

## Microzonificación Sísmica Aplicada al Planeamiento Urbano para la Prevención de Desastres



Ing. Julio Kuroiwa Horfuchi

Universidad Nacional de Ingeniería  
Departamento Académico de Estructuras y  
Construcción.

### RESUMEN

Se presenta la metodología para efectuar estudios de Microzonificación Sísmica desarrollada en el Perú en la década del 70, a partir de las investigaciones efectuadas por la Misión Japonesa presidida por el Dr. R. Morimoto (14), en Chimbote, después del terremoto del 31 de Mayo de 1970. A lo largo de esos años a la vez que se fueron actualizando algunas técnicas, como por ejemplo, la aplicada en Dinámica de Suelos, se fueron teniendo en cuenta los fenómenos naturales que suceden en el país: inundaciones, huaycos, avalancha, erosión, tsunamis, modificación del medio ambiente por la actividad del hombre, etc.

Los estudios de Microzonificación Sísmica se aplican para un uso óptimo del suelo en cuanto a seguridad en complejos industriales, hospitalarios, nucleares, educacionales, etc y expansiones urbanas.

A raíz del terremoto de Arequipa de Febrero de 1979, se desarrolló una metodología simplificada y de bajo costo para ser aplicada en asentamientos humanos de hasta unos 10.000 habitantes con lo que su campo de aplicación se amplía grandemente.

Finalmente se dan algunos lineamientos para la aplicación de la Microzonificación Sísmica en el planeamiento de asentamientos humanos pensando que podrá servir de puente entre los planificadores urbanos e ingenieros sísmicos y juntos poder hacer un poco más seguros el habitat del hombre y pueda así mejorar su calidad de vida.

### INTRODUCCION

Los terremotos ocurridos en el Perú en 1970, 1974 y 1979 cuyos efectos fueron estudiados por un grupo de investigadores, que incluye al autor (3), (5), (10), han demostrado claramente que las condiciones locales de suelo y

geología así como la topografía, tienen influencia muy importante en la intensidad de las vibraciones sísmicas y por lo tanto en la distribución de los daños que causaron.

Adicionalmente a la gran cantidad de información y situaciones que se deben considerar en el planteamiento y diseño de asentamientos urbanos (haciendo un balanceado uso de ellas), es necesario evaluar las condiciones existentes en los lugares propuestos desde el punto de vista de la seguridad sísmica y de otros fenómenos naturales que los puedan afectar. Estas últimas informaciones pueden ser proporcionadas por estudios de microzonificación sísmica del área, que consisten en investigaciones multidisciplinarias que dividen la zona en consideración en subáreas de diferente riesgo.

Los componentes urbanos más importantes, como las zonas residenciales de alta densidad y las zonas industriales de la cual depende la vida económica de la ciudad, se ubican en las áreas de menor riesgo y las áreas más peligrosas se designan para parques, áreas recreacionales abiertas ó algún otro uso apropiado.

Este trabajo describe de manera breve los métodos de microzonificación sísmica desarrollados y aplicados en el Perú (11), que se usan para la expansión de ciudades importantes, complejos industriales, etc, y también un método simplificado y de bajo costo que ha sido propuesto para asentamientos humanos desde unos pocos centenares hasta aproximadamente 10.000 habitantes (7), (9), el que puede ser utilizado en numerosas localizaciones de nuestro país.

Las pérdidas causadas por desastres naturales en el país, muestran que no es suficiente estimar las intensidades de futuros sismos basándose en la amplificación de las ondas sísmicas, sino que es necesario considerar también los efectos secundarios de los sismos como avalanchas, deslizamientos de tierra, tsunamis licuefacción

de suelos, etc. y otros desastres naturales no generados por terremotos como huaycos, inundaciones, erosiones, etc. (6).

Es necesario, además, visualizar cómo las actividades de las concentraciones humanas van a afectar el área ocupada, por ejemplo: un suelo granular inicialmente seco, después que se satura con agua puede ser susceptible de licuefacción. Ciertos tipos de suelos arcillosos (expansivos) pueden incrementar sustancialmente su volumen cuando la humedad es incrementada. La sobreexplotación de la floresta puede cambiar desfavorablemente el clima y causar erosión, etc.

Se incluyen algunos ejemplos de aplicación de técnica de micronificación sísmica aplicada a planeamiento urbano.

Se estima que si los asentamientos humanos se planifican para hacer frente a los desastres y las estructuras de los edificios se adecuan para hacer frente a los sismos (12), los daños en futuros eventos se pueden reducir drásticamente.

De acuerdo a lo expuesto, este trabajo trata de cerrar la brecha que existe entre los planificadores urbanos (1), (2) y los ingenieros sísmicos, de tal manera que juntos puedan ser capaces de mejorar la calidad de la vida de los asentamientos humanos en áreas sujetas a desastres.

## EL PERU Y SUS DESASTRES NATURALES MAS FRECUENTES

El Perú está ubicado en la parte centro-occidental de Sudamérica, donde el rasgo geográfico más importante lo constituye la Cordillera de los Andes. Esta Cordillera corre paralela al borde del Océano Pacífico entre el istmo de Panamá y lago de Maracaibo en el Norte, hasta el Cabo de Hornos en el extremo Sur del continente. A través de su desarrollo tiene dos o tres cordilleras que se juntan en algunos puntos y vuelven a separarse. Los picos más altos están localizados entre el Volcán Tolima en Colombia y el pico Tupungato cerca a Santiago de Chile, donde muchos de ellos sobrepasan los 6.000 metros de altura. Desde esos puntos hacia el norte y hacia el sur respectivamente, los Andes decrecen en altitud. Como es bien conocido, los Andes es el resultado de la interacción entre la placa Nazca u oceánica y la placa Sudamérica o Continental. La primera subduce debajo de la segunda diagonalmente, creando una banda de 300 a 400 kilómetros de ancho, de alta sísmicidad en la costa Oeste de Sudamérica, la cual es a su vez un segmento de la cadena Circumpacífica. Por esta razón, es necesario considerar los efectos de los sismos sobre los asentamientos humanos, prácticamente en todo el territorio del Perú.

Entre los Andes y el Océano Pacífico existe una región costera angosta, que es cortada transversalmente por ríos cortos y torrentosos. Desde Sechura en el Norte del Perú, a Atacama en la parte centro-norte de Chile, el clima es muy árido, prácticamente sin lluvias y la topografía es desértica debido al agua fría que arrastra la corriente de Humboldt desde el Antártico y que corre de Sur a Norte. Sin embargo cada 10 ó 20 años, durante el verano del Hemisferio Sur; la corriente de aguas calientes del Niño avanza desde la frontera

Perú-Ecuador hacia el Sur hasta aproximadamente la parte central del primera, cambiando dramáticamente las condiciones de cerca de 1 000 kms de longitud en la Costa. Las lluvias torrenciales que genera causan inundaciones destruyendo poblaciones de adobes, caminos, obras de irrigación, áreas cultivadas, etc., debido a que no están preparados para resistir este fenómeno, relativamente poco frecuente. La vida marina también es cambiada, causando que la anchoveta, un importante pez en la economía del país, desaparezca por varios años. El verano de 1983 este efecto ha sido particularmente severo y los daños causados en Tumbes, Piura, Lambayeque, Trujillo, Ancash y Lima en caminos, puentes, edificaciones, obras portuarias, instalaciones industriales, etc. llegan a varios centenares de millones de dólares americanos. 1925 fue también otro año que causó daños devastadores.

Por otra parte, entre el Callao (Perú) y Sur de Chile, la plataforma continental es angosta y la costa es alta, creando condiciones favorables para tener olas altas durante los tsunamis. Todos los tsunamis destructivos que han atacado la Costa Oeste de Sudamérica en los últimos cuatro siglos han ocurrido del Callao hacia el Sur, excepto dos que han ocurrido en Tumaco, Colombia en 1906 y en 1979. Sin embargo, en un plano batimétrico del Perú se podrá observar que frente al Departamento de Piura, la plataforma continental vuelve a angostarse creando posibilidades de olas altas y corto tiempo entre la ocurrencia del sismo tsunamigénico y la llegada de la primera ola a la costa. El tsunami más destructivo que registra la historia en el Perú fue el que ocurrió en 1746, ocasión en el Callao fué arrasado por olas de 6 metros de altura matando a 5.000 habitantes, excepto 200 que lograron sobrevivir a este fenómeno.

La región de la Sierra está formada por las cordilleras por encima de los 1 000 metros de altura y los valles interandinos que corren paralelos a dichas montañas de Norte a Sur. Allí los problemas son diferentes que en la Costa. Por ejemplo, en el Callejón de Huaylas, un valle angosto de unos 200 kilómetros de largo está flanqueado por la Cordillera Negra en el Oeste y la Cordillera Blanca en el Este. Esta última tiene algunos picos de más de 6.000 metros de altura cubiertos permanentemente de nieve, a pesar de que están ubicados solamente unos 9 grados al Sur de la Línea Ecuatorial. La altura promedio del valle es de 3.000 metros de altura, de tal manera que existe una peligrosa energía potencial de unos 3.000 metros. Durante el terremoto de Ancash de 1970, millones de toneladas de nieve, barro y roca se desprendieron del pico Norte del Huascarán (6.768 mts.) y la avalancha enterró a la ciudad de Yungay causando cerca de 20.000 muertos. Pero la inestabilidad no solamente es causada por vibraciones sísmicas. Durante temperatura se incrementa por encima del promedio, la nieve se derrite en la base de las montañas y se generan avalanchas, como aquellas que afectaron a Huaraz en 1941 y Ranrahirca en 1962, ocasiones en que cientos de viviendas fueron enterradas conjuntamente con sus habitantes.

Valles profundos al lado de altas montañas

generan deslizamientos de tierra y barro, los cuales son causados por los sismos o por saturación de agua durante la temporada lluviosa de Enero a Marzo, cada año. Los caminos quedan bloqueados en muchos sitios y algunas construcciones son baridas por los huaycos.

Al Este de los Andes se ubica la Selva Amazónica, que cubre el 50 % del territorio peruano. Es necesario hacer una distinción entre la Selva Alta comprendida entre los 500 y 1.200 metros de altura y la Selva Baja, debajo de los 500 metros.

La Selva Amazónica es la región más lluviosa de la tierra y esto causa diferentes problemas. En las zonas altas ocurren deslizamientos después de pocas horas de intensas lluvias al nivel de los ríos que fluyen en el fondo de los valles ó cañones, pueden incrementar su tirante de agua en varios metros.

En la Selva Baja, pocos días después de que ocurre una lluvia intensa en la Sierra o en la Selva Alta, donde las cuencas de recolección son muy extensas los ríos que normalmente pueden convertirse en cursos de agua de cientos de metros o varios kilómetros de ancho, inundando extensas áreas.

En la Sierra y en parte Alta de la Selva, en áreas cercanas a los asentamientos humanos, a sobreexplotación de la floresta ha causado que los suelos sean expuestos a erosiones y en algunos casos el clima ha cambiado en forma desfavorable.

Esta es la clase de información general, que conjuntamente con los datos estadísticos para el área de interés, como aquellos incluidos en el Ref. 4 para la Segunda Región de Defensa Civil del Perú, dá una buena idea de qué tipo de desastre natural se espera ocurra en las diferentes regiones del Perú, siendo de necesidad investigarlo en detalle para la zona asignada para las poblaciones y debe ser considerado por el planificador urbano.

## MICROZONIFICACION SISMICA CON FINES DE PLANTEAMIENTO URBANO

El principal objetivo de los estudios de Microzonificación Sísmica para el Planeamiento Urbano, es seleccionar las mejores ubicaciones, libres de la amenaza de fenómenos naturales como avalanchas, deslizamientos, inundaciones, etc., que serán usadas para los asentamientos humanos. Una vez que el área general ha sido seleccionada, ésta se subdivide en áreas de diferente riesgo sísmico.

Las mejores zonas deberán ser asignadas para áreas residenciales de alta densidad y para instalaciones industriales importantes. Allí también deberán ubicarse las instalaciones que son importantes en caso de catástrofes como: hospitales, asistencias públicas, cuarteles de policías y bomberos, edificios públicos, etc. Las áreas más desfavorables deben ser designadas para áreas recreacionales abiertas, avenidas, etc.

Las troncales de las tuberías de agua deben evitar los suelos más desfavorables y cuando éstos cruzan suelos de diferentes características deben usarse juntas flexibles. En pasados sismos las subestaciones eléctricas han sufrido daños importantes, especialmente en los elementos de porcelana usados como aisladores. Por estas razones es necesario

escoger zonas de buen suelo para este tipo de instalaciones.

La metodología de estudio de microzonificación sísmica que se viene utilizando en el Perú está incluido en la Ref. 10; sin embargo aquí se presenta un resumen, al que se ha agregado algunos comentarios que dan énfasis a la correlación que debe existir entre las diferentes especialidades que intervienen en estos estudios.

Un estudio de microzonificación sísmica típico incluye áreas de decenas o centenares de hectáreas, las cuales son subdivididas en áreas de diferentes riesgos, usando una aproximación interdisciplinaria y unificada de las siguientes especialidades:

#### Sismología

Usando la información de terremotos históricos y la actividad tectónica, se determina el nivel regional de actividad sísmica; pero de acuerdo a los conocimientos de técnicas actuales, es impráctico tratar de definir la sismicidad de localizaciones específicas de manera precisa.

#### Geología

Por inspecciones de campo, interpretación de fotografías aéreas y la correlación entre las estructuras geológicas locales con la estructura regional, el geólogo determina el grado de seguridad del área basándose en la litografía encontrada (tipo de rocas, características estructurales, fracturas, fallas, folding, etc.), y la posibilidad de ocurrencia de fenómenos de geodinámica externa como: deslizamientos, inundaciones, erosiones, avalanchas, etc. El aspecto hidrogeológico es una parte importante del estudio. La investigación da como resultado un mapa de microzonificación geológica el cual debe ser usado como primer input para planificador urbano y para efectuar un buen programa de exploración de suelos, de tal manera que el número de perforaciones sea el mínimo, ahorrando así tiempo y dinero.

#### Mecánica de suelos

La distribución de los pozos de exploración de suelos y su profundidad puede ser basado en el diseño preliminar tridimensional efectuado por el planificador urbano, así como en las investigaciones geológicas previas. La determinación de capacidad portante del suelo a nivel de cimentación y la determinación de la profundidad de la capa de agua, son dos de las más importantes informaciones que deben ser determinadas. Si se va efectuar estudios de Dinámica de Suelos, los parámetros estáticos como densidad del suelo, espesor de los estratos, etc. son también determinados en esta etapa de las investigaciones.

#### Dinámica de Suelos

Las velocidades de las ondas P y S son los parámetros del suelo más importantes por determinar. Al presente existen en el mercado instrumentos para efectuar dichas mediciones que son fáciles de usar y mantener. Utilizando las perforaciones realizadas en los estudios de Mecánica de Suelos para instalar geófonos a

distintas profundidades, se generan ondas P y S en la superficie mediante golpes dados con un martillo a una pieza de madera, la cual está presionada contra el suelo, registrándose señales con las cuales es posible determinar las velocidades determinadas. Este método se conoce como Down Hole, existiendo otros métodos parecidos (Up Hole, colocando explosiones a diferentes profundidades y geófonos en la superficie; Cros Hole, donde se utilizan 2 perforaciones y empezando desde la parte más profunda, se explotan pequeñas cargas en una de ellas y se recoge la señal en el otro pozo; y se va subiendo hasta llegar cerca a la superficie).

Entonces, si a través del modelo dinámico de suelo obtenido de los datos anteriores, se filtran registros de sismos reales o sismos artificiales que se supone parten de la roca o de un suelo rígido, se puede determinar las características dinámicas de los estratos a través de las cuales pasan estas ondas. Procesada la señal simulada en un computador y escalándola convenientemente, se puede determinar el aspecto de diseño sísmico.

#### Otras investigaciones

Si no existen mapas topográficos es necesario efectuar un levantamiento del área, ya que es la información básica para el diseño urbano. Además, este mapa ayuda a ubicar y delimitar las zonas que pueden ser afectadas por ciertos desastres naturales, como por ejemplo, las áreas bajas que pueden ser afectadas por inundaciones, o las zonas de fuerte pendiente que pueden ser susceptible de deslizamientos. Conociendo el área de la cuenca y estimando la intensidad de las lluvias es posible prever los drenajes, etc.

La información batimétrica de unas decenas de kilómetros de la línea costera es necesaria para estudiar la refracción de ondas de los tsunamis de origen cercano, con lo cual es posible calcular el tiempo de arbo del tsunami y estimar la altura de las olas y las áreas que serán inundadas.

Si el área contiene suelos que están sobresaturados y consisten en arenas finas, la posibilidad de licuefacción debe ser investigada

#### Ingeniería Antisísmica

En la metodología desarrollada la coordinación de las diferentes especialidades es efectuada por el Ingeniero Sísmico, porque él tiene un conocimiento amplio del problema y generalmente es responsable del diseño estructural. Puede por lo tanto señalar los valores de los diferentes coeficientes sísmicos dentro de rangos prácticos y asimismo puede decidir en coordinación con los otros especialistas con qué detalle deben ser efectuados los estudios de microzonificación sísmica.

El informe final que prepara sintetiza los resultados de todos los estudios anteriores y los presenta en forma de normas de diseño sísmico, de tal manera que pueden ser usadas directamente por el ingeniero estructural. La última parte es especialmente importante en el

Perú para los casos en que no existen normas sísmicas oficiales para obras especiales como represas, puentes, instalaciones portuarias, etc.

Sin embargo para el diseño urbano, el Ingeniero Sísmico, usualmente, no tiene suficiente conocimiento de los diferentes factores que es necesario considerar, y cómo usarlos para obtener una solución balanceada del problema, por lo que el trabajo en equipo es sumamente importante.

#### MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE MICROZONIFICACION SISMICA PARA EL PLANEAMIENTO URBANO

Cuando ocurrió el terremoto de Febrero en 1979 en Arequipa, (7), (9), el autor pensó que era una buena oportunidad para verificar las conclusiones concernientes a la influencia de las condiciones locales en la distribución de daños, obtenidos de las investigaciones previas en los terremotos de 1970 y 1974. También para desarrollar un método simple y de bajo costo que, por prescindir de instrumentos sofisticados, pueda ser usado por personal no especializado y de poca experiencia y ser aplicado de manera extensiva en el Perú, país castigado por varios tipos de catástrofes naturales.

Entre las conclusiones por verificar en el campo se tenían: que la intensidad sísmica se incrementaba si el nivel de la mesa de agua se hacia más superficial, que la intensidad se incrementaba en zonas de fuertes pendientes en suelos de mediana o baja compacidad o blandos pero prácticamente no tenía influencia en suelos rocosos o muy rígidos, que el grado de compactación del suelo y el contenido del agua son importantes, etc.

Para el trabajo de campo se contó con el concurso de 5 egresados del Programa Académico de Ingeniería Civil de la U.N.I., quienes cumplían su servicio de graduandos (SECIGRA) y preparaban al mismo tiempo sus Tesis Profesionales. Por las limitaciones existentes en cuanto al número del personal y los fondos económicos disponibles, era necesario encontrar una manera sencilla de identificar en el campo todas las variables que influyen en la distribución de daños. Por otro lado, se pensó en proporcionar alguna ayuda técnica a las poblaciones afectadas por el sismo las cuales, con excepción de Arequipa, tienen un rango de población de 1.000 a 10.000 habitantes. Se llegó a la conclusión que, por sus características y condiciones, dichas poblaciones tenderían a expandirse alrededor de las presentes ubicaciones y dentro de un radio que permitiría a sus pobladores utilizar los servicios existentes sin necesidad de desplazarse con vehículos motorizados. O tenderían a densificarse dentro de los límites actuales. Cualquiera de las dos alternativas reducía el área por investigar.

La mayoría de las edificaciones existentes en estas poblaciones son de adobe o quuncha y seguramente un gran porcentaje de las que se construirán en el futuro próximo serán de tales materiales, con muy escasas de concreto armado (escuelas, hospitales, cinemas, etc.), de tal manera que en estos lugares no será necesario utilizar métodos sofisticados de

microzonificación, a diferencia de los que sea necesario emplear para diseñar, por ejemplo, un reactor nuclear.

De esta manera, se concluyó que era solamente necesario clasificar los suelos de las posibles áreas de expansión de acuerdo a sus características relativas: capacidad portante del suelo, nivel de la napa freática, pendiente, etc. y tener en consideración la posibilidad de ocurrencia de fenómenos de geodinámica externa como huaycos, deslizamientos, inundaciones, etc.

Por razones de espacio solo se incluyen algunos resultados de los estudios realizados en las zonas afectadas del Departamento de Arequipa. Aplao con 6.500 habitantes, Huancarqui (2.000) y Corire (4.300), son tres poblaciones vecinas, ubicadas a unos 37-38 kms. del epicentro. Las dos primeras en los bordes del valle de Majes y el último prácticamente en el centro del mismo. En el sismo que afectó la zona en Febrero de 1979, el efecto de microzona fue claro, es decir, la distribución de daños muestra una buena correlación con las características locales de suelo, geología y topografía.

La mayor parte de Aplao y Huancarqui se desarrollan sobre terrazas 2 a 10 metros sobre el nivel del valle de Majes. Aplao, sobre una franja de 0.8 kms. de ancho, con una inclinación de 15 a 20° y paralela a una alta cadena de cerros, mientras que Huancarqui está ubicado sobre un terreno prácticamente plano. El suelo es similar en ambas localidades y consiste en gravas angulosas empacada en una compacta matriz areno-limosa, muy seca, con solamente 1 a 2% de humedad. La capacidad portante del suelo varía entre 2 y 3.5 kg/cm<sup>2</sup> de capacidad portante. Prácticamente todas las construcciones de adobe que se dañaron en esas localidades se ubican en las zonas nuevas, bajas y húmedas. En la parte alta y seca, existen numerosas construcciones antiguas de adobe que no sufrieron daños, a pesar que la zona ha sido afectada por lo menos por dos sismos destructivos ocurridos en 1958 y 1960.

De acuerdo al Plan Regulador Preparado por el Ministerio de Vivienda para Aplao, la ciudad debe expandirse hacia el valle, teniendo como eje al camino a Huancarqui. Sin embargo el estudio realizado indica que hacia el norte de Aplao existe una zona de pendiente suave y suelo seco y compacto, favorable desde el punto de vista sísmico, adecuado para su expansión, con la ventaja adicional que no se destruirían terrenos cultivados, que en la costa del Perú son escasos y costosos de irrigar. (Ver Fig. 2).

Corire, situado en pleno valle, está rodeado por cultivos de arroz, que requieren de gran cantidad de agua para su desarrollo y la napa de agua esta a solo 0.5 m de la superficie. El estrato superficial que tiene un promedio medio metro de potencia es arcilla de baja plasticidad. Luego sigue en profundidad una capa de arena fina de unos 0.6 m de espesor y subyace un potente estrato de grava redondeada con matriz de limo y arena. La capacidad portante del suelo a nivel de cimentación es de 0.8 - 0.9 kg/cm<sup>2</sup>. En Corire, prácticamente todas las construcciones de adobe sufrieron daños importantes a graves, mientras que en Aplao u Huancarqui los daños fueron mucho menores en su conjunto, debido a que la mayor parte de esas poblaciones se desarrollan sobre suelos secos y

compactos. En cambio, en Corire las viviendas de quincha tuvieron un comportamiento satisfactorio.

Uno de los barrios de Chuqubamba se desarrolla en una zona de fuerte pendiente, donde el suelo es poco compacto y la humedad es alta. Allí, el 10% de las construcciones de adobe sufrieron graves daños. En cambio en Arequipa en varios lugares como Suchaca, con pendientes muy fuertes, las construcciones antiguas de sillar sin reforzar construida sobre roca no sufrieron daños, ni en esta ocasión ni en las anteriores como en 1958 y 1960, ocasiones en que Arequipa fue acudida por violentos terremotos que causaron graves daños en zonas de suelo poco compacto.

Pampacolca se desarrolla sobre un terreno de suave pendiente y pasa por su borde superior un riachuelo que humedece la franja. Los daños aquí fueron claramente mayores que en la parte baja que es seca. Como dentro del poblado existen en la actualidad una gran cantidad de terrenos sin construir, se recomendó densificar la población en la parte baja y seca.

### PROBLEMAS DE LAS POBLACIONES QUE SE ASIENTAN A LO LARGO DE LAS COSTAS

Si se producen terremotos tectónicos en el mar de magnitud mayor de 7.8 a 8, con desplazamiento vertical del fondo oceánico del orden de unos metros, un porcentaje importante de la energía que se libera en el evento se transmite a la masa de agua.

Las olas de periodo largo que se generan (de varios minutos a una hora), se irradian en todas direcciones a través de los océanos. En aguas profundas las alturas de las ondas son del orden de unos pocos decímetros, pero al acercarse a aguas poco profundas las alturas se incrementan notablemente y avanzan como verdaderos muros de agua de varios metros de altura. Si la batimetría y topografía son desfavorables, como ocurre en algunas bahías en forma de "V" o "U", que se abren hacia el mar en Sanriku en el Norte del Japón, las olas pueden alcanzar hasta 30 m. de altura y causar numerosas víctimas y graves pérdidas materiales.

En el Perú, del Callao hacia el sur, desde el siglo XVI se han registrado numerosos tsunamis, pero el más destructivo fue el que atacó el Callao el 28 de Octubre de 1746, ocasión en que el vecino puerto fue barrido por olas de unos 7 m. de altura causando la muerte de los 5.000 habitantes que tenía para entonces, excepto 200 que lograron salvarse asidos a troncos y otros objetos flotantes y fueron varados en Chorrillos y la isla San Lorenzo.

Lima Metropolitana con una población actual de unos 4.5 millones de habitantes duplicará el número de sus habitantes para el año 2.000. Las áreas disponibles para su expansión son los desiertos que se desarrollan al norte y al sur de la Capital. Centenares de miles se asentaron a lo largo de los 100 kms. de costa que se desarrolla entre Ancón y Pucusana.

Entre Marzo de 1981 y fines de 1982 se realizó en la U.N.I. un estudio en el tramo de costa mencionado, con auspicios de UNDRP (Oficina de Naciones Unidas para la Atención de Desastres) con los siguientes objetivos

principales: (8)

Proteger a la población que actualmente vive en zonas inundables por tsunamis.

Efectuar los futuros asentamientos debidamente planificados para que no estén expuestos a la amenaza de maremotos.

Desarrollar una metodología simple y práctica que pueda ser aplicada en otras zonas del Perú. De acuerdo a los objetivos antes indicados se efectuaron los siguientes estudios:

Localización de las zonas donde ocurren los sismos tsunamigénicos y delimitación de las áreas de los fondos oceánicos que se dislocarían generando los tsunamis

Trazado de las curvas de refracción. Conocer la hora de ocurrencia del sismo, permitir determinar la hora de llegada de la primera ola a la costa y por lo tanto el tiempo que tarda en viajar desde su origen hasta la zona de interés.

El conocimiento de este tiempo es crucial para planificar la evacuación de la población. Según los estudios realizados en la U.N.I., el tiempo de llegada de la primera ola de un tsunami de origen cercano es de 20 a 30 minutos para los sismos que ocurren frente a las costas de Lima Metropolitana. Este valor ha sido verificado tanto con informaciones históricas (el maremoto de 1746 llegó al Callao a las 10:30 p.m. y el terremoto que lo generó ocurrió a las 10:00 p.m.), como con registros de fenómenos reales (la primera ola fue registrada en el mareógrafo de la Punta 21 minutos después que ocurrió el sismo del 3 de Octubre de 1974, cuyo epicentro se localizó justamente frente al Callao).

Debido a que el intervalo entre la ocurrencia del sismo tsunamigénico y la llegada de la primera ola es corto, se ha pensado que la señal de alarma que pondría en ejecución los planes de evacuación podría ser el propio terremoto si la intensidad excede el grado VIII M. M.

Las curvas de refracción también permiten visualizar la dirección de ataque de las olas. Esta información es importante para ubicar y diseñar los edificios que dan frente al mar para que los efectos del tsunami sean mínimos. Se sabe por hidráulica, que el empuje horizontal será menor cuanto menor sea el área del edificio que se exponga a la presión del agua. Por otra parte permite incluir en la dirección de ataque muros de corte para incrementar su resistencia lateral.

En casos complicados como el que se presenta en el Callao, donde frente a la península de la Punta existe la isla San Lorenzo que tiene cierta importancia, la dirección de ataque del tsunami no es obvia y es necesario determinarla. Según los estudios efectuados, cualquiera que sea la zona de origen del tsunami, al N-W, al frente de al S-W del Callao, antes de llegar a la isla San Lorenzo el frente de ondas gira y avanza, paralelo a la costa, se abre al chocar contra la isla y luego avanza simultáneamente desde el N-W y S-W, llegando perpendicularmente a los bordes norte y sur de la península.

El cálculo de la altura de ola y la delimitación de las zonas inundables para el caso de zonas habitadas, permite determinar que población debe ser evacuada, ubicar las zonas seguras que servirán como refugio y seleccionar las rutas de escape.

Para planificar los futuros asentamientos humanos esta información es primordial, pues las áreas inundables deben ser utilizadas para

actividades recreacionales. Para el caso de Lima Metropolitana en los 100 kms. de costa que se extiende entre Ancón y Pucusana, los estudios indican que si se deja libre una franja de 0.5 kms. de ancho paralelo al mar o no se edifica a menos de unos 6 m. sobre el n.m.m. la amenaza de tsunamis prácticamente desaparece. Por otra parte es necesario reservar dichas áreas para el verano de los cerca de 10 millones de limeños que vivirán en el área estudiada allá por el año 2.000. Una información un poco más amplia sobre esta investigación se reportó en el Congreso Nacional realizado en Chiclayo en Noviembre de 1982 (13) y el estudio completo se incluye en el informe presentado a UNDR0 (8). Lima tiene otros problemas de seguridad que se resumen en la Ref. 4.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El planeamiento y diseño de asentamientos humanos es la aplicación más útil y obvia de los estudios de Microzonificación Sísmica para la prevención de desastres en centros poblados. En el Perú, a partir de los estudios de Microzonificación Sísmica efectuada por la Misión Japonesa presidida por el Dr. Morimoto para la ciudad de Chimbote después del sismo de 1970 (12) se ha desarrollado una metodología que ha incorporado las condiciones locales. Esta metodología, se ha ido actualizando de acuerdo al avance de la técnica y ha sido aplicada en el estudio de varias ciudades, complejos pesqueros, hospitalarios educativos, Centro Nuclear del Perú, etc. A raíz del sismo de Arequipa de 1979, se desarrolló un método simplificado y de bajo costo, que se aplicó en varias poblaciones del valle de Majas y Camaná. Esta metodología puede ser usada en la expansión de poblaciones pequeñas, con lo que sería posible proteger contra desastres un número muy grande de centros poblados ubicados a lo largo y ancho de nuestro territorio. Se pueden salvar muchas vidas y disminuir drásticamente los daños producidos por catástrofes naturales que asolan nuestro país. Si los asentamientos humanos se realizan y la infraestructura se efectúa de manera planificada, teniendo muy en cuenta las condiciones naturales existentes en la zona asignada para el proyecto. Si cada edificación u obra especial de Ingeniería Civil se diseña planificando la defensa contra el ataque que sufrirá. Por ejemplo, en un edificio de concreto

armado, adicionándole muros de corte en lugares estratégicos y diseñando un sistema espacial dúctil de columnas y vigas. Así se logra que el edificio tenga una defensa escalonada contra el ataque de terremotos. La posibilidad de supervivencia del edificio es muy alta, aún en caso de sismos muy severos. Finalmente una buena construcción y supervisión completan los eslabones de la cadena de seguridad que proporcionarán al hombre u habitante donde pueda vivir con confort, sin angustias, mejorando su calidad de vida.

## RECONOCIMIENTO

El presente trabajo resume los trabajos de investigación que el autor ha efectuado en la Universidad Nacional de Ingeniería en los últimos años, con la colaboración de un buen número de egresados del Programa Académico de Ingeniería Civil al desarrollar su Tesis Profesional quienes han aportado generosamente su capacidad y su tiempo y también muchas veces han contribuido con parte de los gastos. A todos y cada uno de ellos un reconocimiento especial.

El autor expresa su agradecimiento a las autoridades de la U.N.I. por las facilidades brindadas para el desarrollo de los estudios. También a UNDR0, Secretaría Ejecutiva del Comité Nacional de Defensa Civil, JICA, la Agencia de Cooperación Internacional del Japón por el apoyo brindado en la realización de algunos de los trabajos de investigación.

## REFERENCIAS

1. Alegre Enrique, Director del Instituto de Planeamiento de Lima, U.N.I., Lima, Comunicación Personal, 1982.
2. Baba Julio, Ex-funcionario del Plan Chimbote, Comunicación Personal, 1982.
3. Deza E., Jaen H. and J. Kuroiwa, "Investigation of the Peruvian Earthquake of October 3, 1974 and Seismic Protection Studies of the Lima Metropolitan Area", Memorias VI Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Nueva Delhi, India, Enero, 1977.
4. Kuroiwa J., "Protección de Lima Metropolitana ante Sismos Destructivos", Publicación Especial en Homenaje al Centenario de la U.N.I., auspiciado por Defensa Civil, (136 pgs.), Lima, Marzo, 1977.

5. Kuroiwa J., "Aspectos Ingenieriles del Sismo de Majes-Arequipa del 16 de Febrero de 1979", Boletín de la Asociación Peruana de Ingeniería Sísmica, pp. 13-42, Lima, Abril, 1979.
6. Kuroiwa J., "Studies on the Prevention of Earthquake Disasters and their Application in Urban Planning in Peru", Reunión de Expertos Ad Hoc convocado por Naciones Unidas, Nairobi, Kenya, Enero, 1981.
7. Kuroiwa J., "Simplified Microzonation Method of Urban Planning", Memorias III Conferencia Internacional de Microzonificación Sísmica, Seattle, Washington, Junio-Julio, 1982.
8. Kuroiwa J., "Tsunamis: Efectos sobre Lima Metropolitana", Informe especial para UNDR0 (United Nations Disaster Relief Office), Ginebra, Suiza, 1983.
9. Kuroiwa J., S. Beltrán, P. Orihuela C. Rodríguez y O. Tovar, "Microzonificación Sísmica Aplicada al Planeamiento Urbano de las Zonas Afectadas por el Sismo de Arequipa del 16 de Febrero de 1979". Forum Arequipa Año 2.000. Arequipa, Agosto, 1980.
10. Kuroiwa J., Deza E. and H. Jean, "Investigation of the Peruvian Earthquake of May 31 1970", Memorias V Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Roma, Italia, Junio, 1973.
11. Kuroiwa J., E. Deza, H. Jean and J. Kogan, "Microzonation Methods and Techniques used in Peru", Memorias II Conferencia Internacional de Microzonificación Sísmica, San Francisco, California, Noviembre-Diciembre, 1978.
12. Kuroiwa J., and J. Kogan, "Repair and Strengthening of Buildings, Damages by Earthquakes", Memorias VII Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Estambul, Turkia, Setiembre, 1980.
13. Kuroiwa J., Delgado A., García C., Lagos M., "Los Tsunamis, las Obras Civiles, el Planeamiento Urbano y la Protección de la Población", Ponencias del Cuarto Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo, Noviembre, 1982.
14. Morimoto R., Koizumi Y., Matsuda T. and N. Hakuno, "Seismic Microzonation of Chimbote Area, Peru", OTCA Agencia de Cooperación Técnica de Ultramar, Gobierno del Japón, 1971.