata de 100 m cerca a la costa.

La foto del día de la NOAA, del 12 de marzo de 2011, fue solamente del noreste de la isla Honshu con la indicación de la magnitud del terremoto, 9.0 Mw, y el epicentro ubicado a 120 km al este de la ciudad de Sendai, capital de la prefectura de Miyagui. Los entendidos en el tema de tsunamis y de la susceptibilidad de la subregión Sanriku a los tsunamis, al observar la foto del día de la NOAA, recibieron el mensaje de que un gran desastre se había producido en las costas de Sanriku. En las horas y días siguientes las noticias e imágenes en la televisión confirmaron el enorme desastre, incluyendo el accidente nuclear de Fukushima 1.

Los estudios iniciales determinaron que el tsunami de Tohoku de 2011 fue un fenómeno con período de retorno de 1000 años. En el año 689 d.C. ocurrió el terremoto y tsunami de Joban-Sanriku, que afectó principalmente la planicie donde se ubica Sendai, la capital de la prefectura de Miyagui con sus más de un millón de habitantes en la ciudad más poblada de las costas de Sanriku, que fue severamente afectada por el tsunami de 2011.

Las pérdidas directas del Terremoto y Tsunami de Tohoku pasaron de US\$ 210 mil millones, sin incluir las pérdidas ocasionadas por el accidente nuclear de Fukushima 1, que consideró compensaciones a las industrias y campos de cultivo de unos 30 km a la redonda debido a la contaminación nuclear. Dicha pérdida pasó a la historia como el desastre más costoso de la historia, hasta la fecha.

De las cerca de 20 mil víctimas mortales del terremoto y tsunami, la gran mayoría perdieron sus vidas por el tsunami, con un importante porcentaje de personas de la tercera edad.

## **2. COMPORTAMIENTO DE EDIFICACIONES FRENTE AL TSUNAMI DE TOHOKU**

La mayor extensión de las costas de Sanriku fueron invadidas por varias olas de 10,0 a 15,0 m de altura. Sus efectos fueron:

- Las viviendas de madera fueron arrancadas de sus bases y arrastradas tierra adentro, convirtiéndose en peligrosos proyectiles flotantes que causaron numerosas muertes e incrementaron los daños materiales.
- Las edificaciones de acero, con columnas y vigas de este material, pero con fachadas y muros de partición prefabricados y soldados a las columnas y vigas, fueron severamente afectadas por el tsunami, quedando sólo la estructura de acero, por donde el agua atravesó los pisos bajos de los edificios sin transmitir mayor presión a la estructura resistente.
- Las edificaciones de concreto armado de 6-7 pisos o más altura, con diseño sismorresistente moderno, y el piso bajo en gran parte libre de obstáculos para el paso de las olas del tsunami, resistió primero las altas aceleraciones del Gran Terremoto del Este del Japón y, luego, el embate de las olas del tsunami, por lo que sus pisos altos fueron utilizados como refugios con evacuación vertical.
- Edificaciones de acero y de concreto armado de 3 a 4 pisos sufrieron volcadura por la presión lateral de las olas del tsunami.

Esta experiencia y la recopilada de anteriores eventos con relación al comportamiento de edificaciones frente a tsunamis ha inspirado la construcción de edificios de refugio con evacuación vertical, por ejemplo en Indonesia.

Están en proyecto o en construcción edificios capaces de resistir sismos y tsunamis en los estados de la costa oeste de los EE.UU., sobre todo en Oregon y Washington, amenazados por la reactivación de la falla de Juan de Fuca, en la zona de subducción de Cascadia. Allí, mediante investigaciones de radiación Carbono 14, se determinó que en el año 1700,  $\pm$  10 años, ocurrió un gran terremoto y tsunami que afectó desde el sur de Canadá hasta el norte del estado de California, con efectos más severos en los estados de la Unión antes mencionados.

### **3. EDIFICACIONES PREDOMINANTES EN LA COSTA PERUANA Y SU PROTECCIÓN CONTRA TSUNAMIS**

Las construcciones predominantes en la costa peruana entre Tumbes y Tacna son viviendas de albañilería y edificios de concreto armado.

Existen relativamente pocas viviendas de material ligero como quincha y madera, las cuales, según la experiencia del Gran Terremoto del océano Índico de 2004 y el Tsunami de Tohoku, indican, son muy vulnerables frente a tsunamis y son fácilmente arrancadas de sus bases desde su cimentación y arrastradas tierra adentro.

Según experiencias de tsunamis anteriores a dichos eventos reportados por investigaciones de la Universidad de Tohoku, con sede en la ciudad de Sendai, olas de sólo 2,0 – 2,5 m de altura bastan para destruir las viviendas de madera.

### **3.1. Viviendas de albañilería y los tsunamis de Pisco de 2007 y el balneario del sur de Camaná de 2001**

Al desarrollar el mapa de peligro multiamenaza de las ciudades de Pisco y San Andrés, dentro del marco del Programa Ciudades Sostenibles (PCS) INDECI-PNUD 1998-2015, se estimó que la altura de la ola del tsunami en las costas de Pisco y San Andrés sería de 2.5 m aplicando la fórmula de Yamaguchi.

Al ocurrir el terremoto de la Región Ica del 15 de agosto de 2007, las olas del tsunami generado invadieron las costas de Pisco y San Andrés con una altura de ola con un promedio de 2,5 m de altura, medidos y verificados por investigadores de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN) de la Marina de Guerra del Perú y también medidos por el Dr. Erick Mas (en la actualidad profesor auxiliar e investigador de la Universidad de Tohoku, Sendai, Japón), al desarrollar su tesis de maestría en la FIC/UNI.

Las olas de 2, m de altura del tsunami atacaron las costas de Pisco (Pisco Playa) y San Andrés. No causaron daños estructurales sobre las construcciones de albañilería, la gran mayoría de un solo piso, algunas pocas edificaciones de dos pisos, y varios edificios de concreto armado de 2 a 4 pisos de altura. Sin embargo, las olas rompieron los vidrios de las ventanas de las viviendas de un piso que estaban alineadas en la primera fila, frente al mar y también los vidrios de los pocos edificios de concreto armado del lugar. Asimismo, varias embarcaciones pesqueras de tamaño pequeño y mediano fueron arrastradas tierra adentro.

Todo parece indicar que los flujos de agua se canalizaron por las calles perpendiculares a la orilla del mar, pues se encontraron embarcaciones varadas en las calles de San Andrés, puerto pesquero artesanal, entre 80 y 120 m de la orilla del mar.

En el caso de Pisco Playa, entre la orilla del mar y el sector ocupado urbanísticamente, existen humedales que disiparon la energía de las olas del tsunami y por esta razón no alcanzó la zona poblada. Allí las viviendas de albañilería sufrieron diversos grados de daño, por la licuación parcial de suelos, así como por la alta intensidad sísmica, de VIII MMI, en Pisco Playa.

### **3.2. Comportamiento de las edificaciones en el balneario al sur de Camaná durante el tsunami generado por el terremoto de la región sureste del Perú, del 23 de junio de 2001**

En el balneario del sur de Camaná predominan las viviendas de albañilería de ladrillo y de bloques de concreto, edificios de concreto armado de 1 y 2 pisos y restaurantes que dan servicios a los residentes y bañistas.

Según el Servicio de Geología de los EE.UU. (USGS), la altura de ola en la costa al sur de Camaná fue de 6,0 m. Inundó unos 600 m tierra adentro, hasta el borde oeste de la carretera Panamericana Sur. En el sector agrícola

que inundó existían plantaciones de zapallos, que fueron transportados hasta el borde oeste de dicha carretera, donde fueron depositados.

Según investigaciones realizadas en Japón, sobre todo en la Universidad de Tohoku, ubicada en Sendai, la pérdida de altura de olas del tsunami en tierra es aproximadamente de 1% con respecto a la altura. Esto quiere decir que por cada 100 m de avance pierde 1.0 m de altura. En ese caso, hay coincidencia en el sentido de que con 6.0 m de altura en la costa, el tsunami avanzó 600 m en tierra. Las investigaciones efectuadas en Japón, en donde seguramente la mayor parte se efectuaron en sectores con relativa poca pendiente, indican lo que ocurre en las planicies de los valles japoneses, colindantes con la orilla del mar, donde predominan los terrenos de cultivo. Ello explicaría esta coincidencia.

El avance de las olas del tsunami es un fenómeno complicado que depende principalmente, de la batimetría a partir de los 100.0 m de profundidad, del perfil de la costa y la topografía en tierra, incluyendo la rugosidad del terreno por donde avanza el tsunami en tierra.

El balneario al sur de Camaná fue atacado por olas cuya máxima altura fue de 6,0 m. Los efectos en las viviendas de albañilería, la mayoría de sólo un piso, fueron los siguientes:

- Las viviendas de la primera fila frente al mar, retiradas unos 15-30 m de la orilla fueron destruidas, primero por el impacto de las olas entrantes y, luego, debido a que las cimentaciones fueron socavadas por el poder erosivo de las olas en receso hacia el mar.
- Algunas otras viviendas en primera fila, cuyos muros no tenían vigas en el borde superior, fueron perforados. La presión sobre los muros perpendiculares al avance de las olas fue reducida cuando existían espacios libres en los muros por donde circularon las olas del tsunami sin restricciones, tanto de entrada como de salida.
- Los daños en las viviendas a partir de la tercera fila, desde la orilla del mar, fueron notoriamente menores que en los de la primera fila. A partir de la quinta fila, hacia atrás, las construcciones casi no sufrieron daños.
- La socavación de la cimentación, excepto en las casas de la primera y segunda fila, casi no fue causa de daños en los muros. Hubo socavaciones de la cimentación entre 0.8 y 1.0 m de profundidad, concentradas en las esquinas de las casas.

### **Edificaciones de Concreto Armado de dos y tres pisos**

Hubo pocas construcciones de concreto armado, la mayoría de dos pisos, que sufrieron daños severos. No se pudo distinguir entre los daños causados por el terremoto en sí y los daños causados por el tsunami. No se pudo notar si ocurrió licuación de suelos, pero, si ocurrieron estos efectos, ellos fueron borrados por las olas del tsunami, que tuvo varias olas sucesivas.

La primera ola fue en retroceso, a unos 10 minutos de ocurrido el terremoto. Unas 60 a 70 personas de Camaná se internaron en el fondo oceánico seco. Luego, fueron atrapadas por la segunda ola que llegó 10 minutos después de la primera ola del tsunami y les causó la muerte. La mayoría de restos humanos no fueron recuperados y se tuvieron que considerar como “desaparecidos”.

Otro caso de edificio de concreto armado afectado por las olas de un tsunami de unos 5.0 m de altura, fue el que se produjo durante el tsunami de Pisco, de 2007. El edificio del Terminal de Pisco, de un solo nivel, fue severamente dañado. Se cree que, tanto por el terremoto como por el tsunami, un restaurant turístico, construido con material ligero, fue arrasado por el tsunami quedando completamente destruido. Allí perdieron la vida tres personas, propietarias del restaurant. Después de la llegada de la primera ola, ellos se quedaron para desalojar el agua que había ingresado al restaurant. Cuando llegó la segunda ola, por dos frentes, dichas personas fueron atrapadas por el tsunami y perdieron sus vidas.

### **Historia de Tsunamis en el Perú y sus Efectos en las Construcciones en las Zonas Inundables**

De los tsunamis ocurridos en el Perú desde el siglo XVI hasta el siglo XX, no se tienen mayores datos de cómo se comportaron las edificaciones; excepto que estas fueron arrasadas. Lo más probable es que se trataba de construcciones muy vulnerables, que fueron afectadas tanto por el sismo como por el arribo del tsunami. Eran en su mayoría viviendas de adobe y materiales ligeros, que fueron completamente destruidas por los tsunamis.

Por ello, ha sido necesario recurrir a investigaciones realizadas después del Gran Tsunami del océano Índico, de 2004, el Terremoto y Tsunami de Maule, Chile, de 2010, y el Gran Terremoto del Este del Japón (GTEJ) o Tsunami de Tohoku, de 2011.

Las enseñanzas más significativas de los eventos catastróficos ocurridos, para los objetivos del planteamiento de una primera aproximación, que conduzca a un proyecto de Norma para Edificios Tsunamirresistentes y, luego, a la respectiva norma, son:

- El tsunami del océano Índico, tuvo su falla geológica generadora del gran tsunami, de unos 1000 km, esencialmente de sur a norte, desde el noreste de la isla de Sumatra hasta las islas Ramadán, jurisdicción de la India. A parte de severos daños causados por el tsunami en la costa cercana al origen del gran tsunami, los daños más severos ocurrieron en la costa este de la isla - Estado Bangladesh, cuyas costas se alinearon prácticamente de forma perpendicular a la dirección de la falla generadora del terremoto y del tsunami. Este resultado concuerda con las conclusiones de la Guía para el Diseño de Estructuras para Evacuación Vertical de Tsunamis FEMA-646 de abril de 2012, en el sentido de la marcada direccionalidad de la propagación de los tsunamis desde su origen.

- 
- El Gran Tsunami del océano Índico afectó las costas o islas ubicadas dentro del mismo, causando 230 mil víctimas mortales, que perecieron por no tener idea de lo que era un tsunami. Tampoco existía un Sistema de Alarma contra Tsunamis, que ahora si existe, a todas luces de manera tardía.
- Un ingeniero estadounidense estudió en detalle cientos de ubicaciones de socavación de cimentación de edificaciones de todo tipo, llegando a la conclusión de que en ningún caso la profundidad de socavación paso de los 2,0 m.
- En algunas edificaciones que tenían el primer nivel libre, de unos 9.0 m de altura, se encontró arena en los techos indicando que la altura de la ola del tsunami sobrepasó los 9,0 m de altura. Estas construcciones no sufrieron daños a causa del tsunami.

### **3.3. Enseñanzas del Terremoto de Maule, Chile de 2010**

- Los daños causados por el tsunami fueron severos en la costa cercana a la falla generadora del terremoto y tsunami. Los materiales arrastrados tierra adentro fueron restos de construcciones y de materiales ligeros y en zonas portuarias por el impacto de contenedores.
- Los daños causados por licuación de suelos, se produjeron a lo largo de unos 800 km, mientras que la falla que se activó, tuvo una longitud de 400 km paralelos a la costa chilena. La zona macrosísmica se extendió prácticamente desde la Región Metropolitana de Santiago de Chile y llegó hasta la región Araucana en el sur. Se trata de regiones muy lluviosas, lo que indica la presencia de agua en múltiples lugares. El agua cercana a la superficie del suelo es esencial para que ocurra licuación de suelos.  
Lo ocurrido en el terremoto de Maule, Chile de 2010, contrasta con lo ocurrido en el terremoto del sureste del Perú de 2001, que comprendió los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, regiones muy secas, pues no son sino la prolongación del desierto de Atacama, del norte de Chile, la región más árida del mundo. En el sureste del Perú, en el 2001, sólo ocurrió licuación de suelos en muy pocos lugares, donde la presencia de agua era evidente.
- Desde los terremotos de Chillan de 1939, cuando perecieron unas 30 mil personas y después del gran terremoto de Valdivia de 1960, el de mayor magnitud de los ocurridos globalmente desde inicios del siglo XX, en general los ciudadanos chilenos tenían muy buen conocimiento sobre terremotos y tsunamis. Por ello, a pesar de que la alarma de tsunamis fue oficialmente cancelada, la gran mayoría de residentes en zonas inundables por tsunamis, abandonaron los sectores bajos inundables y evacuaron hacia zonas altas, salvando sus vidas. Se hace notar que la mayoría de las áreas portuarias chilenas tienen señaladas las zonas inundables, las rutas de evacuación y las zonas de refugio.

### 3.4. Enseñanzas del Tsunami de Tohoku, Japón, de 2011

- Los resultados de las investigaciones realizadas a lo largo de las costas de la región Tohoku, han dejado valiosas enseñanzas en lo que respecta al comportamiento de edificaciones frente al gran terremoto y tsunami del Este del Japón de 2011.
- La altura de ola para los estudios efectuados, estuvo en general, en el orden de 10 a 15 m, en las costas investigadas. Hubo alturas mayores, hasta algo más de 40 m, pero aquello ocurrió cuando las aguas profundas estaban cercanas a las costas y tenían perfiles geográficos muy accidentados, con sucesivas bahías en forma de U, V y W, que concentraron la energía del tsunami en el vértice de las bahías.
- Las viviendas de madera y otros materiales livianos fueron arrancadas de sus cimientos y arrastradas tierra adentro, convirtiéndose en peligrosos proyectiles flotantes.  
Se sabía, debido a tsunamis anteriores, que las construcciones de madera son muy vulnerables frente a tsunamis y que se destruyen con olas de apenas de 2,5 m de altura por la poca resistencia lateral frente a las presiones hidráulicas y su flotabilidad, pues debajo de los techos se forma una gran burbuja de aire atrapada que incrementa su flotabilidad.
- Varios edificios de concreto armado y de acero de 3 a 4 pisos fallaron por volcamiento, no por la presión lateral de las olas del tsunami. Las fallas de su conexión al suelo indicaron que eran lo suficientemente resistentes como para resistir al volcamiento.
- Los edificios de acero de altura de varios pisos, de 6 a 7 en general, no sufrieron daños estructurales; sin embargo, las fachadas y muros internos de partición soldados a las columnas y vigas de acero fueron arrancados de la estructura de acero, quedando en esqueleto, permitiendo que las olas del tsunami atravesaran los pisos bajos de dichos edificios, sin transmitir mayor presión a la estructura de acero.
- Las edificaciones de concreto armado de unos 6 pisos o más resistieron sin mayores problemas el terremoto y luego las olas del tsunami, sirviendo sus pisos altos como refugios contra el tsunami, mediante la evacuación vertical.
- En el terremoto de Tohoku de 2011, las mayores pérdidas en edificios e infraestructura se produjeron por licuaciones de suelos aun a grandes distancias. como en la ciudad de Chiba, ubicada a unos 300 km del foco del sismo y 40 km al este de Tokio.

Se realizaron detalladas investigaciones de la Universidad de Chiba, efectuadas en el sector Mihama, enteramente reclamado al mar, utilizando materiales del fondo oceánico de la bahía de Tokio. Los investigadores esperaban que la licuación de suelos se produjera de manera casi uniforme, pero no fue así, siendo más errática. Después de estudiar el método de bombeo, determinaron que cerca de la boca de salida de la tubería de bombeo se depositaron arena fina y algo de limo, mientras que a mayor distancia el suelo fue muy fino, de arcilla y limo. Las licuaciones más severas se produjeron en suelos de arena fina con algún contenido de limo, cerca de la boca de salida de las tuberías. Mientras que a mayor distancia, donde predominaba el limo y la arcilla,

casi no ocurrió licuación, a pesar de que la Prueba de Penetración Estándar (SPT) daba valores menores en la arcilla y limo, que en el caso de arena fina y limo. La arena fina con bajo contenido de limo es muy conocida por la práctica de la ingeniería geotécnica.

#### **4. EDIFICACIONES EN SECTORES INUNDABLES POR TSUNAMIS**

Según la experiencia del comportamiento de edificaciones, a nivel global y en el Perú, frente a tsunamis, y las características de los edificios más comunes que se construyen a lo largo de la costa del Perú entre Tacna y Tumbes, se propone lo siguiente:

##### **1.1. Construcciones de Madera**

- Se prohíbe la construcción de edificaciones de madera y otros materiales ligeros que sean muy vulnerables frente a tsunamis, porque incluso con olas de 2.5 m de altura sufrirían severos daños. Debido a su poca resistencia lateral frente a la presión de las olas de tsunamis son arrancadas de su cimentación y arrastradas tierra adentro, convirtiéndose en peligrosos proyectiles flotantes que han causado numerosas víctimas y han incrementado de manera significativa los daños materiales.
- Si existen construcciones de madera y otros materiales livianos en sectores ya poblados frente al mar, estos deben erradicarse, pues constituyen un alto riesgo para sus habitantes y para el resto de los residentes de las zonas inundables por tsunamis.

##### **1.2. Edificios de Albañilería**

Respecto a los materiales de construcción, las edificaciones más comunes a lo largo de la costa peruana son las viviendas de albañilería.

La Albañilería Confinada, CH-70, desarrollada por egresados de la FIC/UNI en Chimbote entre 1970 y 1974, ha demostrado ser altamente resistente a los sismos. Es un método económico y es fácil de construir, por la amplia aplicación de viviendas de albañilería, a nivel global.

En el terremoto de la Región Ica de 2007, en el barrio residencial de la ciudad de Ica y varias ciudades de la región macrosísmica, como en Pisco, Cañete y otros lugares, las viviendas de albañilería con densidad de muros igual o mayores que 3% en ambas direcciones, y con columnas y vigas de concreto armado confinando todos los muros, formaron un sistema espacial continuo, y de las uniones de columnas de refuerzo y vigas de amarre, con sus uniones diseñadas de acuerdo con las Normas ACI, no sufrieron daños hasta intensidad VIII MMI.

Durante el tsunami del sur de Camaná, de 2001, con olas de tsunamis en la costa de más de 6,0 m de altura reportadas por el Servicio de Geología de los EE.UU. (USGS), las viviendas construidas en la primera fila, frente al mar, sufrieron severos daños debido al impacto de las olas del tsunami y a la

socavación de la cimentación, en la fase recesiva de las olas durante su regreso al mar, cuando adquieren mayor velocidad y poder erosivo. Esto puede explicar el por qué, en ambos casos, la profundidad de erosión no pasó de 1,5 m en la cimentación de varias casas. Se recuerda que tras el tsunami del océano Índico, de 1994, en numerosas investigaciones efectuadas en las zonas afectadas, se determinó que la profundidad de socavación de la cimentación, no habría sobrepasado los 2,0 m.

### **1.3. Diseño y Construcción de Edificios de Concreto Armado Tsunamirresistentes. Lineamientos Generales**

#### **1.3.1. Introducción**

Los últimos tsunamis ocurridos en el Perú (Camaná, 2001; Pisco, 2007) y, a nivel global (Sumatra, 2004; Chile, 2010; Japón, 2011 y Chile, 2015), han dejado lecciones aprendidas que han motivado el interés de diversos investigadores a nivel nacional e internacional por tratar de comprender los efectos de los sismos y, sobre todo, los complejos efectos de los tsunamis sobre las edificaciones e infraestructuras.

En todo el litoral peruano y más aún en la costa central del Perú viven numerosas personas que trabajan o residen cerca al mar, amenazados permanentemente por tsunamis. En el caso de ocurrencia de tsunamis de origen cercano, sólo se dispondrá de unos pocos minutos, entre 10 y 30 min, para evacuar las zonas inundables. Además, la base de datos de tsunamis, así como los estudios de acoplamiento intersísmico entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, indican que existe una alta probabilidad de ocurrencia de sismos tsunamigénicos en la costa central y sur del Perú, de acuerdo con la distribución de las llamadas zonas de silencio sísmico (*seismic gap*, en inglés). Frente a esta realidad, aún no se tienen en el Perú normas para evaluar los efectos producidos por los tsunamis, sobre las edificaciones y las estructuras, y tampoco se han identificado aquellas construcciones que son vulnerables frente a los tsunamis.

Entre los códigos y guías de diseño, sólo cuatro en el mundo consideran las cargas inducidas por tsunamis, basándose principalmente en las experiencias recogidas de tormentas, huracanes y, últimamente, debido a las investigaciones sobre las características particulares de los efectos de la inundación por tsunamis en las zonas costeras, utilizando ensayos experimentales realizados en EE.UU. y Japón. Por otro lado, las lecciones aprendidas en los últimos eventos, principalmente tras el terremoto y tsunami que afectó al Japón en 2011, nos revelan la gran necesidad de evaluar el comportamiento de las estructuras ante las fuerzas generadas por el flujo de inundación de un tsunami y el impacto de los escombros. Muchas personas salvaron sus vidas escapando hacia edificios altos que pudieron ser capaces de resistir las acciones inducidas por el tsunami, aun cuando no fueron específicamente diseñadas para tales fines, pero que si eran

sismorresistentes. Se estima que estos efectos podrían alcanzar e incluso exceder las fuerzas horizontales producidas por el sismo.

Es importante definir criterios de diseño específicos e implementar construcciones especiales en caso de emergencia que puedan ser capaces de resistir primero el sismo y después los efectos del impacto del tsunami.

Se proponen dos criterios de estabilidad: criterio de seguridad ante flotación y criterio de seguridad ante volteo, para que una edificación no se voltee ante el impacto de un tsunami. Se estima que el edificio tsunamirresistente debe tener por lo menos seis pisos o niveles para cumplir con los criterios de estabilidad propuestos.

### **1.3.2. Características de formación de bores y surges debidos a tsunamis.**

#### **Algunas características importantes de los tsunamis**

En la fuente, un tsunami está compuesto de un amplio rango de componentes de olas, con longitudes de onda desde cortas a largas. Las de longitud larga se propagan más rápido. Así, olas con período largo, como de varias decenas de minutos, son los llamados tsunamis transoceánicos. Las olas con período corto son disipadas por radiación y dispersión.

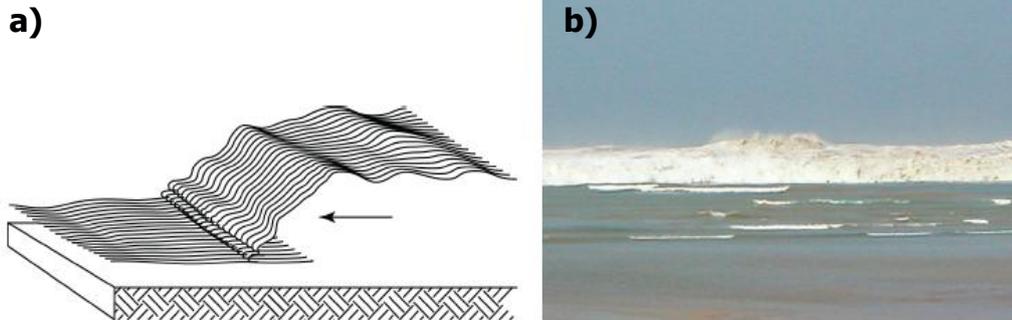
Se define al “*run up*” como: a) La diferencia entre la elevación de la máxima penetración del tsunami (línea de inundación) y el nivel del mar en el momento del tsunami; b) La elevación alcanzada por el agua de mar medida relativa a algún nivel de referencia establecido (nivel medio del mar, nivel del mar al momento del ataque del tsunami, etc.) y que es medida de manera ideal en un punto que es el máximo local de la inundación horizontal. Cuando la elevación no es medida en el máximo de la inundación horizontal, se denomina frecuentemente como altura de inundación.

Las alturas de *run up* varían de manera importante debido a las condiciones del sitio. La batimetría y la topografía del lugar tienen marcados efectos en las características de inundación resultantes. La configuración de las plataformas continentales y la línea costera también impacta en los fenómenos de refracción, reflexión y disminución de profundidad.

Usualmente se espera que una zona costera sea impactada por varias olas de tsunami, donde la primera ola no necesariamente es la más grande.

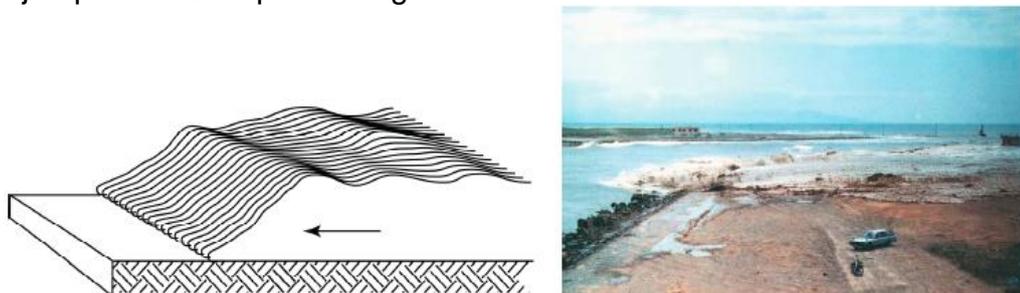
Respecto a la forma en que una ola de tsunami llega a la costa y se propaga tierra adentro, ha quedado evidenciado, con registros visuales (videos y fotografías), que una ola de tsunami se rompe cerca de la

línea costera formando lo que se conoce como “bore” (una larga rompiente de ola que se propaga sobre un cuerpo de agua en reposo y que tiene un incremento abrupto de la profundidad de agua en el frente cubierto con agua turbulenta) o series de bores a medida que este se aproxima a la costa (Ver F-A.1).



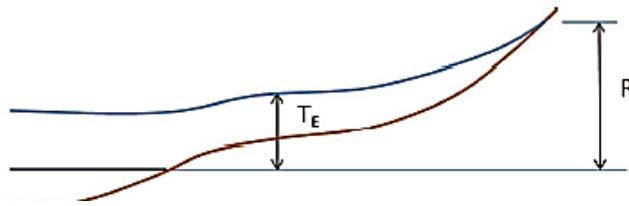
**F-A.1.** a) Esquema de un bore y en b) Foto representativa. (Nótese el lecho de agua existente sobre el que viaja el flujo de agua con frente turbulento). Fuente: FEMA P646. (2012).

Después de que un bore alcanza la costa, este flujo avanza rápidamente sobre el terreno seco y ocurre lo que se conoce como “surge” (ver F-A.2). Cuando se tiene el caso de una ola de longitud grande y un tsunami de origen lejano que llega a tierra sobre una pendiente pronunciada, el *run up* puede ser como un ascenso y descenso de agua, es decir, un surge de inundación; el tsunami que llegó al Japón, como resultado del sismo de Chile en 1960, es un ejemplo de este tipo de surge.



**F-A.2.** Esquema de un surge y una fotografía representativa. Nótese que la masa de agua turbulenta viaja sobre lecho seco. Fuente: FEMA P646. (2012)

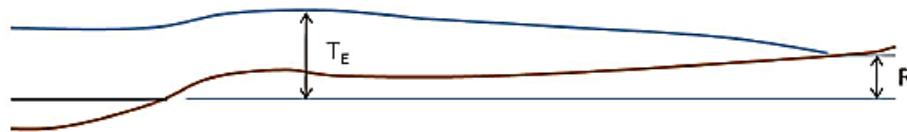
Como ya se comentó, las profundidades de inundación varían significativamente por condiciones de sitio mar adentro (batimetría) y en la costa (topografía). La Figura F-A.3 muestra tres posibles casos de inundación como consecuencia de estos factores. Aquí se nota cómo estos factores pueden afectar la elevación máxima del tsunami (TE) y la mayor elevación de *run up* tierra adentro ®.



a) Costa de topografía pronunciada. Por ejemplo, acantilados en Sanriku, Japón.



b) Topografía moderada tierra adentro, después de un puerto. Por ejemplo, el puerto de Onagawa, Japón.



c) Topografía plana tierra adentro, después de dunas de playa. Por ejemplo, llanura de Sendai, Japón.

**F-A.3.** Tres tipos de inundación de tsunami. Nótese que la elevación del tsunami ( $T_E$ ) en el sitio de interés puede ser diferente o igual que la máxima elevación del *run up* tierra adentro. Fuente: FEMA P646. (2012)

Para la propuesta de norma de FEMA 646 (2012), aplica el caso b) de la F-A.3. Sin embargo, datos más precisos pueden ser obtenidos a través de modelos numéricos de inundación para el sitio de interés.

### Parámetros importantes para el diseño estructural

#### **Run up de diseño**

Debido a que las condiciones locales de sitio producen importantes variaciones en las alturas del *run up* del tsunami y que existe incertidumbre en los modelos numéricos de inundación de tsunamis, se recomienda que la elevación de *run up* de diseño ( $R$ ) sea tomada como 1.3 veces la máxima elevación del *run up* calculado ( $R^*$ ), para tomar en cuenta la variabilidad en la estimación por medio de modelos numéricos. Se ha demostrado, a través de comparaciones entre predicciones numéricas y registros reales, que este factor de seguridad es adecuado (Yamazaki et al., 2011).

#### **Profundidad de inundación local**

Es la diferencia entre la elevación máxima de inundación local en el punto de interés y la elevación del terreno en ese mismo punto. En otras palabras, es la profundidad de agua medida desde la base de la estructura (nivel del terreno) hasta el nivel de inundación máximo. En este trabajo de investigación, se denotará este parámetro como “ $h$ ”.

## **Densidad del agua**

Ya que el flujo del tsunami es una mezcla de agua de mar y sedimentos (basado en la suposición de que el volumen de concentración de sedimentos verticalmente promediado no excede el 5% en agua de mar), la densidad del fluido en consideración debería ser tomada como 1,1 veces la densidad del agua fresca (FEMA P646, 2012):

$$\rho_s = 1100 \text{ kg/m}^3 = 2.13 \text{ slugs/ft}^3$$

## **Velocidad del flujo**

Para la predicción de las velocidades del flujo en el sitio de interés, se asume que los modelos de inundación numéricos proporcionan la mejor estimación, además de proveer la historia completa en el tiempo del flujo de velocidades y profundidad de inundación en el punto de interés.

Como alternativa se pueden usar herramientas analíticas para la predicción de velocidades. Estas expresiones son muy útiles para estimar y para revisar la validez de resultados más precisos, usando herramientas numéricas.

## **Dirección del ataque del flujo.**

Tan importante como determinar la velocidad del flujo, es definir la dirección del flujo en el sitio de interés. Especialmente si se quieren considerar sistemas duales, será de extrema importancia colocar estos muros paralelos a la dirección del flujo esperado de manera que se pueda disminuir la fuerza de presión total sobre la estructura y las presiones en elementos estructurales. Asimismo, conocer por adelantado la dirección del flujo nos permitirá reconocer qué elementos estarán sujetos a las fuerzas de impacto de escombros y así tomar medidas para evitar colapsos locales o el colapso progresivo de la estructura.

## **Estimación de fuerzas debido al impacto de tsunamis en elementos estructurales**

### **Lineamientos para el diseño de edificios Tsunamirresistentes**

#### **Estimación de Fuerzas Laterales**

#### **Fuerzas hidrostáticas**

Se originan cuando la inundación debida al tsunami se produce de manera lenta (situación parecida al aumento rápido de la marea) y en zonas en las que se encuentran diferentes profundidades de agua.

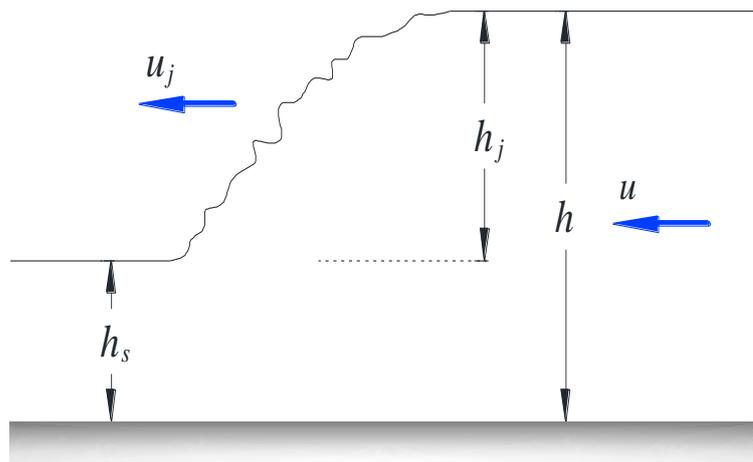
La mayoría de códigos y guías deja de lado el efecto de la velocidad en la fuerza hidrostática. Por ejemplo, FEMA P646 considera:

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_s g b h_{\max}^2 \quad (\text{A.01})$$

Dónde:  $\rho_s$  es la densidad del fluido, incluido, los sedimentos (1200 kg/m<sup>3</sup>=2.33 slugs/ft<sup>3</sup>),  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $b$  es el ancho del elemento estructural,  $h_{\max}$  es la máxima altura de inundación, por encima de la base del elemento. El punto de aplicación de la resultante, para cada caso particular, se obtendrá considerando una distribución triangular de presión.

### Velocidad de avance del bore

*Propagación del bore sobre lecho con agua:*



**F-A.4.** Equivalencia del resalto hidráulico aplicado a la propagación del bore (Fuente: Mohamed, 2008).

En la F-A.4.,  $h_s$  es la profundidad de las aguas en reposo,  $h_j$  es la altura del resalto o del bore entrante,  $h$  es la altura total del bore,  $u_j$  es la velocidad de avance del bore y  $u$  es la velocidad post-bore (se suponen uniformes).

Entonces, la *velocidad del bore* es:

$$u_j = \left[ \frac{g}{2} h \left( \frac{h}{h_s} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (\text{A.02})$$

La Ec. 4.02, es válida para valores de  $0.1428 \leq k = h_s/h \leq 0.56$ , será muy útil para poder estimar las fuerzas en secciones posteriores debido a que la altura total del bore será un dato proporcionado por algún modelo numérico de inundación por tsunami o de inspecciones de campo; el valor de  $h_s$  sería la profundidad de inundación dejada por una ola anterior (condiciones previas de inundación).

**Propagación del bore sobre lecho seco (“surge”):**

FEMA P646 (2008), propone que la velocidad del flujo sobre una pendiente uniforme, sin variaciones topográficas laterales, sea estimada de la siguiente manera:

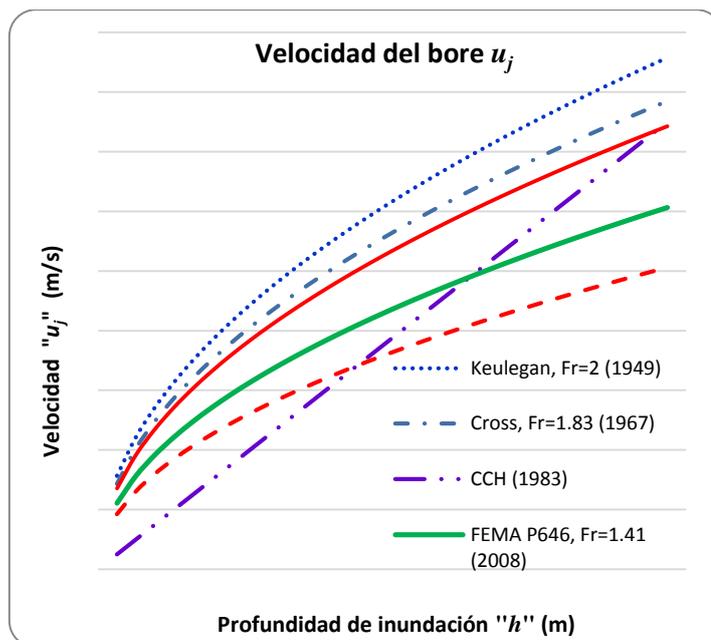
$$u_j = \sqrt{2gR \left(1 - \frac{z}{R}\right)} \quad (\text{A.03})$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $R$  es la elevación de *run up* de diseño y  $z$  es la elevación del suelo en la base de la estructura.  $R = 1.3R^*$  Donde  $R^*$  es la máxima elevación de *run up* en la estructura determinada de una simulación numérica o la elevación del suelo correspondiente a la penetración máxima del tsunami disponible de los mapas de inundación del tsunami. Esta velocidad representa la velocidad del flujo de la lengua frontal del bore, donde la profundidad del flujo es mínima (i.e., la Ec. (A.03) proporciona la velocidad máxima). Si aceptamos que la altura total del bore  $h$  es igual a la profundidad de inundación máxima calculada como la diferencia entre  $R$  y  $z$ :

$$h = 1.3R^* - z = R - z \quad (\text{A.04})$$

La Ec. (A.03) se puede modificar de la siguiente manera:

$$u_j = 2^{1/2} \sqrt{gh} \quad (\text{A.05})$$



F-A.5. Velocidad de avance del bore.

En la F-A.5. se muestran las diferentes teorías para estimar la velocidad media de avance del bore. Con fines de comparación, se han incluido las velocidades del surge (avance sobre lecho seco) considerando la altura  $h$ , a pesar de haberse discutido estas teorías. Ya que se ha reconocido la variabilidad del enfoque de Mohamed, respecto a la capa de agua en reposo  $h_s$ , se muestran dos casos:  $u_{20}$  y  $u_{56}$ , que corresponden a la Ec. (A.02) cuando  $k=0.20$  y  $k=0.56$ , respectivamente.

La **velocidad post-bore** ' $u$ ' para estimar las **fuerzas hidrodinámicas de arrastre** del flujo subsecuente que se produce después de que el bore impacta con los elementos estructurales es (considerando  $k = h_s/h$ )

$$u = u_j (1 - k) \quad (A.06)$$

### Fuerzas hidrodinámicas máximas

Son causadas por el lado frontal del surge o bore cuando impacta con una estructura o en parte de ella. En la presente investigación se hará mención principalmente a los trabajos realizados por Mohamed (2008), Santo (2009) y Paczkowski (2011), debido a que llevaron a cabo experimentos a gran escala usando las instalaciones de los laboratorios de la Oregon State University (OSU)

Por otro lado, Asakura et al. (2000), propusieron estimar la máxima fuerza hidrodinámica como la fuerza hidrostática producida por tres

veces la profundidad de inundación (basándose en condiciones de lecho seco), dando un factor de  $\alpha = 4.5$ :

$$F_s = \frac{1}{2} \rho g B (3h)^2 \quad (\text{A.07})$$

También, Cross (1967), incluyó un término hidrostático y propuso la siguiente ecuación:

$$F_s = \frac{1}{2} \rho g B h^2 + \rho B h u^2 \quad (\text{A.08})$$

FEMA P646 (2008) estima la componente hidrodinámica de la fuerza hidrodinámica máxima (de impulso) como:

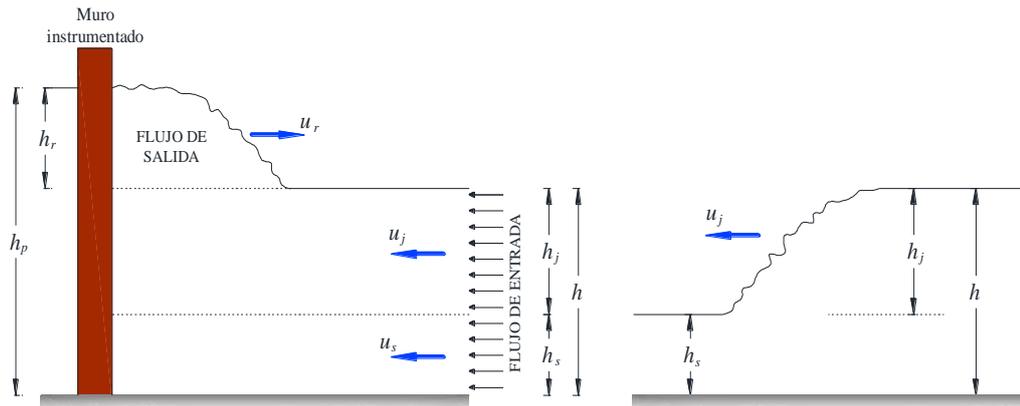
$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_d B (hu^2)_{\max} \quad (\text{A.09})$$

Donde  $C_d$  es el coeficiente de arrastre y se recomienda que sea tomado igual a 3. La combinación  $hu^2$  representa el flujo de momento por masa unitaria. Se debe diferenciar entre  $(hu^2)_{\max}$  y  $h_{\max} u_{\max}^2$  (la profundidad de flujo máxima y la velocidad de flujo máxima no ocurren al mismo tiempo en un sitio particular). Entonces, la fuerza hidrodinámica debe basarse en el flujo de momento por unidad de masa máximo  $(hu^2)_{\max}$  que ocurre en un lugar determinado en un momento dado durante el tsunami. Este valor puede ser obtenido mediante un modelo numérico de inundación o puede ser estimado con la siguiente expresión:

$$(hu^2)_{\max} = gR^2 \left( 0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right) \quad (\text{A.10})$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $R$  es la elevación de *run up* de diseño y  $z$  es la elevación del suelo en la base de la estructura.  $R = 1.3R^*$  donde  $R^*$  es la máxima elevación de *run up* en la estructura determinada de una simulación numérica o la elevación del suelo correspondiente a la penetración máxima del tsunami disponible de los mapas de inundación de tsunamis. Debido a las incertidumbres en los modelos de inundación de tsunamis, los valores numéricos predichos de  $(hu^2)_{\max}$  no deberían tomarse menores al 80% de los valores estimados con la Ec. (5.10).

Recientemente, se ha desarrollado un enfoque basado en teorías hidráulicas validado con éxito en base a ensayos a gran escala (Paczkowski et al., 2011). En la Figura F-A.6., se muestra el modelo de la *fuerza de impacto máximo* que ejerce el bore en un muro:



**F-A.6.** Esquema de un bore cuando impacta contra un componente estructural y se genera un flujo recesivo de salida de altura  $h_r$ . (Fuente: Paczkowski, 2011).

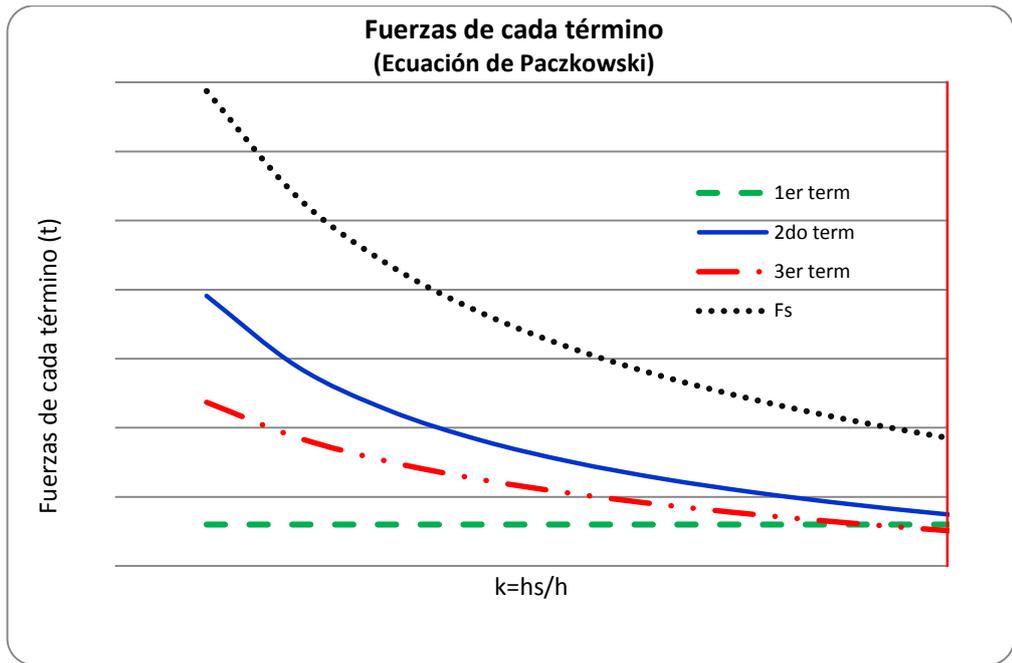
Donde los términos de la figura de la izquierda ya han sido descritos.  $h_r$  es la altura del flujo recesivo que resulta de la reflexión del fluido entrante y  $u_r$  es su velocidad,  $h_p$  es la altura total acumulada después del primer impacto del bore. Se asume que cada una de las velocidades de las capas de fluido  $u_s, u_j$  y  $u_r$  son uniformes.

Para este modelo, la *fuerza hidrodinámica máxima* es:

$$F_s = \frac{1}{2} \rho g B h^2 + \rho B (h - h_s) u_j^2 + \rho g^{1/3} B [(h - h_s) u_j]^{4/3} \quad (\text{A.11})$$

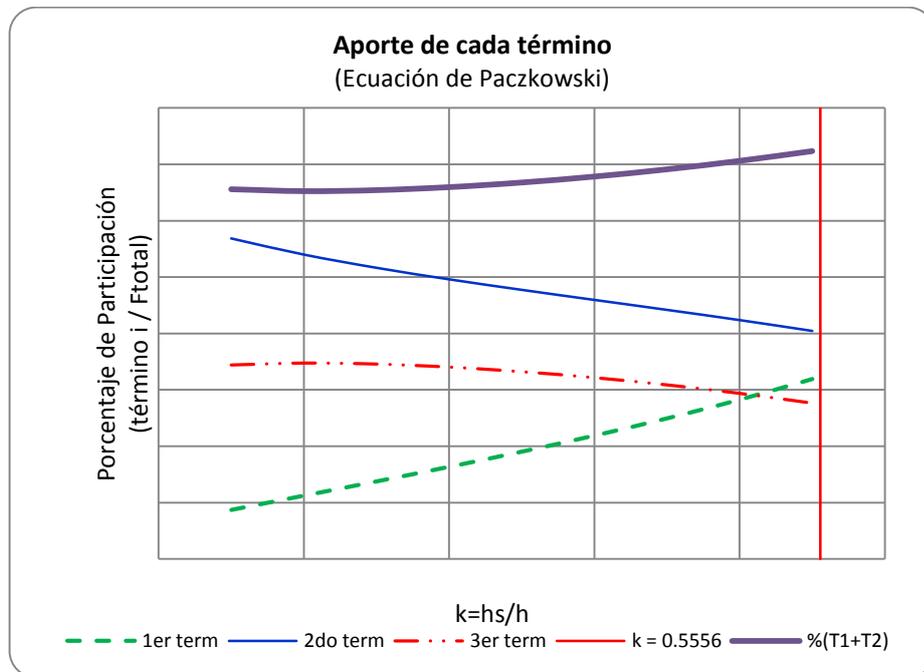
Donde la velocidad del bore  $u_j$  será estimada con la Ec. (A.02). De esta manera, la estimación de la fuerza hidrodinámica máxima estará basada en las únicas variables de entrada  $h$  y  $h_s$ . El primer término de la Ec. (A.11) representa el aporte hidrostático de la altura total del bore  $h$ , el segundo y tercer término representan la cantidad de movimiento del flujo de entrada y de salida, respectivamente.

En la F-A.7., se muestra la variación de la fuerza total  $F_s$  y de sus componentes respecto a  $k = h_s / h$ .



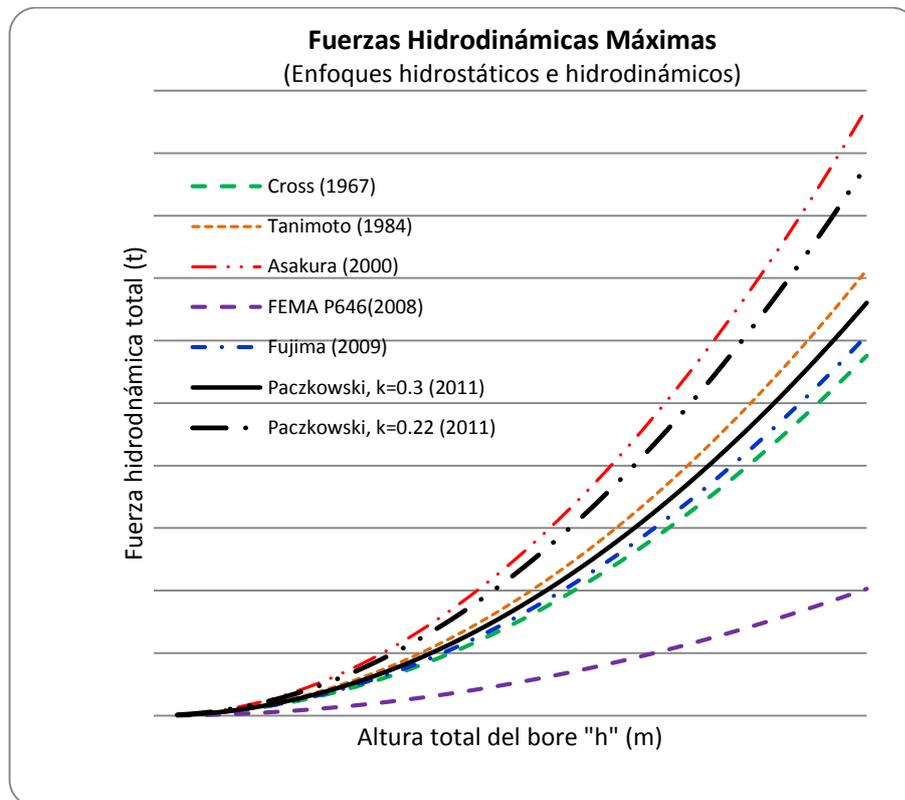
**F-A.7.** Cómputo de cada término de la Ec. (A.11) para una altura total de bore igual a 1 m en función de  $k$ .

Para apreciar mejor el aporte y la variación de cada término, se consideraron las razones de las fuerzas de cada término respecto a la fuerza total con los valores de  $k$ , F-A.8.



**F-A.8.** Porcentaje de aporte de cada término respecto a la fuerza total.

En la F-A.9., se muestran, comparativamente, todas las teorías descritas. La fuerza hidrodinámica máxima usando el enfoque de Paczkowski se determinó para  $k = 0.50$ .



**F-A.9.** Fuerzas hidrodinámicas calculadas usando las diferentes teorías descritas.

### Consideraciones importantes:

- Los enfoques hidrostáticos fueron desarrollados considerando condiciones de lecho seco (“surge”).
- La inundación por tsunamis generada por actividad sísmica es un proceso causado por un conjunto de olas sucesivas. La altura máxima de inundación es aquella generada por la ola más grande que, generalmente, no es la primera.
- Las teorías de velocidad de Mohamed y de fuerza de Paczkowski fueron desarrolladas para casos de lecho con agua (avance de un bore); i.e. inundación previa causada por una ola menor.
- Estudios de ingeniería de tsunamis más detallados establecerán la condición real para cada caso particular.

Por lo tanto, para estimar de manera razonable las fuerzas hidrodinámicas que se ejercerán sobre la estructura y sus componentes, correspondiente a determinado evento sísmico generador del tsunami, no basta sólo con conocer la altura máxima de inundación que produce determinada ola, sino también las condiciones anteriores de inundación.

## Ecuación simplificada

Resulta conveniente contar con alguna expresión que conserve la simplicidad del tratamiento hidrostático (basado solamente en la profundidad de inundación máxima) y que tenga la capacidad de estimar fuerzas hidrodinámicas considerando las condiciones previas de inundación (formulación hidrodinámica de Paczkowski). Una ecuación simplificada que brinda la misma aproximación que la Ec. (A.11) es:

$$F_s = \lambda \cdot \rho g B h^2 \quad (\text{A.12})$$

Dónde:

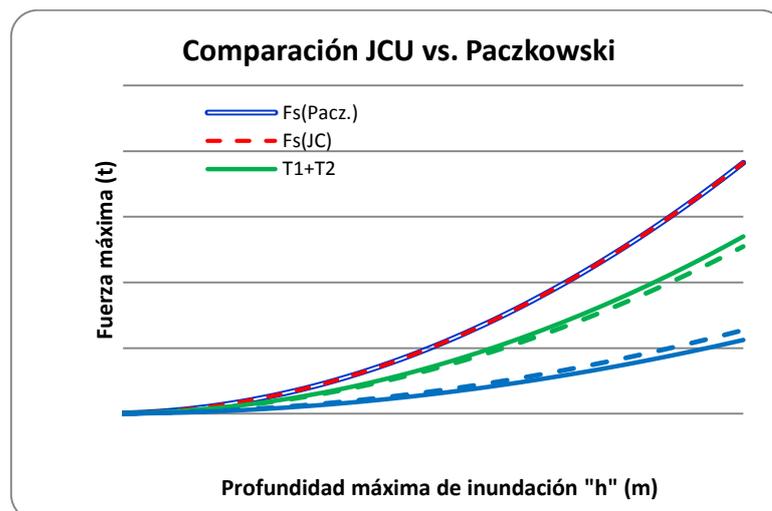
$$\lambda = \frac{1}{2} + \frac{1-k^2}{2k} + \left[ \frac{(1-k)(1-k^2)}{2k} \right]^{2/3} \quad (\text{A.13})$$

Ahora, si recordamos el análisis realizado a la F-A.8., podemos escribir aproximadamente el aporte del primer y segundo término (T1+T2), y del tercero (T3) de la ecuación de Paczkowski como:

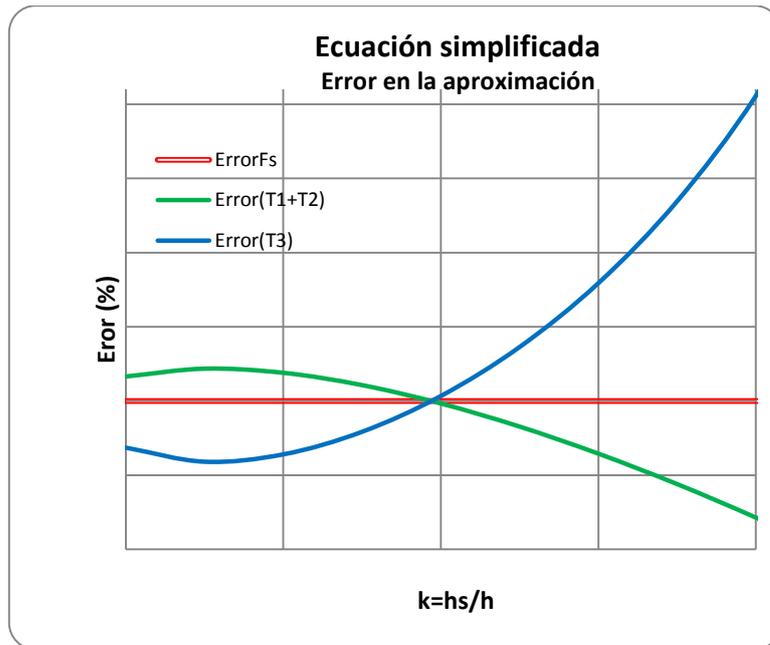
$$F_{s(1+2)} = \frac{2}{3} F_s = \frac{2}{3} \lambda \cdot \rho g B h^2 \quad (\text{A.14})$$

$$F_{s(3)} = \frac{1}{3} F_s = \frac{1}{3} \lambda \cdot \rho g B h^2 \quad (\text{A.15})$$

En las siguientes figuras se muestran las aproximaciones que se logra con estas ecuaciones simplificadas respecto a la ecuación de Paczkowski y también los errores relativos.



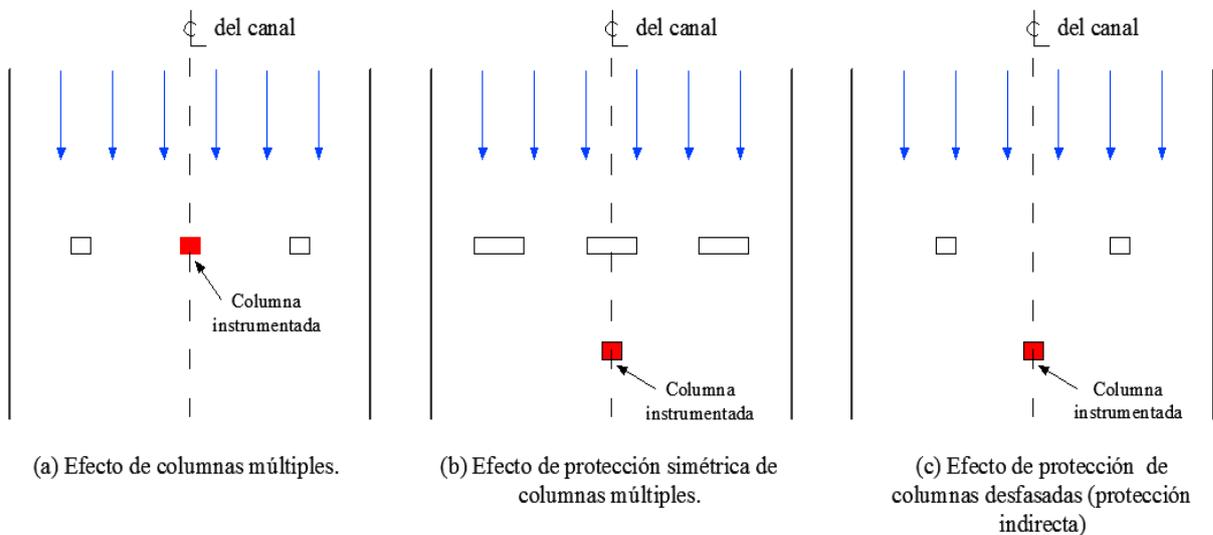
**F-A.10.** Aproximación utilizando las ecuaciones simplificadas.



**F-A.11.** Error en las ecuaciones propuestas respecto a los aportes (T1, T2, T3) de la ecuación de Paczkowski.

**Observaciones adicionales sobre columnas (Santo, 2010)**

Santo (2010), utilizando experimentos a gran escala y pensando en situaciones típicamente encontradas en edificaciones, investigó las fuerzas ejercidas por bores en diferentes dimensiones de elementos verticales: columnas de 50mm x 50mm, 100mm x 50mm, 150mm x 50mm y 300mm x 50mm; y el efecto de diferentes configuraciones: columnas individuales, columnas múltiples y columnas protegidas por otras columnas de manera simétrica directa e indirectamente (Ver F-A.12.).



**F-A.12.** Representación de diferentes configuraciones de columnas – Casos típicamente encontrados en edificios. (Fuente: Santo y Robertson, 2010).

El efecto de la *presencia de múltiples columnas* (en cuanto a fuerza), F-A.12. (a), sobre la columna central dependerá de las dimensiones de las columnas respecto al ancho total del canal. La relación entre la suma de dimensiones de todas las columnas en la misma línea y el ancho del canal representa la obstrucción al flujo y se denomina “cierre”; por ejemplo, si se tiene tres columnas de 150 mm×50 mm (la parte más ancha perpendicular al flujo) y el ancho del canal es de 2133mm, se dice que esta configuración tiene un cierre del 21%. Se recomienda considerar un incremento en la fuerza hidrodinámica de un 25% cuando se tenga un cierre mayor a 40%.

El *efecto de escudo* que brindan tres columnas a una sola que está detrás, F-A.12 b y c, tiende a reducir la fuerza en esta última en un 10% a 20% a medida que las dimensiones de las columnas que la protegen aumentan (caso b). En cambio, para el caso (c), las columnas tienden a concentrar el flujo en la columna individual incrementando la fuerza en un 10% (para columnas en el frente de 50mm x 50mm) y en 25% (para columnas en el frente de 150 mm x 50 mm). La fuerza también aumenta cuando la columna individual posterior incrementa su tamaño.

A pesar de que el efecto de escudo disminuye la fuerza en columnas internas para el caso simétrico, no sería recomendado hacer reducción alguna en las fuerzas hidrodinámicas ya que existe la posibilidad de que se tenga flujo de tsunami en una dirección oblicua generándose el caso más desfavorable comentado en el párrafo anterior. Se puede considerar un incremento del 15% en la fuerza hidrodinámica en las columnas interiores que se encuentran sólo en la segunda línea de defensa.

De estos mismos experimentos se puede analizar las fuerzas pico y los niveles donde empieza la fuerza hidrodinámica de arrastre subsecuente (particularmente para los casos de columnas individuales). Considerando sólo los casos de inundación sobre lecho con agua, se puede considerar que la fuerza de arrastre sea los 2/3 (66.66%) de la fuerza máxima.

### **Fuerzas hidrodinámicas de arrastre, “ $F_d$ ”**

Estas fuerzas se presentan cuando el agua fluye alrededor de algún elemento estructural o edificio e incluyen el impacto frontal, arrastre a través de los lados del elemento, y succión en el lado posterior al flujo. Es la fuerza que ejerce el flujo continuo y sostenido después de que el bore colapsa.

Al igual que la máxima fuerza  $F_s$ , la fuerza de arrastre  $F_d$  dependerá de la magnitud de la velocidad y de la profundidad de inundación en determinado instante.

FEMA P646 (2008) estima la fuerza de arrastre hidrodinámica como:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d B (hu^2)_{\max} \quad (\text{A.16})$$

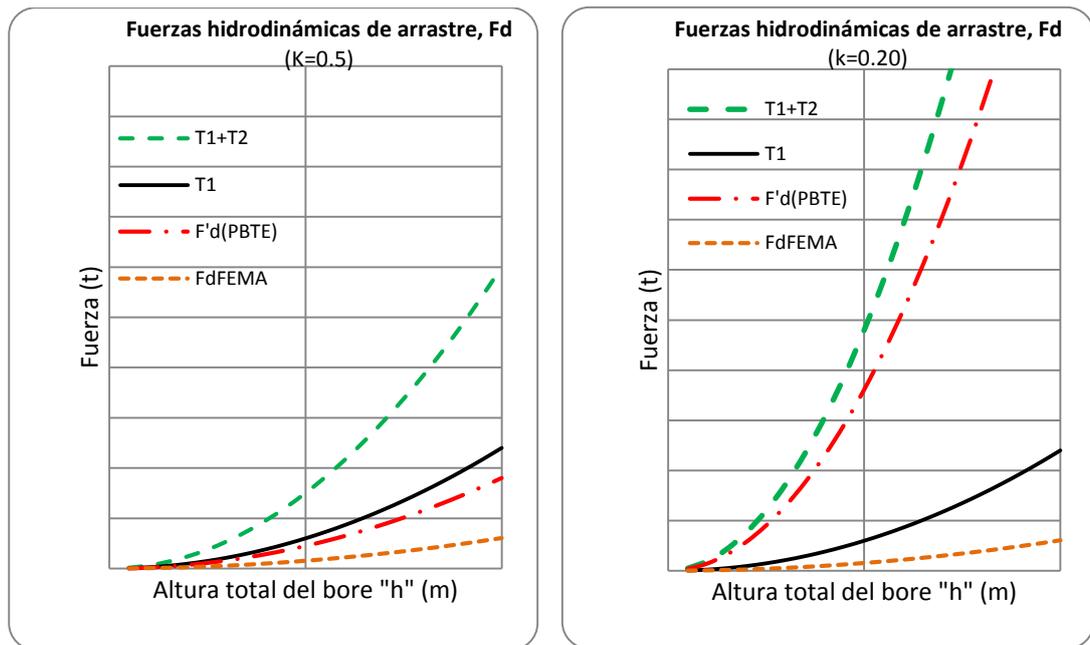
Donde  $C_d$  es el coeficiente de arrastre y se recomienda que sea tomado igual a 2. La combinación  $hu^2$  el cual representa el flujo de momento por masa unitaria se determina con la Ec. (A.10). El enfoque de FEMA P646 indica entonces que  $F_d = \frac{2}{3} F_s$ , ver Ec. (A.09).

Últimamente, el programa de investigación norteamericano PBTE (de la sigla en inglés *Development of Performance-Based Tsunami Engineering*) brinda una expresión parecida a la anterior pero en función de la profundidad de inundación máxima,  $h$ , y de la velocidad post-bore,  $u$ , ver Ec. (A.06):

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d B h u^2 \quad (\text{A.17})$$

Donde el valor de  $C_d$  varía en función de la relación del ancho del objeto y la profundidad de inundación. El valor máximo de este coeficiente de arrastre es igual a 2.

Entonces, el enfoque dado por el programa PBTE reconoce las condiciones anteriores de inundación tal como lo hace el enfoque de Paczkowski para la estimación de la fuerza máxima (*la magnitud de la fuerza de arrastre puede ser muy significativa para valores de  $k$  pequeños*). De esta manera, la fuerza de arrastre,  $F_d$ , es el 48.33% de la fuerza máxima  $F_s$  dada por Paczkowski para un valor de  $k=0.15$  y es el 18.20% para un valor de  $k=0.55$  y de aquí se deduce que no es posible considerar un porcentaje general para todos los valores de  $k$  como herramienta de diseño práctico; sólo se puede decir que la máxima fuerza de arrastre es alrededor del 50% de la fuerza máxima de impulso.



**F-A.13.** Magnitudes de fuerza hidrodinámica de arrastre para una relación  $h_s/h=0.50$  y  $0.20$  según varios enfoques.

También resulta atractivo, para propósitos de diseño práctico, expresar la fuerza hidrodinámica de arrastre como un porcentaje de la fuerza hidrodinámica máxima. A continuación, se presenta las variaciones de cada enfoque

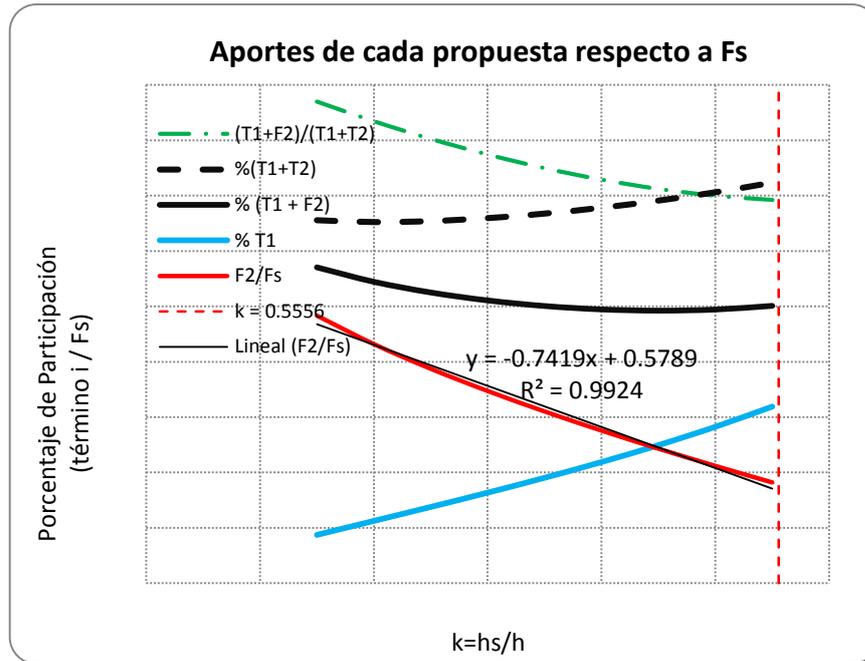
De las figuras anteriores podemos escribir las siguientes conclusiones:

1. Si se quiere estimar la fuerza de arrastre usando los dos primeros términos de la ecuación de Paczkowski, es decir (T1+T2), se puede tomar en promedio los  $\frac{2}{3}$  de la fuerza hidrodinámica máxima. Esto, como ya se dijo, resulta muy conservador y representaría un límite máximo.

$$F_{d_{\max}} = \frac{2}{3} F_s \quad (\text{A.18})$$

2. La ecuación propuesta por PBTE tiene una variación casi lineal y su ecuación se muestra en la **F-A.14**. Sin embargo, para valores de  $k > 0.43$  la fuerza hidrodinámica de arrastre estimada sería menor que la fuerza hidrostática causada por la misma profundidad de fluido, lo cual parecería poco conservador.

$$F_{d(PBTE)} = (-0.74k + 0.58) F_s \quad (\text{A.19})$$



**F-A.14.** Relación de cada enfoque con la fuerza hidrodinámica máxima,  $F_s$ , y sus variaciones con la variable  $k$ .

3. Se puede notar que  $(T1+F2)$  es en promedio el 52% de la fuerza hidrodinámica máxima; pero, para propósitos prácticos, se podría tomar como el 50% de la fuerza hidrodinámica máxima.

$$F_d = \frac{1}{2} F_s \quad (A.20)$$

4. La estimación sugerida por FEMA P646, resulta la menor de todas y por debajo de la fuerza hidrostática para la misma profundidad de fluido.

### Efecto de embalse debido a escombros

Este efecto es causado por la acumulación de escombros frente a la estructura y se asume que la fuerza hidrodinámica actúa uniformemente en el área obstruida proyectada verticalmente sobre el ancho y el alto sumergido. Se debe considerar un ancho de embalse  $B$  mínimo y evaluar su efecto en varias posiciones para determinar la ubicación más crítica tanto para la estructura como para los elementos estructurales; se aconseja usar como mínimo las características de un contenedor de ancho  $B=12$  m para tener en cuenta este efecto.

Para el análisis de los elementos estructurales, se debe asignar estas fuerzas de acuerdo al ancho tributario para cada elemento y distribuido uniformemente sobre el elemento en la altura sumergida del área obstruida.

## Fuerzas de impacto de escombros.

En general, fuerzas de impacto son aquellas que resultan de leños, témpanos de hielo, botes y cualquier otro objeto que impacta sobre estructuras (edificios, puentes, etc.) o cualquier parte de ellas. El U.S. Army Corps of Engineers divide estas fuerzas de impacto en tres categorías: 1) Cargas de impacto normal, como resultado del impacto aislado de objetos encontrados usualmente. 2) Cargas de impacto especial, resultado de objetos grandes tales como pedazos de témpanos flotantes y acumulación de escombros y 3) Cargas de impacto extremo, resultado de objetos muy grandes como botes, edificios colapsados de madera, etc. Entonces, para el caso de inundación por tsunamis podemos decir que el diseño para cargas de impacto normales, e incluso especiales, puede ser práctico, con más razón todavía si se trata de una edificación tipo Esencial, o que signifique un riesgo importante para la vida humana. La consideración de cargas de impacto extremo para el diseño podría resultar prohibitiva.

Estas fuerzas actúan localmente en puntos de contacto con los elementos estructurales cerca al nivel de la superficie de inundación. Existe evidencia que el impacto producido por escombros ha causado el colapso de componentes estructurales, tales como columnas y vigas, comprometiendo la estabilidad de las estructuras sujetas al flujo continuo del tsunami. Botes, maderos, automóviles e incluso otros edificios flotantes pueden actuar como misiles contra la estructura en evaluación.

Lamentablemente, la estimación de estas fuerzas está más lejos de comprender que, incluso, la estimación de las fuerzas hidrodinámicas y las teorías de inundación y los modelos disponibles desarrollados para calcular este tipo de fuerza, contienen un alto grado de dispersión.

La mayoría de los modelos considerados están basados en conceptos de momento-impulso, en el que el impulso de la fuerza resultante  $F$  que actúa durante un tiempo infinitesimal " $t$ ", es igual al cambio del momento lineal.

$$I = \int_0^t F dt = d(mu_b); \quad t \rightarrow 0 \quad (A.21)$$

Donde  $m$  es la masa del objeto y  $u_b$  es la velocidad del objeto que usualmente se considera igual a la velocidad del flujo  $u$ .

Los manuales tales como el *City and County of Honolulu Building Code* (2000), *Coastal Construction Manual* (FEMA 55, 2011), y *ASCE/SEI 7-10* (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures) contienen expresiones basadas en la ecuación anterior para la fuerza de impacto, actuando en un tiempo pequeño pero finito; usando el

cambio promedio en el momento como aproximación, se puede escribir una ecuación general:

$$F_i = m \frac{du}{dt} = m \frac{u}{\Delta t} \quad (\text{A.22})$$

En este enfoque de impulso-momento, Ec. (A.22), existe una incertidumbre importante en la evaluación de la duración del impacto  $\Delta t$ .

### ***Estimación de Matsutomi (1999, 2009)***

Investigó de manera experimental la fuerza de impulso causada por un madero de sección circular (tronco) flotante. Matsutomi propuso la siguiente expresión:

$$\frac{F_i}{\gamma_w D_w^2 L_w} = 1.6 C_M \left( \frac{u_{A0}}{\sqrt{g D_w}} \right)^{1.2} \left( \frac{\sigma_f}{\gamma_w L_w} \right)^{0.4} \quad (\text{A.23})$$

Dónde:

- $\gamma_w$  : Peso específico del tronco.
- $D_w, L_w$  : Diámetro y longitud del tronco.
- $C_M$  : Coeficiente de masa añadida que depende del tamaño, forma y el arreglo de la estructura con el que el tronco colisiona, el tipo de flujo, localización del tronco en el flujo.
- $u_{A0}$  : Velocidad de colisión o de impacto del tronco.
- $\sigma_f$  : El esfuerzo de fluencia del tronco.

Matsutomi recomendó un valor de  $\sigma_f = 20 \times 10^6 Pa$  para un tronco mojado. Basado en sus experimentos a pequeña escala, recomendó un valor de  $CM=1.7$  para un bore o surge,  $CM=1.9$  para flujo permanente.

### ***Estimación de Ikeno et al. (2001, 2003)***

De manera similar, Ikeno desarrolló experimentos en laboratorio a escala pequeña (aproximadamente 1/100 del modelo) para examinar el impacto de otro tipo de escombros tales como cuerpos de forma cuadrada, cilíndrica y esférica

$$\frac{F}{gm} = S C_M \left( \frac{u}{\sqrt{g \sqrt{DL}}} \right)^{2.5} \quad (\text{A.24})$$

Donde

- $S$  : Constante (igual a 20 para el caso de bores).
- $C_M$  : Coeficiente de masa añadida
- $m$  : Masa del cuerpo flotante.

CM=0.5 sin considerar la forma de los objetos para el impacto de un bore con un muro impermeable (resultado adoptado del estudio de Matsutomi). Para el caso de un surge, se sugiere utilizar S=5 y CM=0.8 para objetos de forma esférica y CM=1.5~2.0 para columnas cuadradas y cilíndricas. La ecuación de Ikeno es válida sólo para la condición de un muro impermeable.

### ***Estimación de Haehnel y Daly, 200.***

Se propuso un modelo dinámico lineal con un grado de libertad. Se asume una estructura rígida y debido a que la colisión ocurre en un intervalo de tiempo corto, se desprecia los efectos de amortiguamiento. La solución de la expresión anterior da una estimación basado en rigidez constante:

$$F_{\max} = \text{Max} \langle kx \rangle = u\sqrt{km} \quad (\text{A.25})$$

Dónde:

- $m$  : Masa del cuerpo flotante.
- $x$  : la sumatoria de la compresión del edificio y del madero durante el impacto y rebote.
- $k$  : la rigidez constante efectiva asociada con el tronco y el edificio.
- $u$  : la velocidad de impacto.

Otra manera de estimar la fuerza de impacto está basado en el concepto de trabajo y energía: la energía cinética del proyectil se convierte al trabajo realizado edificio, resultando una expresión del tipo siguiente:

$$F_i = m \frac{u^2}{\Delta x} \quad (\text{A.26})$$

Haehnel y Daly demostraron que los enfoques de impulso-momento y de trabajo-energía pueden ser reducidos al enfoque de rigidez constante.

**Enfoque ASCE/SEI Standard 07-10 (2010), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**

Según este código, en cualquier tipo de análisis la siguiente ecuación proporciona un enfoque racional para la estimación de la magnitud de la carga de impacto.

$$F_i = \frac{\pi W V_b C_I C_O C_D C_B R_{\max}}{2g\Delta t} \quad (\text{A.27})$$

Dónde:

- W : Peso del objeto (escombros).
- V<sub>b</sub> : Velocidad del objeto (se asume igual a la velocidad del flujo, u).
- g : Aceleración de la gravedad.
- t : Duración del impacto (tiempo para reducir la velocidad del objeto a cero).
- C<sub>I</sub> : Coeficiente de importancia.
- C<sub>O</sub> : Coeficiente de orientación.
- C<sub>D</sub> : Coeficiente de profundidad.
- C<sub>B</sub> : Coeficiente de bloqueo u obstrucción.
- R<sub>max</sub> : Máxima razón de respuesta para carga impulsiva.

Es importante anotar aquí que la velocidad a la que un escombros golpea una estructura dependerá de la naturaleza del escombros y de la velocidad del flujo. A medida que los objetos flotantes (los mismos que causarán menos daño por su pequeña masa) sean más pequeños, la velocidad a la que viajan se acercará más a la velocidad del flujo. Así, para escombros grandes, tales como árboles, troncos, columnas y otros capaces de causar daño, viajarán a una velocidad menor que la velocidad del flujo (bore o post-bore) Esta velocidad reducida de objetos grandes se debe en parte al arrastre a lo largo de la parte inferior y a la reducción de la rapidez antes de la colisión.

Para el caso de la Ec. (A.27), ASCE 7-10 sugiere usar la velocidad del flujo ya que la formulación permite una reducción en la velocidad del escombros por medio del coeficiente de profundidad C<sub>D</sub>, y del coeficiente de obstrucción de flujo frontal, C<sub>B</sub>.

**Enfoque FEMA P-55 Coastal Construction Manual (2011)**

Basado en la ecuación dada por ASCE 7-10 ("Commentary"), este enfoque simplifica la Ec. (A.27) usando un parámetro C<sub>Str</sub>, cuyo valor se establece basado en suposiciones apropiadas para los edificios típicos de la costa.

$$F_i = W V C_D C_B C_{Str} \quad (\text{A.28})$$

En donde los parámetros  $W$ ,  $V$ ,  $C_D$  y  $C_B$  se han definido previamente. El parámetro  $C_{Str}$  llamado coeficiente estructural del edificio es igual a:

$C_{Str} = 0,2$ , para estructuras de tres pisos o menos soportadas por columnas de madera o de mampostería.

$C_{Str} = 0,4$ ; para estructuras de tres pisos o menos soportadas por columnas de concreto o pórticos resistentes a momento de concreto o de acero.

$C_{Str} = 0,8$ ; para muros cimentación de concreto reforzado.

A pesar de que se dispone de varias metodologías para estimar las fuerzas de impacto, la incertidumbre aún es muy grande debido a los procedimientos e hipótesis usadas en cada enfoque, haciendo a algunos de estos métodos poco prácticos para su uso con objetivos de diseño. Para los métodos de impulso-momento, rigidez constante y trabajo-energía, existe bastante dificultad en estimar los parámetros de tiempo, rigidez y posición relativa para cada caso particular; la ecuación de Matsutomi no es práctica debido a que su uso se aplica sólo a maderos o troncos (secciones de forma cilíndrica) y a sus particulares parámetros de escala; la ecuación de Ikeno está basada en experimentos a pequeña escala donde se tenía muros impermeables y el flujo de agua no continuaba más allá de la estructura; esto hace que la extrapolación a casos reales sea poco confiable. Conociéndose aun con precisión la velocidad de impacto y la masa del objeto, cada enfoque resulta en relación funcional, diferente respecto de las otras:

**Tabla 1:** Relaciones Funcionales de Fuerza de Impacto:  $F_i \propto u^\alpha m^\beta$

<b>Enfoques</b>	--	--
Impulso-momento, Ec.(A.22)	1,0	1,0
Matsutomi, Ec.(A.23)	1,2	0,66
Ikeno y Tanaka, Ec.(A.24)	2,5	0,58
Rigidez constante, Ec.	1,0	0,5
Trabajo-energía, Ec.	2,0	1,0

Para el caso de las propuestas dadas por el ASCE/SEI Standard 07-10 y por FEMA 55, resulta obvio que la evaluación de las ecuaciones propuestas representa un esfuerzo poco práctico en el intento de obtener una estimación ingenieril, tratando de ajustar demasiados coeficientes, los cuales han sido basados en la experiencia y, debido a lo poco que se conoce este tema, en estimaciones poco confiables.

Sin embargo, es necesario hacer estimaciones permisibles basadas en los enfoques discutidos anteriormente. Así, hasta que se tenga una teoría más completa, se sugiere utilizar el enfoque sugerido por Haehnel and Daly debido a su simplicidad y formulación racional (FEMA P646, 2008). Se puede tener en cuenta la masa añadida introduciendo un coeficiente,  $C_M$ , en la ecuación (A.25):

$$F_i = C_M u_{\max} \sqrt{km} \quad (\text{A.29})$$

Matsutomi (1999) encontró que  $C_M=1,7\sim 1,9$ ; e Ikeno et al. (2001, 2003) usó  $C_M=1,5\sim 2,0$ . Se recomienda que  $C_M=2,0$ . La clave, lo cual resulta ser también una desventaja, para este método, es la apropiada elección de  $k$ . La ventaja radica en que  $k$  no es tan susceptible como lo son  $\Delta t$  y  $\Delta x$  en los enfoques impulso-momento y trabajo-energía, respectivamente.

En la siguiente Tabla 2 se listan valores aproximados para escombros más comunes.

**Tabla 2:** Masas y Rigideces de escombros flotantes comunes

Elemento	Masa "m" (kg)	Rigidez Efectiva "k" (N/m)
Tronco o leño	450	$2,4 \times 10^6$
Contenedor Estándar de 40 pies.	3800 (vacío)	$6,5 \times 10^8$ $1,5 \times 10^9$
Contenedor Estándar de 20 pies.	2200 (vacío)	$1,7 \times 10^9$
Contenedor Pesado de 20 pies.	2400 (vacío)	

La velocidad a utilizar para este enfoque se puede tomar como sigue. La máxima velocidad que transporta una madera o un tronco (con esencialmente ningún calado) puede ser considerada igual a la velocidad del flujo correspondiente al avance del bore o igual a la velocidad post-bore, según sea el caso.

Para un contenedor de barco o algún escombros grande con calado "d", se puede considerar la razón del calado a la altura máxima del run up R, el cual puede ser usado para estimar a velocidad del flujo máxima. Se puede estimar el calado usando la siguiente ecuación:

$$d = \frac{W}{\rho_s g A_f} \quad (\text{A.30})$$

Donde 'W' es el peso del escombros,  $\rho_s$  es la densidad del fluido incluido los sedimentos, 'g' es la aceleración de la gravedad y 'A<sub>f</sub>' es el área de la sección transversal paralela a la superficie de agua tal que el producto 'd x A<sub>f</sub>' represente el volumen de agua desplazada por el escombros.

Finalmente, la velocidad para este tipo de escombros más grandes se puede encontrar usando la metodología descrita en FEMA P646.

## Estimación de Fuerzas Verticales

### Fuerzas de flotación boyantes (empuje hidrostático)

En el tsunami del terremoto de Japón de marzo de 2011, se notó que una fuente importante de estas fuerzas es el aire atrapado que puede formarse entre el fondo del techo y la parte superior de las ventanas. Esta fuerza tiene el efecto de reducir el peso de la estructura llegando a producir tracciones en los elementos resistentes. Existe evidencia de que varios edificios han sido arrancados de sus cimientos o junto con estos.

$$F_b = \rho g V \quad (\text{A.31})$$

Donde  $V$  es el volumen de agua desplazada incluyendo aire atrapado.

### Fuerzas de levantamiento hidrodinámicas

Además de fuerzas de empuje hidrostáticas, actuarán fuerzas hidrodinámicas ascendentes sobre las losas de los pisos en un edificio sumergido durante la inundación del tsunami, debido al avance del bore a través del edificio. En consecuencia, se debe diseñar las losas para resistir este levantamiento causado por ambas acciones.

La fuerza total de levantamiento hidrodinámico en el sistema de piso puede ser estimada usando la ecuación propuesta por FEMA P646.

$$F_u = \frac{1}{2} C_u \rho A_f u_v^2 \quad (\text{A.32})$$

Donde  $C_u$  es un coeficiente tomado igual a 3,  $A_f$  es el área del componente de la losa horizontal,  $u_v$  es la velocidad vertical estimada o la velocidad de aumento del agua. En ausencia de un estudio hidráulico especial, el valor de esta velocidad vertical se puede estimar con:

$$u_v = u \tan \alpha \quad (\text{A.33})$$

Donde  $u$  es la velocidad horizontal del flujo correspondiente a una profundidad de fluido igual a la elevación de la parte inferior del sistema de piso y  $\alpha$  es la pendiente promedio del terreno.

El efecto de las fuerzas ascendentes debido al incremento rápido de la profundidad de inundación a causa del bore sobre las losas se puede incrementar más todavía si el flujo encuentra elementos verticales tales como columnas o placas. En estas circunstancias se tendrá una fuerza localizada mayor en la losa inmediatamente delante del muro o columna. Esta es una razón más para minimizar el ancho de contacto de los elementos estructurales verticales.

### **Fuerzas de gravedad adicionales debidas al tsunami.**

Después del avance del bore, tendrá lugar el receso del flujo y durante este proceso los pisos superiores retendrán volúmenes de agua los cuales ejercerán cargas de gravedad adicionales a las del peso propio, generándose una condición más de carga a tomar en cuenta en el diseño de la estructura. Para evaluar la altura de agua retenida en los pisos, se deberá prestar especial atención a la resistencia lateral de aquellos elementos verticales estructurales y no estructurales capaces de generar retención de volúmenes de agua.

Se cree que debido a la rapidez del proceso de recesión del agua de inundación, la cantidad de agua retenida temporalmente puede ser importante dando como resultado cargas de gravedad significativas sobre los sistemas de piso involucrados. La carga por unidad de área se puede estimar usando la siguiente ecuación:

$$f_r = \rho g h_{ret} \quad (A.34)$$

Donde  $h_{ret}$  es la profundidad de agua retenida probable, medida desde la superficie superior del sistema de piso.

Para los niveles donde se prevea el uso de sistemas abiertos de tal manera de permitir una rápida evacuación de las aguas durante el proceso de recesión de la inundación, se tendrá que asegurar que el peso del agua retenida momentáneamente no exceda la carga viva para la cual fue diseñada; en caso contrario, se deberá diseñar para niveles de carga de gravedad mayores.

### **Efectos del tsunami en la cimentación.**

El diseño de la cimentación debe considerar los efectos de la socavación para evitar la inestabilidad estructural del edificio; esto generalmente obliga a incrementar la profundidad de cimentación a niveles mayores que las establecidas en los reglamentos de diseño típicos. Asimismo, se debe asegurar que la cimentación y la estructura deben ser capaces de resistir todas las cargas aplicadas después de la socavación.

### **Evaluación de la profundidad de socavación.**

Dames and Moore (1980) sugiere que la profundidad de socavación está relacionada a la distancia de la orilla y al tipo de suelo, siendo estimada como un porcentaje de la profundidad máxima de inundación  $h$ . Ver Tabla 3.

**Tabla 3**

Profundidad de socavación estimada como porcentaje de la profundidad máxima de inundación.

Tipo de suelo	%h	%h
	Distancia a la orilla < 100 m	Distancia a la orilla > 100 m
Arena suelta	80	60
Arena compacta	50	35
Limo blando	50	25
Limo duro	25	15
Arcilla blanda	25	15
Arcilla dura	10	5

### **Consideraciones estructurales. Alternativas de solución.**

Si se considera cimentar sobre pilotes, se debe tener en cuenta las demandas causadas por la recesión del flujo, las fuerzas laterales y la longitud no arriostrada del pilote producto de la socavación. Además, se debe considerar los efectos de las fuerzas de levantamiento debido al empuje hidrostático y a las fuerzas ascendentes hidrodinámicas.

### **Estabilidad de una Edificación Tsunamirresistente**

Los resultados de las fuerzas cortantes indican que la fuerza cortante del tsunami es mayor sólo en el primer nivel, como se esperaba. Sin embargo, cuando se evaluó el momento de volteo, sucede que el momento de volteo debido al tsunami es mayor en todos los niveles.

Considerando todas las fuerzas del tsunami en todos los elementos estableciendo variables para las dimensiones del edificio, número de niveles, dimensiones de columna y de muros, longitud de obstrucción para fuerzas de arrastre y para fuerzas de impacto del bore, espesor de losa, adicionalmente, considerando factores de pre-dimensionamiento de vigas, carga muerta, etc. El objetivo es determinar en la etapa de diseño preliminar algunas expresiones para definir cuantos niveles debería tener un edificio para evitar el volteo, teniendo como datos el área a construir y la arquitectura básica (Condori 2015, comunicación personal).

Se propone dos criterios de factor de seguridad ante flotación y ante volteo (Condori 2015, comunicación personal). Estas expresiones están basadas en una simple condición de equilibrio.

### Criterio 1: Seguridad ante flotación:

$$FS_1 = \frac{2n \left( 1.43 + \frac{q}{\gamma_c t} \right)}{\frac{3}{7}(m+1) + \frac{L_n}{d \cdot t} m} \quad (A.35)$$

Dónde:

- n : número de niveles
- q : carga muerta adicional (acabados, tabiquería)
- d : factor de pre-dimensionamiento de vigas
- $\gamma_c$  : peso unitario del concreto
- t : espesor de losa
- m : número de pisos inundados
- $A_N$ : Área neta descontando aberturas

### Criterio 2: Seguridad ante volteo

$$FS_2 = \frac{0.38A_N \cdot n \cdot L}{0.55h^2 \left( \lambda B_s h + B_d \frac{u^2}{g} \right) + 0.11A_N \left[ \left( \frac{3}{7} + \frac{L_N}{0.20d} \right) m + \frac{3}{7} \right] \cdot L} \quad (A.36)$$

Dónde:

- $B_s$ : Longitud obstruida para fuerza de impacto del bore
- $B_d$ : Longitud obstruida para fuerza de arrastre.
- L: Longitud del edificio en el sentido paralelo a la dirección del flujo.
- h : profundidad de inundación
- $\lambda$  : factor de fuerza hidrodinámica

Los resultados indican que el mínimo número de niveles es de 3 para el criterio de seguridad ante flotación. Para la estimación del momento de volteo se considera 22% de elementos verticales (columnas y muros), 28% de vigas y 50% de flotación (incluyendo "aire atrapado"). Luego, el número mínimo de niveles para evitar que un edificio se voltee por el impacto del tsunami sería de 6 pisos o niveles.

## 1.4. Lineamientos para el diseño y la construcción de edificios Tsunamirresistentes

De las investigaciones realizadas y de la experiencia obtenida, se ha demostrado que las estructuras de concreto armado poseen un mejor comportamiento frente al impacto del tsunami. Se ha catalogado los efectos del tsunami en la estructura en tres categorías (Tabla 4).

A partir de estas categorías se establecen los efectos y los criterios necesarios para contribuir a la construcción de estructuras tsunami-resistentes (Mas, 2009), siendo estos los siguientes:

a) Lineamientos para el planeamiento urbano de estructuras tsunamirresistentes

- Ubicación con respecto a otras edificaciones.
- Presencia de vegetación y colchones verdes como protección.
- Estructuras construidas sobre el nivel de inundación.
- Distribución de usos con respecto a la distancia al litoral (usos recreativos cerca al mar y usos urbanos fuera de la zona inundable, con el colchón verde frente a estas zonas).

b) Lineamientos para el proyecto arquitectónico

- Espacios libres y abiertos al flujo en niveles inferiores.
- Orientación de elementos estructurales paralelos a la dirección del flujo del tsunami e impacto proyectado de olas.
- Posibilidad de orientación de elementos no estructurales (no integrados al sistema estructural) perpendicular al flujo.

c) Lineamientos para la ingeniería del proyecto

- Diseño de elementos estructurales y no estructurales.
- Consideración de los niveles de erosión en cimentaciones.
- Calidad de los materiales y procesos de construcción.

**Tabla 4**

**Resumen de observaciones de los tsunamis de Camaná 2001, Indonesia 2004 y Pisco 2007, (Mas, 2009**

<b>CATEGORÍA</b>	<b>SUB-CATEGORÍA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>PLANEAMIENTO URBANO</b>	Ubicación	Gran parte de las estructuras que han presentado daños leves se encuentran ubicadas detrás de otras edificaciones que las protegen de las olas y el impacto del tsunami, además la presencia de vegetación contribuye a disminuir la energía del tsunami, provocando menores daños.
<b>ARQUITECTURA</b>	Espacios libres y orientación	La arquitectura con espacios libres y orientación de muros en el primer nivel tal que permitan el libre flujo de las aguas, aligerando la presión ejercida sobre la tabiquería y elementos estructurales resultan convenientes.
<b>INGENIERIA</b>	Material (calidad y construcción) Diseño (fuerzas inducidas)	Materiales como los bloques de concreto y las cañas guayaquil fueron arrasados por las olas, en cambio, estructuras de concreto armado mostraron un mejor comportamiento., El diseño estructural debe contemplar las fuerzas inducidas por el tsunami.
	Impacto	Elementos de arrastre del tsunami se convierten en proyectiles que impactan en las viviendas.
	Suelo-Estructura	El suelo alrededor de la cimentación puede presentar erosión.

## COMENTARIOS

### Estrategias para el Diseño Tsunamirresistente en el Perú

Los países que más han estudiado los tsunamis son Japón y los EE.UU. El territorio japonés está constituido por cuatro principales islas, Honshu, Hokkaido, Shikoku y numerosas islas que conforman el extendido archipiélago japonés. Okinawa es la isla oriental más importante. Por milenios su territorio ha sido atacado por tsunamis que han ido dejando lecciones. Las costas occidentales de la región Tohoku, llamada Sanriku, es una de las áreas más susceptibles al efecto destructivo de los tsunamis. Aguas profundas llegan hasta cerca de sus costas. En aguas profundas las olas del tsunami frecuentemente viajan a través de los océanos sin perder energía por fricción con los fondos oceánicos. En aguas poco profundas, más de 100 m de profundidad, se producen pérdidas significativas.

Basado en estos hechos, Yamaguchi propuso su fórmula para determinar la altura de ola en la costa. Estudios efectuados en la costa central sur del Perú para terremotos de magnitud entre 7,5 – 8,4 han dado resultados que han sido verificados cuando han ocurrido los terremotos y tsunamis. Además, en Sanriku el perfil de su costa es más accidentado, con numerosas bahías en forma de U, V, W, por lo que la altura de ola son excepcionalmente altas.

Por ejemplo, en los tsunamis de Sanriku de 1896 y 1936, la altura de la ola pasó de 30 m; en el tsunami de Tohoku de 2011, en una de sus bahías con forma desfavorable, la altura de la ola pasó de los 40 m.

Por ello y otras razones las normas japoneses sismorresistentes de tsunami tienden a ser conservadoras.

Por su parte, los EE.UU. tienen extensas costas sobre el Pacífico y el Atlántico, en el Caribe, donde olas de tsunamis son sometidas a tormentas tropicales.

En las costas de Alaska, rodeadas por zonas de subducción, se han generado terremotos y tsunamis que han afectado Hawai, por ejemplo en 1946. Existen también otras islas en el océano Pacífico. Debiendo proteger contra tsunamis amplios terrenos en el océano Pacífico y el Atlántico, es una tarea difícil, para afrontar un fenómeno cuyo ataque a edificaciones e infraestructuras es complicado.

Esto se refleja en los documentos proporcionados por valiosas entidades estándares. Los documentos representativos pueden ser publicados por FEMA, Agencia Federal de los EE.UU. Para la Atención de Emergencia. Son bastante extensos, tratan de resumir las investigaciones más importantes realizadas sobre efectos de tsunamis en edificios e infraestructuras, que se adjunta a este Informe Final, con lo que, conjuntamente, quedó sustentado el esfuerzo efectuado por un pequeño grupo de estos peruanos que han tratado de producir un documento técnico orientador sin llegar a reglas y fórmulas fijas, como son las Normas de Concreto Armado o las Normas Sismorresistentes.

De hecho, la presión provocada por el “bore” sobre las edificaciones es más conservadora que la Norma Japonesa y más bien está al nivel de la práctica estándar que aún está en “estado de prueba”.

El documento que se presenta es también producto de haber realizado el análisis del estudio sobre tsunamis que se presentó en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería FIC/UNI, en la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM, así como los estudios de consultoría efectuados con apoyo de la Agencia Internacional.

## **ANEXO II**

### **LISTADO DE LAS CIUDADES COSTERAS QUE CUENTAN CON MAPA DE INUNDACIÓN POR TSUNAMIS**

## ANEXO II

### LISTADO DE LAS CIUDADES COSTERAS EXPUESTAS A SUFRIR DAÑOS POR TSUNAMIS

El siguiente listado de las ciudades costeras expuestas a sufrir daños por inundación por tsunami, ha sido elaborado sobre la base de la información de los mapas de inundación, publicada en la página web de la Dirección de Hidrografía y Navegación, DHN ([www.dhn.mil.pe](http://www.dhn.mil.pe)).

Orden	Departamento	Provincia	Distrito	Centro Poblado
1	Tumbes	Tumbes	Tumbes	<i>Pizarro</i>
2	Tumbes	Tumbes	La Cruz	<i>La Cruz</i>
3	Tumbes	Contralmirante Villar	Zorritos	<i>Caleta Grau</i>
4	Tumbes	Contralmirante Villar	Zorritos	Zorritos, Los Pinos
5	Tumbes	Contralmirante Villar	Canoas de Punta Sal	<i>Cancas</i>
6	Piura	Talara	Máncora	<i>Máncora</i>
7	Piura	Talara	Los Órganos	<i>Los Órganos</i>
8	Piura	Talara	Lobitos	<i>Lobitos</i>
9	Piura	Talara	Pariñas	<i>Talara</i>
10	Piura	Talara	La Brea	<i>Negritos</i>
11	Piura	Paita	Paita	<i>Paita</i>
12	Piura	Sechura	Sechura	<i>Constante</i>
13	Piura	Sechura	Sechura	<i>Parachique</i>
14	Lambayeque	Lambayeque	San José	<i>San José</i>
15	Lambayeque	Chiclayo	Pimentel	<i>Pimentel</i>
16	Lambayeque	Chiclayo	Santa Rosa	<i>Santa Rosa</i>
17	Lambayeque	Chiclayo	Eten	<i>Eten</i>
18	La Libertad	Pacasmayo	Pacasmayo	<i>Pacasmayo</i>
19	La Libertad	Ascope	Rázuri	<i>Chicama (Pto Malabrigo)</i>
20	La Libertad	Trujillo	Huanchaco	<i>Huanchaco</i>
21	La Libertad	Trujillo	Huanchaco	<i>Huanchaquito</i>
22	La Libertad	Trujillo	Víctor Larco Herrera	<i>Buenos Aires</i>
23	La Libertad	Trujillo	Moche	<i>Las Delicias</i>
24	La Libertad	Trujillo	Salaverry	<i>Salaverry</i>
25	Áncash	Santa	Coishco	<i>Coishco</i>
26	Áncash	Santa	Chimbote	<i>Chimbote</i>
27	Áncash	Santa	Samanco	<i>Samanco</i>
28	Áncash	Casma	Comandante Noel	<i>Tortugas</i>
29	Áncash	Huarmey	Culebras	<i>Culebras</i>
30	Áncash	Huarmey	Huarmey	<i>Huarmey</i>
31	Áncash	Huarmey	Huarmey	<i>Punta Lobitos</i>
32	Lima	Barranca	Paramonga	<i>Paramonga</i>
33	Lima	Barranca	Barranca	<i>Barranca</i>

34	Lima	Barranca	Supe Puerto	<i>Supe</i>
35	Lima	Barranca	Supe	<i>Vidal</i>
36	Lima	Huaura	Vegueta	<i>Vegueta</i>
37	Lima	Huaura	Caleta Carquín	<i>Carquín</i>
38	Lima	Huaura	Huacho	<i>Huacho</i>
39	Lima	Huaral	Chancay	<i>Chancay</i>
40	Lima	Lima	Ancón	<i>Ancón</i>
41	Lima	Lima	Santa Rosa	<i>Santa Rosa</i>
42	Callao	Callao	Ventanilla	<i>Balneario Ventanilla</i>
43	Callao	Callao	Ventanilla	<i>Ventanilla</i>
44	Callao	Callao	Ventanilla	<i>Playa Ventanilla</i>
45	Callao	Callao	Callao	<i>Márquez</i>
46	Callao	Callao	Callao	<i>Oquendo</i>
47	Callao	Callao	Callao	<i>200 Millas</i>
48	Callao	Callao	Callao	<i>San Agustín</i>
49	Callao	Callao	La Punta	<i>La Punta</i>
50	Lima	Lima	Magdalena del Mar	<i>Magdalena del Mar</i>
51	Lima	Lima	Miraflores	<i>Miraflores</i>
52	Lima	Lima	Chorrillos	<i>Chorrillos</i>
53	Lima	Lima	Chorrillos	<i>Villa Chorrillos</i>
54	Lima	Lima	Punta Hermosa	<i>Punta Hermosa</i>
55	Lima	Lima	Pucusana	<i>Pucusana</i>
56	Lima	Cañete	Chilca	<i>Chilca</i>
57	Lima	Cañete	Mala	<i>Totoritas</i>
58	Lima	Cañete	Mala	<i>Bujama</i>
59	Lima	Cañete	Asia	<i>Asia</i>
60	Lima	Cañete	Cerro Azul	<i>Cerro Azul</i>
61	Ica	Chincha	Tambo de Mora	<i>Tambo de Mora</i>
62	Ica	Pisco	Pisco	<i>Pisco</i>
63	Ica	Pisco	San Andrés	<i>San Andrés</i>
64	Ica	Pisco	Paracas	<i>Chaco-Paracas</i>
65	Ica	Nazca	Marcona	<i>San Juan de Marcona</i>
66	Arequipa	Caravelí	Lomas	<i>Lomas</i>
67	Arequipa	Caravelí	Chala	<i>Chala</i>
68	Arequipa	Caravelí	Atico	<i>Atico</i>
69	Arequipa	Camaná	Ocoña	<i>La Planchada</i>
70	Arequipa	Camaná	Samuel Pastor	<i>Camaná</i>
71	Arequipa	Camaná	Quilca	<i>Quilca</i>
72	Arequipa	Islay	Islay	<i>Matarani</i>
73	Arequipa	Islay	Mollendo	<i>Mollendo</i>
74	Arequipa	Islay	Mejía	<i>Mejía</i>
75	Arequipa	Islay	Punta de Bombón	<i>Bombón</i>
76	Arequipa	Islay	Punta de Bombón	<i>La Punta</i>
77	Arequipa	Islay	Punta de Bombón	<i>Catas</i>
78	Moquegua	Ilo	Ilo	<i>Ilo</i>

79	Tacna	Tacna	Sama	<i>Morro Sama</i>
80	Tacna	Tacna	Sama	<i>Vila Vila</i>
81	Tacna	Tacna	Sama	<i>Tomoyo y Boca del Río</i>
82	Tacna	Tacna	Sama	<i>Llostay</i>
83	Tacna	Tacna	Tacna	<i>Yarada</i>
84	Tacna	Tacna	Tacna	<i>Los Palos</i>
85	Tacna	Tacna	Tacna	<i>Santa Rosa</i>

## REFERENCIAS CONSULTADAS

- ADRIANO b., MAS E., KOSHIMURA J., FUJII Y., YAURI S., JIMENEZ C. and YANAGISAWA H. (2013). Tsunami Inundation Mapping in Lima, for Two Tsunami Source Scenarios. Journal of Disaster Research Vol. 8 No.2,2013,11p.
- ASME (2011) Tsunami Forces Debate over Vertical Evacuation- 4p.
- ATWATER B., CISTERNAS M., BOURGEOIS J., DUDLEY W. C., HENDLEY II J. W. and STAUFFER P.H.Survivinga Tsunami-Lessons from Chile, Hawaii and Japan. U.S. Geological Survey, Circular 1187. Version 1.1, 36p.
- BOURGEOIS J., PETROFF C., YEH H., TITOV V., SYNOLAKIS C.E., BENSON B., KUROIWA J., LANDER J. and NORABUENA E. (1999). Geologic setting, Field survey and Modeling of the Chimbote, Northern Peru, Tsunami of 21 February 1996.4p.
- CARDEN L.,CHOCK G., ROBERTSON I. and MARTIN & CHOCK INC. (2013). Structural Analysis Case Studies of Buildings Damaged during the Tohoku Tsunami. University of Hawaii at Manoa Honolulu, Hawaii/USA. 10p.
- CONDORI J. Análisis y Diseño de Estructuras de Evacuación Vertical Resistentes a Sismos y Tsunamis. 14p.
- CHARVET I., SUPPASRI A. and IMAMURA F.( 2014). Empirical fragility analysis of building damage caused by the 2011 great east japan tsunami in Ishinomaki city using ordinal regression and influence of key geographical features. Stoch Environ Res Risk Assess (2014) 28:1853:1867. Published online: 8 February 2014.14p.
- Chlieh M., Perfettini H., Tavera H., Avouac J., Remy D., Nocquet J., Rolandone F., Bondoux F., Gabalda G. and Bonvalot S. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. Journal of Geophysical Research, vol116,B12405.
- EERI SPECIAL EARTHQUAKE REPORT (2011). Learning from Earthquake. The Japan Tohoku Tsunami of March 11, 2011. Nov. 2011, 15p.
- FUKUYAMA H., KATO H., ISHIHARA T., TAJIRI S.,TANI M., OKUDA Y., KABEYASAWA T.,& NAKANO Y. Structural Design Requirement on the Tsunami Evacuation Building , BRI, NILIM, MLTT (2012), 11p.
- GOVERNMENT OF LAPAN, GFDRR, THE WORLD BANK (2012). LEARNING FROM MEGADISASTER 2011. The Great East Japan Earthquake. CD donado por el Sr. Ricardo Palma. Presentado en un

Seminario Internacional de Junta de Gobernadores, realizado en Tokio Japón en octubre de 2012.

<http://www.joelbomane.com/2011-tohoku-earthquake-and-tsunami/>

- HATORE T.(1968). Study on Distant Tsunamis along the Coast of Japan. Part 2, Tsunami of South American Origin. Bulletin of the Earthquake Research Institute. Vol. 46 (1968).pp. 345-359.
- HUGHES S., Scour A. and Scour Protection. Design of Maritime Structures. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. 21p.
- JIMÉNEZ C. (2015). Fuente Sísmica del Terremoto del Callao 1746. Obtenido mediante Modelo Numérico de Maremoto. 11p.
- JIMÉNEZ C., MOGGIANO N., MAS E., ADRIANO B., FUJII Y. and KOSHIMURA S. (2014). Tsunami Waveform Inversion of the 2007 Peru (Mw 8.1) Earthquake. Building Research Institute, Ibaraki, Japan. Accepted September 29, 2014.
- JIMÉNEZ C., MOGGIANO N., MAS E., ADRIANO B., KOSHIMURA S., FUJII Y. and YANAGISAWA H. (2013). Seismic Source of 1746 Callao Earthquake from Tsunami Numerical Modeling. Journal of Disaster Research, Vol. 8 No. 2, 2013, 8p.
- KAZANA M. and YANAGISAWA E. (2000). Earthquake Motion Intensity from Liquefaction Viewpoint. 12WCEE 2000. 6p.
- KHARADE A. S., DESAI A. K. and KAPADIYA S, V. (2013). Criticality of a Structural Column When Subjected to an Impact Load from Water Born Debris in Tsunami Event. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 [www.ijera.com](http://www.ijera.com) Vol. 3, Issue 1, January – February 2013, pp. 2015-2023, 9p.
- KUROIWA J. (2015). Disaster Risk Management in Developing Countries and the Importance of International Cooperation. Honorary Contribution. Bulletin of IISEE, 49, 65-88, 2015. 27p.
- KUROIWA J. (2014). Peru Sustainable (Resilient) Cities Programme 1998-2012 Its Application 2014-2021. 4ta Conferencia Internacional sobre Edificaciones Resilientes, 8-11 setiembre 2014. Salford Quays, Reino Unido. 8p.
- KUROIWA J., DELGADO A.(2012). Resilient Cities an Effective Way to Reduce Disasters. 15ta. Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica. Lisboa, Portugal 24-28 Set. 2012. 11p.
- KUROIWA J. (2008). New Approach to Reducing The Risk of Natural Disasters. 14ta. Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica 12 – 17 octubre 2008, Beijing, CHINA .8p.

- KUROIWA J. (2008). Reconstruction of Ica, Pisco, Chincha and Cañete, Perú. Based on Updated Hazard Maps. Sixth National Seismic Conference on Bridge & Highways Charleston, Sc. USA. July 27-30, 2008. 11p.
- KUROIWA J. (2005). Water Crisis, Lifelines and Urban Fires. IRCC Global Policy Summit on Sustainability Marriot Resort Surfers Paradise. 15 Sept. 2005. Queensland, AUSTRALIA. 12p.
- KUROIWA J. (2002). Sustainable Cities, a Regional Seismic Scenario, and the 2001.06.23 Arequipa Peru Earthquake. Autor invitado por la NOAA y OEA. Fue publicado en Special Issue of Natural Hazard Review, en noviembre de 2002 por ASCE, con sede en Reston, Virginia, EUA. 5p.
- KUROIWA J. (1996). Integrated Code for Multihazard Mitigation. Eleven World Conferences on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico. June 23-28, 1996. 9p.
- KUROIWA J. (1993). Tsunami 1993. Proceedings of the IUGG/IOC International Tsunami Symposium. Wakayama, Japan August 23-27-1993.13p. Japan Society of Civil Engineers. 11p.
- Mas, E. (2009) Estructuras de concreto armado tsunami-resistentes basadas en experiencias de los tsunamis en el océano Índico (2004) y Camaná (2001). Tesis de Maestría, UNI – Perú.
- MATHEW J., Principal Advisor: YEH H. Oregon State University. FEMA & EERI (2006). Tsunami Inundation of Roadways, Bridges and Foundations. Observations and Technical Guidance from the Great Sumatra Andaman Tsunami. EERI/FEMA NEHRP 2006 Professional Fellowship Report.
- MCEER EARTHQUAKE ENGINEERING TO EXTREME EVENTS (2011). The Great Tohoku, Japan Earthquake & Tsunami: Facts, Engineering, News & Maps. 9p.
- MIDORIKAWA M., NISHIYAMA I., TADA M. and TERADA T. (2012). Earthquake and Tsunami Damage on Steel Buildings Caused by the 2011 Tohoku Japan Earthquake. Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan, 16p.
- MINISTERIO DE DEFENSA. MARINA DE GUERRA DEL PERÚ. Dirección de Hidrografía y Navegación. Informe Post Tsunami, Agosto 2007, 46 p.
- MIYAMOTO. EARTHQUAKE + STRUCTURAL ENGINEERS. Field Investigation Report. 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami. 30p.

- NAKAI S. and SEKIGUCHI T. Damage due to Liquefaction During the 2011 Tohoku Earthquake. Paper No. M-1. CISMID. 8p.
- NATIONAL TSUNAMI HAZARD MITIGATION PROGRAM. NOAA, USGS, FEMA, NSF, Alaska, California, Hawaii, Oregon, and Washington (2001). Designing for Tsunamis Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards, 60p. 7
- NITTA A., Anti-Seismic Measure on Water Supply Introduction and Overview. Water Supply Division. Ministry of Health, Labour and Welfare Government of Japan. 18p.
- OTANI S. (2004). Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Buildings. Past and Future. Journal of Advance Concrete Technology Vol. 2, N° 1, 3-24, February 2004, 22p
- PETERSON C., JOL H., HORNING T. and CRUIKSHANK K. (2010). Paleotsunami Inundation of a Beach Ridge Plain: Cobble Ridge Overtopping and Interridge Valley Flooding in Seaside, Oregon, USA. Journal of Geological Research. Volume 2010 (2010), Article ID 276989, 11p.
- RASKIN J., WANG Y., BOYER M., FIEZ T., MONCADA J., KENT Y. and YE H. An evacuation building project for Cascadia earthquakes and tsunamis. Obras y Proyectos 9, 11-22, 6p.
- RODRÍGUEZ-MAREK A., ALVA HURTADO J., COX B., MENESES J., MONTALVA G., MORENO V., OLCESE M., SANCIO R. and WARTMAN J., Geotechnical Aspects of the August 15, 2007 Pisco, Peru Earthquake. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 7(2-3) 239, 20p.
- RHODES B., TUTTLE M., HORTON B., DONER L., KELSEY H., NELSON A. and CISTERNAS M. (2006). Paleotsunami Research. Eos, Vol. 87, N° 21, 23 May 2006, 13p.
- SIMONS M., MINSON S., SLADEN A., ORTEGA F., JIANG J., OWEN S., MENG L., AMPUERO J.P, WEI S., CHU R., HELMBERGER D., KANAMORI H., HETLAND E., MOORE A. and WEBB F. (2011). The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries. SCIENCE VOL 332 17 JUNE 2011, 14p.
- SUPPASRI A., MUHARI A., RANASINGH P., MAS E., SHUTO N., IMAMURA F. and KOSHIMURA S. (2012) . Damage and reconstruction after the 2004 Indian Ocean tsunami and the 2011 Great East Japan tsunami. Journal of Natural Disaster Science, Volume 34, Number 1, 2012, pp19-39.
- Swanson David et all (Team leader). STRUCTURAL ENGINEERS ASSOCIATION OF WASHINGTON. Earthquake Reconnaissance.

OBSERVATIONS (2011). Great East Japan (Tohoku) Earthquake and Tsunami. June 2011, 14 p.

- The miracle of Kamaishi: How 3,000 students survived 3/11. Public Relations Office Government of Japan. <http://mnj.gov-online.go.jp/kamaishi.html>
- UNISDR. ESTRATEGIA INTERNACIONAL PARA LA REDUCCIÓN DE DESASTRES (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. 38p.
- YAMAZAKI F. and ZAVALA C. (2012). SATREPS Project on Enhancement of Earthquake and Tsunami Disaster Mitigation Technology in Peru. Journal of Disaster Research, Vol.8, No.2. 224-234, 11p.