

# RESUMEN DEL ESTUDIO Y RECOMENDACIONES AL GOBIERNO PERUANO

## R E S U M E N

En 1973 se inició en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) de Lima, Perú, un estudio para determinar la vulnerabilidad de Lima Metropolitana frente a sismos destructivos, a fin de tomar medidas preventivas para proteger a sus cerca de 5 millones de habitantes y minimizar el impacto sobre la economía del área.

La presente investigación, auspiciada por UNDRO (United Nations Disaster Relief Office), es la continuación del estudio anterior, profundizándose en uno de los problemas más críticos encontrados por éste. Consiste en estudiar la acción destructiva de los Tsunamis o Maremotos y determinar qué medidas preventivas pueden tomarse en las costas bajas de Lima Metropolitana, unos 100 kms. con el Callao como punto focal. Este puerto, el más importante del Perú, que en el siglo XVIII tenía cerca de 5,000 habitantes, fue completamente destruido por el terremoto y tsunami de 1746, oportunidad en que lograron salvarse sólo 200 personas.

En este estudio se trató de determinar: que causaría un tsunami en Lima, el tiempo mínimo de llegada de la primera ola a la costa, la altura máxima de ola, su dirección de ataque, las áreas inundables, rutas de escape y áreas de refugio para cada localidad habitada entre Ancón y Pucusana. Asimismo, establecer recomendaciones para la mejor concepción de edificaciones y obras portuarias, e influir en el planeamiento físico de los asentamientos humanos, para que a mediano plazo el área en estudio sea un lugar más seguro donde vivir. En suma, todo lo que atañe a la protección de la población actual y futura, y la de sus propiedades.

Algunos resultados del estudio para la costa de Lima Metropolitana pueden concretarse en lo siguiente:

- El tsunami más desfavorable para Lima Metropolitana lo generará un sismo en el mar, frente a la costa estudiada, y cuya intensidad en la costa iguale o supere al grado VIII de la Escala Sísmica de Mercalli Modificada.
- La primera ola llegará a la costa 20 a 30 minutos después de ocurrido el sismo generador. Este tiempo es crítico para planificar la evacuación de la población amenazada.
- La altura máxima de las olas al llegar a las costas será: 7 metros para el Callao y Pucusana, y 4 metros para Ancón. Para el resto de las localidades estudiadas, las alturas están comprendidas entre éstos límites.
- Para cada localidad habitada entre Ancón y Pucusana, se han determinado las zonas inundables y las zonas seguras que pueden ser utilizadas como refugios, así como las rutas de evacuación que conducen desde las primeras hacia las segundas.

La preservación de la vida humana sólo será posible si las poblaciones de las zonas amenazadas por tsunamis están conscientes de la amenaza y conocen las medidas elegidas para su protección. El estudio aporta un conjunto de recomendaciones al actual Sistema de Alerta contra Tsunamis (que enlaza al Sistema Nacional de Defensa Civil, la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra y el Instituto Geofísico del Perú con el Sistema Internacional de Alerta de Tsunamis con sede en Hawaii) que lo hacen rápidamente operativo cuando ocurre un sismo, a nivel regional, distrital y local.

- Al delimitar las zonas inundables, los problemas más críticos se concentran en La Punta y Callao. En La Punta, por el corto tiempo disponible que no permite evacuar a toda la población. En el Callao, por el precario estado de las edificaciones de adobe de su zona antigua, que ocupa una extensa área dentro de la zona inundable, temiéndose que el derrumbe de ellas atrape a numerosas personas, imposibilitando su rescate.
- Desde el punto de vista de la planificación urbana, se ha llegado a la conclusión que, si se construye sobre los 6 metros s.n.m. o alejado más de 0.5 kms. de la línea de costa, el riesgo de daños por tsunami será mínimo.

#### RECOMENDACIONES AL GOBIERNO PERUANO

- Formar de inmediato los Comités Distritales de Defensa Civil en cada una de las localidades ubicadas a la orilla del mar entre Ancón y Pucusana. La función de estos comités será programar y ensayar la evacuación desde las zonas inundables hacia las zonas de refugio, para lo cual se les proporcionará información detallada de este estudio, así como mapas de sus respectivas jurisdicciones en los que se detallen las zonas mencionadas y las rutas de escape. También, los comités difundirán las medidas de prevención entre la población.
- Por presentar La Punta y Callao problemas especiales, los Comités Distritales deberán ser permanentemente asesorados por un Comité Técnico multidisciplinario, el cual deberá profundizar el estudio realizado con la finalidad de hacer menos vulnerable a los lugares mencionados, y al menor costo posible.

Por otro lado, este estudio ha fijado como refugio de emergencia algunos edificios ubicados en La Punta y Callao, y como refugio temporal al complejo ubicado en la Avenida Guardia Chalaca y conformado por el parque zonal Yahuar Huaca, el Colegio General Prado (reparado y reforzado después del sismo de 1974) y el Policlínico del Instituto Peruano de Seguridad Social (de diseño sismorresistente). Se hará necesario coordinar con los propietarios de tales inmuebles para que puedan ser usados como refugios, e implementar el parque zonal para que pueda albergar, con un mínimo de facilidades, a unas 3,000 personas. Por ejemplo, un servicio de agua potable independiente del servicio público que puede quedar interrumpido por el sismo, es esencial.

- En coordinación con el Instituto Nacional de Desarrollo Urbano (INADUR) del Sector Vivienda, prohibir la construcción de edificaciones no indispensables para uso marino en las costas bajas de Lima Metropolitana, por debajo de los 6 metros s.n.m. ó a menos de 0.5 kms. de la línea de playa. En especial, los futuros asentamientos humanos deben seguir esta recomendación.

## AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su profundo agradecimiento a UNDRO (United Nations Disaster Relief Office - Oficina de Naciones Unidas para la Atención de Desastres) con sede en Ginebra, Suiza, por auspiciar el presente estudio. A sus funcionarios Drs. John Tomblin, Jean Paul Chardin y Vito Karnik por su apoyo para que esta investigación logre el auspicio de la entidad mencionada y por sus valiosas sugerencias a lo largo de su desarrollo.

Su reconocimiento a JICA (Japan International Cooperation Agency - Agencia de Cooperación Internacional del Japón) por invitarlo a participar en el Simposio Internacional de Tsunamis 1981 realizado en Sendai, Ofunato y Kamaishi, en especial a su representante Residente en el Perú, Sr. Takehisa Hirabashi. Muy reconocido a los Dres. T. Iwasaki y N. Shuto, profesores de la Universidad de Tokohu por sus excelentes explicaciones durante la visita técnica a las obras de defensa contra tsunamis en la región de Sanriku.

A los Dres. I. Tanashashi y M. Watabe del Instituto de Investigación de la Vivienda, los Dres. Kubo y T. Iwasaki del Instituto de Investigación de Obras Públicas, ubicado en Tsukuba y pertenecientes al Ministerio de Construcción del Japón, y a los Dres. Y. Hisada, H. Tsuchida y T. Noda del Instituto de Investigación de Puertos y Bahías ubicado en Kurihama, Japón, por las interesantes discusiones y visitas a laboratorios, que mejoraron notablemente el estudio.

Es una buena ocasión para agradecer al Dr. T.S. Murty del Instituto de Ciencias Oceanográficas del Canadá, quien por muchos años ha enviado al autor los ilustrativos boletines sobre Tsunamis publicadas por el mencionado Instituto.

Agradece haberle proporcionado bibliografía sobre Tsunamis a las siguientes personas:

Prof. I. Aida de la Universidad de Tokio, Prof. H. Togashi de la Universidad de Nagasaki.

Prof. H. Kanamori del Instituto Tecnológico de California, Dr. G. Pararas-Carayannis del Centro de Información sobre Tsunamis con sede en Honolulu-Hawai, Dr. Paul Krumpke de la Oficina para Asistencia de Desastres en el Exterior del Gobierno de Estados Unidos de Norteamérica.

Su reconocimiento a las autoridades y compañeros de labores de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), en especial al Ing. Julio Pacheco, Jefe del Dpto. de Estructuras y Construcción, por su constante aliento y apoyo.

A los funcionarios de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, en especial a su Director Contralmirante A.P. Jorge del Aguilar y al Comandante A.P. César Vargas Poucheaux, por sus constructivas discusiones y por proporcionarle información batimétrica del mar limeño.

A los funcionarios de la Secretaria Ejecutiva del Comité Nacional de Defensa Civil y del Instituto Geofísico del Perú por su constante-apoyo.

Finalmente a sus ex-alumnos Alberto Delgado, Celia García y Marcial Lagos por sus arduas labores de trabajo dedicado al desarrollo de sus Tesis para optar el grado de Ingenieros Civiles en la UNI, con quienes el autor desarrolló gran parte de esta investigación.

## PROLOGO

Durante el terremoto de Ancash (Perú) de 1970, que dejó cerca de 65,000 víctimas, ocurrieron dos hechos cuyas enseñanzas no deben olvidarse nunca en países amenazados por catástrofes naturales. He aquí los relatos. Huaraz es una hermosa ciudad enclavada en el Callejón de Huaylas, la "Suiiza Peruana". La parte central del poblado era conocida por sus altas casas de adobe de dos y tres pisos, sus angostas calles y espaciosos huertos. Iniciado el sismo, al grito de "¡terremoto!" los huaracinos se precipitaron aterrados a las calles, donde 10,000 perecieron aplastados por el derrumbe de los altos y pesados muros de adobe, pues muy pocos pobladores se habían percatado que la salvación estaba a pocos pasos detrás de sus casas, en sus propios huertos, donde los cercos medían sólo dos y medio metros de altura.

En el mismo instante, en Yungay, unos 40 kms. al Norte de Huaraz, un buen amigo, el Ing. Mateo Casaverde, entonces Director Técnico del Instituto Geofísico del Perú, servía de guía al geofísico francés Gerard Patzolt. Minutos antes, mientras Casaverde tomaba fotos del nevado Huascarán (6,768 m.), había observado a través del teleobjetivo de su cámara profundas grietas en la masa de nieve de la montaña. Preocupado, pensaba que en cualquier momento esa masa podría desprenderse, como ocurrió en 1962 cuando el vecino poblado de Ranrahirca fue sepultado con todos sus habitantes. Al concluir las vibraciones del sismo se escucharon sordos ruidos de baja frecuencia, e instintivamente Casaverde volvió la vista hacia el Huascarán, a cuyo pie una inmensa polvareda se levantaba, y dijo: "Gerard, se ha desprendido parte del Huascarán, ¡corramos al comentario!". Instantes después que treparon en su refugio, una rugiente masa de piedras, nieve y lodo llegó a los pies de la redonda colina donde se levanta el camposanto. En los escasos minutos que disponían, menos de cuatro, gracias a sus conocimientos, los dos geofísicos hicieron lo correcto, la única alternativa que les permitió ganarle la carrera a la muerte. Quince mil yungaínos no fueron tan afortunados, y lo que fue la ciudad es hoy un inmenso comentario, sepultado bajo cuatro a cinco metros de aluvión.

Estos dramáticos acontecimientos prueban la necesidad de educar a toda población que alguna vez deba enfrentar una catástrofe natural. Por otro lado, conoce el autor que los informes de corte técnico en que devienen gran parte de los estudios que sobre catástrofes se realizan, son leídos por pocos y entendidos por menos. La rigidez de su forma y la abundancia de conceptos contribuyen a enfriar el entusiasmo del lector y despertar su indiferencia, cuando no su recelo.

Las catástrofes naturales son, salvo excepciones, intempestivas. Su manifestación es violenta tanto por la forma en que atacan como por la brevedad del ataque. Entonces, la educación del poblador debe ajustarse a estos moldes. Su conocimiento del problema debe estar fundamentado en el riesgo de desastre de la zona que habita; sus probables orígenes o causas, y los efectos que produce. Lo primero le permite estar alerta. Lo último le otorga un criterio amplio para aprovechar cualquier alternativa que le permita eludir el peligro y salvar su vida.

Por ello, uno de los propósitos de este trabajo es presentar los

conocimientos esenciales sobre Tsunamis o Maremotos; qué son, el por qué y dónde se originan; los efectos que producen en las poblaciones y las medidas de protección que pueden adoptarse. Se incluyen ejemplos específicos para las poblaciones ribereñas de la costa central del Perú, comprendidas entre Ancón y Pucusana, con el Callao como punto focal, los que pueden servir de modelo para preparar programas de prevención para otras comunidades.

El urbanista encontrará aquí información útil para planificar asentamientos humanos en costas bajas; y el Ingeniero conceptos y ejemplos para diseñar y construir estructuras más seguras ante el ataque de tsunamis.

# TABLA DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN DEL ESTUDIO Y RECOMENDACIONES AL GOBIERNO PERUANO.	
AGRADECIMIENTO	
PROLOGO	
<b>CAPITULO I: "INTRODUCCION"</b>	<b>1</b>
Antecedentes	1
Objetivos del Estudio	1
Presentación del Estudio	2
<b>CAPITULO II: "METODOLOGIA PARA EL ESTUDIO DE TSUNAMIS"</b>	<b>4</b>
Los Tsunamis	4
Origen de los Tsunamis que afectan al Perú	5
Tipos de Tsunami por su origen:	7
- De origen local	7
- De origen cercano	8
- De origen lejano o transoceánico	8
Características del Tsunami:	8
- Período	9
- Altura de onda	9
- Longitud de onda	9
- Velocidad de propagación	9
Propagación del Tsunami	10
Estimación del tiempo de llegada a la costa de un tsunami de origen cercano.	10
Energía del Tsunami	11
Altura de ola en la costa y Run-up	12
Magnitud del tsunami	13
Factores que afectan la magnitud	14
Criterios para estimar la altura de ola en la costa.	15
Influencia de las mareas en la altura de la ola	17
Delimitación de las zonas inundables	18
Importancia de la historia en el estudio de Tsunamis.	20
<b>CAPITULO III: "POSIBLES EFECTOS DE TSUNAMIS EN LAS COSTAS DE LIMA METROPOLITANA".</b>	<b>23</b>
La Costa en Estudio	23
La zona de generación de los tsunamis y características de la generación.	24

Aplicación del método de refracción en la estimación del tiempo de llegada de la primera ola a la costa.	25
- El tsunami del 17 de Octubre de 1966	26
- El tsunami del 3 de Octubre de 1974	26
Gráfico para estimar el mínimo tiempo de llegada de la primera ola a cualquier punto de la costa limeña.	29
Altura de ola en la costa limeña	31
La Alarma	34
Duración de la Alarma	35
<b>CAPITULO IV: "PROTECCION DE LA POBLACION"</b>	36
Alerta y Alarma, evacuación y refugio	36
Sistema de alerta y alarma contra tsunamis	37
Medidas generales de precaución contra tsunamis destinadas a la población de Lima Metropolitana.	40
Evacuación de Pucusana	41
Evacuación de Santa María	43
Evacuación de San Bartolo	44
Evacuación de Punta Negra	46
Evacuación de Punta Hermosa	46
Evacuación de Chorrillos-Villa	48
Evacuación de La Punta-Callao	51
Evacuación de la costa al norte del Callao (Bocana del río Rímac - La Pampilla).	58
Evacuación de Ancón	59
Nota	61
<b>CAPITULO V: "PROTECCION DE LAS OBRAS CIVILES"</b>	62
Daños causados por tsunamis en las costas	62
Recomendaciones para Edificaciones	62
Recomendaciones para Obras Portuarias	63
Obras de protección contra Tsunamis en Japón.	63
<b>CAPITULO VI: "PLANIFICACION FISICA CONTRA DESASTRES NATURALES"</b>	70
Planificación física contra tsunamis de las costas de Lima Metropolitana.	70
Implicancias del estudio en el Planeamiento Regional.	72
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	73

ANEXO I: "HISTORIA DE VEINTIUN TSUNAMIS OCURRIDOS EN LIMA ENTRE 1586 Y 1974".

77

ANEXO II: "LA ALTURA DE OLA Y EL TIEMPO DE LLEGADA SEGUN EL ESTUDIO DE HEBENSTREIT Y WHITAKER".

89

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### ANTECEDENTES

El Perú, ubicado en la costa occidental de Sudamérica, tiene una larga historia de sismos destructivos que han causado numerosas víctimas y cuantiosos daños materiales. Para determinar los probables efectos en Lima Metropolitana, donde se concentra cerca del 30% de la población y se desarrolla el 70% de la actividad económica, la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) inició en 1973 una serie de estudios con miras a tomar medidas preventivas y disminuir o evitar los perjuicios.

Entre 1973 y 1977 se desarrollaron en la UNI más de 20 tesis de Grado de Ingeniería Civil y Arquitectura dirigidas por el autor, la mitad de las cuales fueron auspiciadas por la Secretaría Ejecutiva del Comité Nacional de Defensa Civil (SE/CNDC). A fines de 1977 se publicó un volumen con las conclusiones de los estudios, en homenaje al Centenario de la UNI que fue también auspiciado por Defensa Civil (1)\*

De las investigaciones realizadas, se evidenció la existencia de múltiples problemas de seguridad sísmica que aquejan a la Capital del Perú. Sin embargo, dos fueron los problemas considerados más preocupantes:

- Las congestionadas y antiguas zonas de Lima, donde existen numerosas construcciones de adobe debilitadas por sismos anteriores, la humedad y los roedores. Estas zonas están dentro de los límites que tenía Lima en los años 30.
- La amenaza de tsunamis o maremotos sobre las costas bajas del Callao.

El primer caso fue estudiado con más detalle que el segundo, y Defensa Civil cuenta ahora con suficiente información sobre el problema; se reconoce, sin embargo, que es de muy difícil solución por las implicancias socio-económicas que conlleva.

El segundo problema requería ampliación de los estudios, pero se previó que los resultados y las recomendaciones que se efectuaran serían más factibles de llevar a la práctica de inmediato.

Por ello, cuando a fines de 1980 el Dr. John Tomblin, de UNDRP - (United Nations Disaster Relief Office), visitó Lima e invitó a presentar propuestas de investigación, se sometió a la consideración de dicho organismo el presente tema de estudio, el que fue aprobado y ha sido realizado gracias al apoyo brindado por dicho organismo.

### OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos principales del presente estudio son: tratar de sal

---

(1)\* Referencia incluida al final.

var la vida de los habitantes de las costas bajas de Lima Metropolitana amenazadas por tsunamis, planificar los futuros asentamientos libre de este peligro y disminuir los efectos de los maremotos sobre las estructuras para minimizar los daños. Se decidió que estos objetivos podrían lograrse trabajando en las siguientes direcciones:

- Difundiendo conocimientos básicos sobre tsunamis con un lenguaje sencillo y directo, para que las personas en potencial peligro, con conocimiento del problema, puedan actuar llegado el momento con criterio y flexibilidad frente a las diferentes formas en que la amenaza de tsunamis pueda materializarse.
- Estudiando los posibles efectos de los tsunamis en las costas bajas de Lima Metropolitana, delimitando las áreas inundables que deben ser evacuadas en caso que se dé la alarma de maremotos, resultados que permiten a su vez seleccionar las áreas de refugio y las rutas de escape más convenientes; y calculando el tiempo disponible para la evacuación, crítico para el caso de tsunamis de origen cercano, cuando el tiempo transcurrido entre la ocurrencia del terremoto generador y el arribo de la primera ola del tsunami es muy corto.
- Determinando la forma en que los tsunamis atacarán las obras de Ingeniería Civil, y a partir de estos resultados deducir la estrategia para disminuir los efectos.
- Sentando conceptos y obteniendo datos lo más preciso posible para ser usados en el planeamiento de futuros asentamientos humanos a lo largo de la costa limeña, para que sean más seguros contra el ataque de tsunamis.

#### PRESENTACION DEL ESTUDIO

Para lograr los objetivos mencionados, en el Capítulo II se presenta la teoría general sobre tsunamis resumida como Metodología para su Estudio. Para hacer más ágil la lectura sólo se incluyen las expresiones matemáticas necesarias para que el método pueda ser aplicado en otras localidades sin tener que recurrir a otras referencias. Sin embargo, al final de este volumen se presenta una larga lista bibliográfica para aquellas personas que deseen profundizar sus conocimientos en la materia.

En el Capítulo III, a manera de ejemplo se exponen los resultados de aplicar el método al caso de Lima Metropolitana.

El Capítulo IV está dedicado a reseñar las principales medidas de protección inmediata de la población de las localidades de Pucusaña, Naplo, Santa María, San Bartolo, Punta Negra, Punta Hermosa, Villa, Chorrillos, Callao, La Punta, Norte del Callao, y Ancón, mediante el Sistema de Alerta y Alarma contra tsunamis y los Planes de Evacuación hacia los refugios o zonas seguras.

En el Capítulo V se hace una revisión de los daños causados por tsunamis en los diferentes tipos de estructuras, y se dan recomendaciones para minimizar sus efectos.

En el Capítulo VI se sientan los conceptos que, como resultado

de nuestro estudio, creemos deben normar la planificación de los futuros asentamientos humanos en la costa de Lima.

Por sugerencia del Dr. Karnik, de UNDR0, con quien el autor se reunió en Los Angeles, California, en Febrero del presente año, encabezan el informe las conclusiones más saltantes del estudio, y una lista de acciones cuya aplicación inmediata se recomienda al Gobierno Peruano a fin de disminuir la amenaza de los tsunamis en la zona estudiada.

El Anexo I es el resumen de la historia de veintiun tsunamis que afectaron la costa de Lima entre 1,586 y 1,974, y contiene comentarios que ayudarán a entender los resultados expuestos en los Capítulos III y IV.

El Anexo II es el comentario al estudio sobre tsunamis en la costa Occidental Sudamericana efectuado por Hebenstreit y Whitaker para la Agencia para el Desarrollo Internacional del Departamento de Estado Norteamericano (AID), estudio que es un valioso complemento al que hemos realizado.

## C A P I T U L O   I I

### METODOLOGIA PARA EL ESTUDIO DE TSUNAMIS

#### LOS TSUNAMIS

El Tsunami o Maremoto es un fenómeno marítimo espectacular por su secuela de destrucción y pérdida de vidas humanas. Generado por diversas causas, como se verá a continuación, el tsunami es básicamente una secuencia o tren de ondas que desde su origen se desplazan en todas direcciones y a gran velocidad, desarrollándose en las rutas que les son favorables y mitigándose en las otras, hasta llegar así a las costas, donde arriban en un tiempo corto o prolongado dependiendo de la distancia recorrida, y donde atacan con violencia consecuente con su modo de propagación.

Las causas de la generación pueden clasificarse en naturales y artificiales. Las primeras son incontrolables o difíciles de evitar; las encabezan los terremotos de gran magnitud de origen tectónico producidos en el fondo del océano, que generan a su vez tsunamis de amplio radio de acción y gran poder destructivo. De este origen fueron los generados frente a: Callao (Perú) en 1746, Sanriku (Japón) en 1896 y 1933, Sur de Chile en 1960, Alaska en 1964, etc. Algunos sismos que ocurren en el continente generan tsunamis de incidencia local. Tal es el caso de los producidos por el sismo de Atacama (Chile) en 1922, y el terremoto de Lima (Perú) en 1940.

Otros tsunamis, aunque raros, son generados por erupciones volcánicas acompañadas de grandes explosiones; como sucedió en 1883 a raíz de la explosión del volcán Cacatúa (Krakatoa), en Indonesia.

También pueden tener origen en deslizamientos de grandes masas costeras que caen al mar, como ocurrió en algunas bahías de Alaska durante el terremoto de 1964; las olas causaron daños en las orillas opuestas de dichas bahías. Este tipo de tsunamis causa sólo perjuicios locales, a diferencia de los de origen sísmico que alcanzan grandes distancias y atacan en poblaciones del otro lado del océano donde fueron generados; así ocurrió en 1960, cuando el sismo de Chile produjo un tsunami que pasó paralelo a la costa peruana, y atacó directamente Hawai y Japón con graves consecuencias. Cabe aclarar que en Alaska, en 1964, ocurrieron tanto los tsunamis de origen local como el de origen sísmico, el principal.

Se menciona también como causa natural probable, a las avalanchas submarinas.

La causa artificial más importante es la realización de pruebas atómicas o nucleares en la superficie del mar. En 1954, una prueba atómica realizada por los Estados Unidos de Norteamérica en el atolón de las islas Bikini, produjo un pequeño tsunami registrado en el Japón.

En el mundo hay dos zonas excepcionalmente desfavorables ante el ataque de tsunamis: la región de Sanriku en el norte del Japón, por

La gran altura que alcanzan las olas; y las islas Hawai, por la frecuencia con que se repiten estos fenómenos. Sanriku está situada en la zona donde interaccionan las placas Pacífico y Asia (ver siguiente acápite), y por ello la ocurrencia de sismos de gran magnitud es relativamente frecuente. Sus altas costas forman bahías en "V" abiertas al mar, similarmente a los dedos abiertos de una mano. Al llegar el tsunami a la entrada de estas bahías, los altos muros que se angostan y el fondo marino que se hace menos profundo concentran la energía del flujo (efecto de embudo) Así, olas de 4 a 5 metros a la entrada de la bahía puedan alcanzar más de 20 metros en el fondo de la misma. Los villorrios de pescadores ubicados en el vértice de estos triángulos y casi al nivel del mar, han sido violentamente castigados en repetidas ocasiones, por lo que en el Japón este fenómeno ha sido detenidamente estudiado, y la palabra japonesa que lo designa lo describe de manera sintética: TSU, puerto, y NAMI, ola, significan que en el puerto la ola alcanza gran altura. Se cuentan casos de pescadores que dedicados a su faena en alta mar no se percataron de la ocurrencia del fenómeno, pero al volver a sus aldeas de origen las encontraron destruidas.

Las islas Hawai, ubicadas prácticamente en el centro del Océano Pacífico, reciben en algún punto de sus costas los tsunamis que se originan en el Círculo Circumpacífico, donde ocurren el 80% de los sismos destructivos que asolan nuestro planeta. Por otra parte, como estas islas emergen súbitamente de las profundidades oceánicas, los tsunamis descargan en sus costas casi toda la energía con que fueron generados, alcanzando alturas impresionantes, aunque menores que en Sanriku. Por las razones expuestas, es natural que en Honolulu se ubique el Sistema de Alerta de Tsunamis en el Pacífico, y el Centro de Información Internacional de Tsunamis.

En resumen, el tsunami es una fuerte alteración de las condiciones normales del mar, originado por diversas causas; que nace con ciertas características que se modifican durante su recorrido hacia las costas. En éstas, la ola inunda, destruye, y puede causar muertes si la población está desprevenida. Por lo tanto, un estudio de tsunamis desde el punto de vista de la protección de la población debe contemplar desde el conocimiento de las causas que lo originan, pasando por sus características y condiciones que las modifican, hasta su forma de ataque, incluyendo como consecuencia las medidas a adoptar para disminuir o evitar sus efectos.

Lo que sigue es una metodología para el estudio de tsunamis, elaborada como resultado de nuestro estudio en la costa central del Perú, pero que puede ser aplicada con ligeras variantes en cualquier zona de la costa peruana. Por otra parte al final del trabajo se incluye la lista bibliográfica consultada o referida.

## **ORIGEN DE LOS TSUNAMIS QUE AFECTAN AL PERU**

La idea básica de la teoría de Placas, propuesta por Isacks y colaboradores en 1968, es que la envoltura más superficial de la tierra, la Litósfera, se halla dividida en varias placas rígidas que nacen en las cadenas o dorsales meso-oceánicas, son transportadas lentamente sobre otra envoltura menos rígida, la Astenósfera, y consumidas en las zonas de subducción, donde existen fosas marinas. El mecanismo

que causa el movimiento se supone debido a las corrientes de convección o movimiento del manto, plástico y caliente, y a los efectos gravitacionales y de rotación de la tierra.

Los límites o bordes de las placas son, entonces, las cordilleras donde se originan, las zonas de subducción donde se consumen, y las fallas llamadas de transformación a lo largo de las cuales las placas se deslizan una respecto a la otra. La mayor parte de la actividad tectónica mundial sucede en estos bordes. (Ver Figura No. 1).

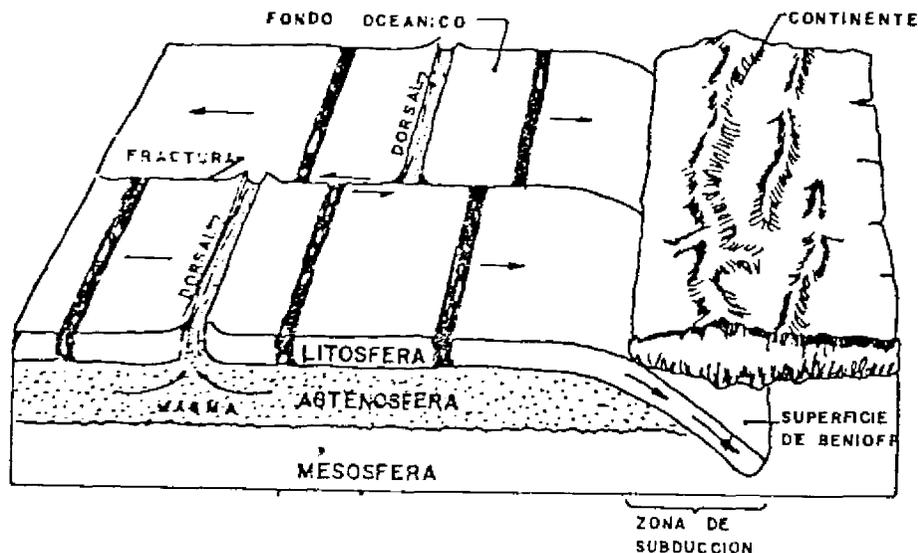


Fig. 1 ISOMETRICO DE DORSALES, ZONAS DE FRACTURA Y DE SUBDUCCION

Según teorías en vigencia, la mayoría de los tsunamis se generan cuando una porción del fondo oceánico se levanta o se hunde a causa de un sismo tectónico. El sismo es consecuencia de la liberación de la energía acumulada por la lenta interacción de dos placas, y durante él, las placas, al buscar su equilibrio, se mueven una respecto a la otra tanto horizontalmente como verticalmente. Al ocurrir este último movimiento, sea levantamiento o hundimiento, áreas del orden de centenares de kilómetros cuadrados son impulsadas, transmitiendo parte de la energía sísmica a la masa de agua que soportan.

El fenómeno que altera la masa de agua desde el fondo hasta la superficie constituye el origen del tsunami.

En la cuenca del Pacífico interaccionan las placas Pacífico, Indo-Australiana, Asia, Filipinas, América, Nazca, Cocos, etc. Las zonas de subducción se extienden desde Nueva Zelanda e islas Samoa, Japón, Aleutianas y Alaska; y se les encuentra nuevamente en la costa occidental de Sudamérica. Las dorsales se ubican en medio del Océano y en algunos lugares cercanos al continente americano. Todo el borde del Pacífico es de alta sismicidad y conocido como el Círculo Circumpacífico o de Fuego (Ver Figura No. 2).

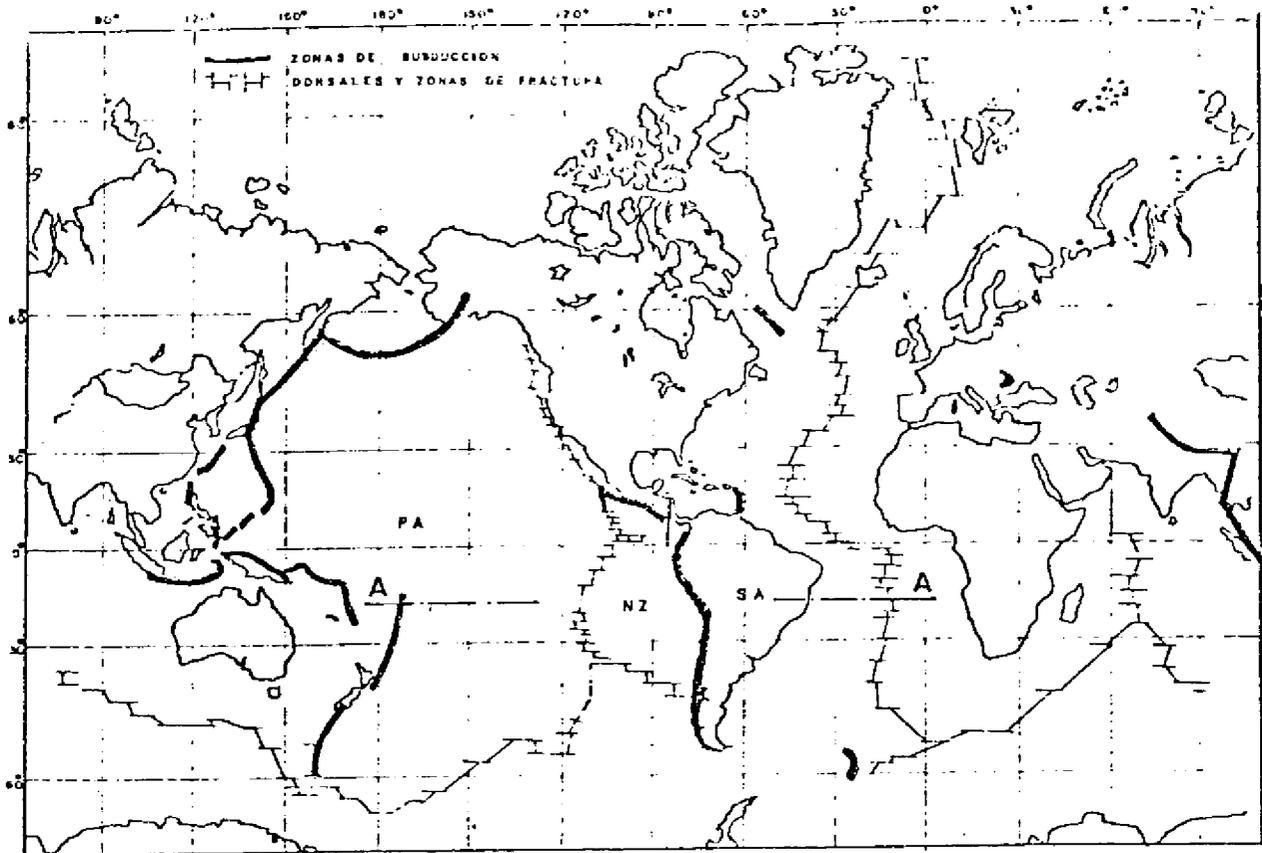


Fig 2 Teoría de placas. SA=Placa Sudamericana, PA=Placa Pacífica, NZ=Placa Nazca

A nivel local, la placa Sudamericana, continental, que crece en la cadena meso-oceánica del Atlántico, avanza hacia el Noroeste y se encuentra con la placa Nazca, que nace en la cadena meso-oceánica del Pacífico y avanza hacia el Este. En el encuentro, la placa Nazca - subduce o se mete debajo de la Sudamericana. Como resultado de la compresión de la corteza terrestre se han formado la fosa Perú-Chile y la Cordillera Andina, en diferentes etapas. (Ver Figura No. 3).

Desde que existen registros históricos (1550), el tramo de costa entre Callao (Perú) y Valdivia (Chile) ha sido afectado por unos 50 tsunamis generados en el Círculo, principalmente en la fosa marina que se extiende entre los lugares mencionados.

#### TIPOS DE TSUNAMIS POR SU ORIGEN

De acuerdo a lo anterior y por su origen, el tsunami puede ser:

- De origen local, si se genera por el deslizamiento de una masa importante de terreno dentro de una bahía, como los sucedidos en Alaska en 1964. En el Perú no hay bahías con volúmenes importantes de materiales inestables que puedan deslizarse, de manera que no es probable la ocurrencia de un tsunami de este tipo. También puede ser de origen local por la ocurrencia de un sismo con epicentro en el continente, pero cercano a la costa, como el tsunami de Lima (Perú) de 1940. En estos casos, el ataque es inmediato a la generación.

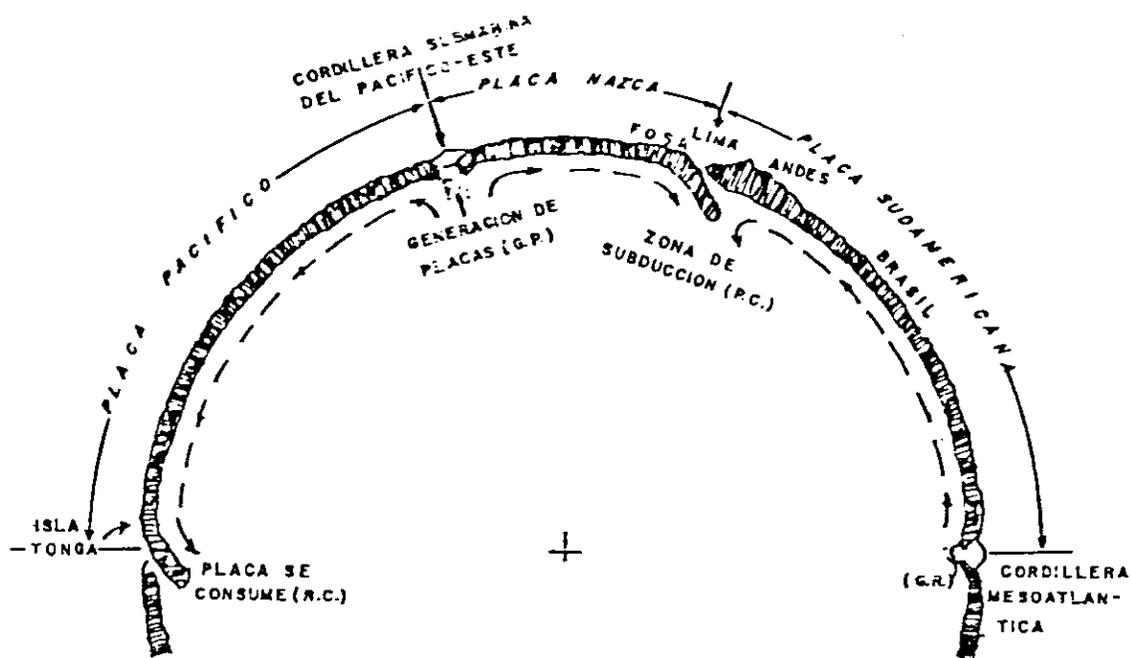


Fig. 3 CORTE ESQUEMATICO DEL GLOBO TERRAQUEO  
Se observa la Placa Nazca, la Placa Sudamericana y la Placa  
Pacífico. (CORTE A-A DE LA Fig. 2).

- De origen cercano, si se origina en la falla cercana a la costa de interés (distante unas decenas de kilómetros), y es precedido por un sismo. La gran mayoría de los tsunamis que han afectado la costa peruana han sido generados por sismos a lo largo de la fosa que se extiende entre el Callao y Valdivia, y es interesante acotar que los epicentros de estos sismos se ubican al Este de la fosa. Los tsunamis de este origen llegan a la costa más cercana 20 a 30 minutos después de ocurrido el sismo en el tramo frente a Lima. Hacia el sur al originarse los tsunamis más cerca a la costa, este tiempo es menor.
- De origen lejano o transoceánico, si se genera a gran distancia. Dentro de esta clasificación están los generados a lo largo del Círculo Circumpacífico, excluyendo nuestras costas. Por su posición, los más desfavorables provendrían de las islas Samoa o Nueva Zelanda, directamente al frente de la costa Sudamericana. En tsunamis de origen lejano, el tiempo de viaje hasta nuestras costas depende del lugar de origen, pudiendo transcurrir 6 a 22 horas según el tsunami provenga de Chile o Japón.

Cabe anotar que, en la preparación de los planes de evacuación de la población de las zonas amenazadas por tsunamis, es necesario tomar en cuenta los tiempos de arribo de las olas a las costas, según el origen del tsunami.

#### CAPACIDADES DEL TSUNAMI

Por tratarse de un tren de ondas, el tsunami posee las características comunes a ellas: período, altura de onda, longitud de onda y

velocidad de propagación.

- **Período**, que se define como el tiempo que transcurre entre el paso de dos ondas sucesivas por un mismo punto de observación. Por la forma misma de generación, el tsunami en su origen posee una amplia gama de períodos. Se postula que el período dominante está determinado por la extensión del fondo del mar perturbado por el sismo. Por otro lado, se sabe que en tsunamis de origen cercano el período está entre los 7 a 20 minutos, y entre 40 a 70 minutos para los de origen lejano. Cabe pensar que el período se modifica durante la propagación debido a los accidentes del fondo y otras causas, y que al llegar a la costa es influenciado por las condiciones batimétricas locales.

Desde el punto de vista práctico de protección de la población, el período viene a ser finalmente el intervalo de ataque de las sucesivas olas que conforman el tsunami, las cuales varían en número de 10 a 15. Así, en caso de ocurrencia de tsunami, la población debe mantenerse alejada de las zonas amenazadas durante un tiempo prudencialmente prolongado.

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

La altura de onda del tsunami es consecuencia del mecanismo generador, por ejemplo el desplazamiento vertical del fondo. Durante la propagación influye la configuración del fondo oceánico; y ya cerca de las costas son importantes la geometría de la bahía en la cual se introduce, y el período natural de la misma.

- **Longitud de onda**, En los tsunamis la longitud de onda es mayor a la profundidad del océano; así, se estima que la longitud de onda inicial es aproximadamente igual a la dimensión mayor del área dislocada.

Los valores de longitud de onda del tsunami son grandes; por ejemplo, un tsunami con un período de 20 minutos y que viaja con velocidad de 200 m/seg., tiene una longitud de onda de 240 kms.

El valor de la longitud de onda puede obtenerse de la relación:

$$L = V T \dots\dots\dots (2.1)$$

donde:

L = Longitud de onda, en metros

V = Velocidad de propagación, en m/seg.

T = Período, en segundos

Una característica notable de los tsunamis la constituye el hecho de que en alta mar su paso es difícilmente percibido, en razón de su gran longitud y pequeña altura de onda.

- **Velocidad de propagación**, Para estudiar la velocidad de propagación del tsunami, es necesario aplicar los fundamentos de la teoría de la hidrodinámica. La teoría de Cauchy-Poisson-Lamb es usada para los estudios teóricos de movimientos del fluido provocados por perturbaciones del fondo del mar. Ella implica hacer una serie de hipótesis, como son las siguientes:

1. Suponer que el fluido es no viscoso
2. El movimiento es irrotacional

3. La elevación del fondo marino que provoca el movimiento es pequeña comparada con su profundidad "h".
4. Los cuadrados de las velocidades de las partículas son despreciables.
5. La presión en la superficie es nula; la profundidad "h" es constante, y el fondo es horizontal.

Se obtiene finalmente que la velocidad de propagación del tsunami es igual a:

$$v = \sqrt{g h} \quad \dots\dots (2.2)$$

donde:

v = Velocidad, en m/seg.

g = Aceleración de la gravedad (9.8 m/seg<sup>2</sup>)

h = Profundidad del océano, en metros

De la fórmula puede afirmarse que la velocidad de propagación del tsunami es función solamente de la profundidad del fondo por el cual viaja. Por ejemplo, un tsunami que atraviesa una parte del océano donde la profundidad es de 4,000 mts., tendrá una velocidad de 200 m/seg. ó 720 km/h.

Si se considera la ruta de propagación conformada por tramos de profundidad constante (escalones), es posible calcular el tiempo de viaje con buena precisión.

#### PROPAGACION DEL TSUNAMI

Como la velocidad del tsunami es mayor en un mar profundo que en un mar superficial, la dirección de propagación gira gradualmente hacia la zona menos profunda cuando el tsunami viaja en un mar de profundidad variable. Este fenómeno se denomina "Refracción de ondas", y en su tratamiento se aplica la Ley de Snell de la Óptica.

En base al conocimiento de la forma original del frente de onda y las profundidades, pueden construirse las curvas de refracción. Este método es utilizado para estudios de áreas relativamente pequeñas, no siendo aplicable a grandes áreas debido a la curvatura terrestre; en este caso, el viaje se calcula por las cartas de proyección.

#### ESTIMACION DEL TIEMPO DE LLEGADA A LA COSTA DE UN TSUNAMI DE ORIGEN CERCANO.

Para estimar el tiempo de llegada de un tsunami de origen cercano a la costa, se puede utilizar el modelo de propagación que consiste en el trazado de Curvas o Diagramas de Refracción.

La metodología es la siguiente:

- En primer lugar, se determina el área perturbada por el sismo, la cual se supone de forma elíptica. Esta suposición geométrica de la fuente tiene origen en los estudios teóricos y experimentales llevados a cabo por anteriores investigadores, quienes encontraron que los frentes de onda iniciales de tsunamis generados por sismos tectónicos asumen, en general, la forma

de una elipse alargada cuyo eje mayor se localiza sobre el eje de la falla dominante.

Las longitudes de los ejes mayor (S) y menor (b) de la elipse pueden calcularse, según Iida, en función de la magnitud del sismo (M), con las siguientes expresiones:

$$\log S = \frac{2}{3} M - 2.93 \dots\dots\dots (2.3)$$

$$b = (3.77 - 0.42 M) S \dots (2.4)$$

Donde el valor S está limitado por el valor de la longitud máxima de falla local, y el valor b por el del ancho de la interfaz de contacto de las placas.

- Enseguida, de acuerdo a informaciones históricas de dirección dominante de la falla y de posición relativa respecto a la costa en estudio, se ubica la elipse sobre un plano con información batimétrica (conveniente usar escala 1:500,000).
- Se divide el perímetro de la elipse en partes iguales (por ejemplo 1 cm.). Se supone así que la propagación del tsunami se inicia por canales de igual energía.
- Se dibujan luego líneas ortogonales a este frente de onda, y sobre cada línea se marca la distancia que recorre el tsunami en un tiempo fijado; por ejemplo 1 minuto (recordar que  $V = \sqrt{gh}$ , y  $e = Vt$ ).
- Se unen los puntos obtenidos y se forma así el nuevo frente de onda
- El proceso de formación de frentes de onda se repite; pero al llegar a aguas menos profundas es conveniente cambiar la escala del mapa sobre el que se trazan las curvas de refracción. (Ver Figura No. 4).

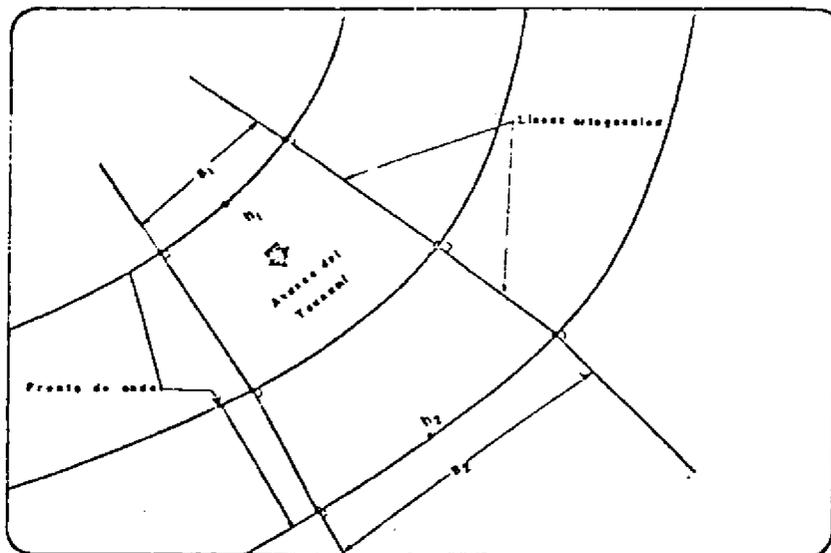


FIG. N° 4 LEY DE GREEN

### ENERGÍA DEL TSUNAMI

La energía del tsunami está dada por las formulaciones siguientes:

la de Kajiura,

$$\log E_t = 2 M_w + \log F + 5.5 \dots (2.5)$$

donde:

$E_t$  = energía del tsunami, en ergios

$M_w$  = magnitud sísmica Kanamori

$F$  = constante que toma en cuenta los parámetros de la falla donde se produce el sismo. Puede usarse  $F = 0.1$  como valor máximo:

la de Wilson, Webb y Hendrickson:

$$E_t = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \dots (2.6)$$

donde:

$\rho$  = densidad del agua de mar

$g$  = aceleración de la gravedad

$H$  = altura de la onda

$L$  = longitud de la onda

Como puede apreciarse, la primera está relacionada con el modelo físico empleado para representar el sismo generador; la segunda atañe directamente a las características del tsunami.

Un flujo a través de un canal de ancho y profundidad constantes y donde no se consideren pérdidas por fricción con el fondo y las paredes, constituye un flujo invariable en el tiempo y el espacio; pero, si se modifican estas condiciones, si el ancho del canal disminuye, el tirante de agua aumentará; y si el ancho aumenta, el tirante disminuirá.

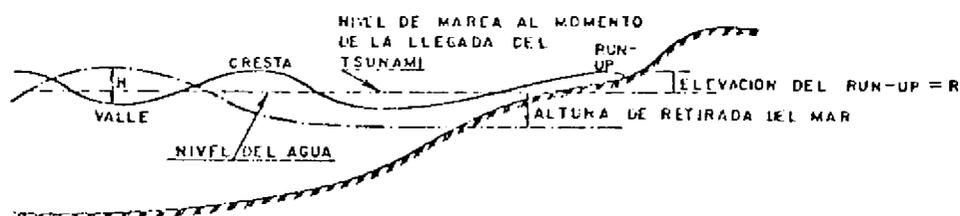
La metodología del diagrama de refracción exige que la propagación del tsunami desde el primitivo frente de onda se inicie por canales de igual ancho y por lo tanto de igual energía. Conforme avanza el tsunami, el ancho de los canales varía de acuerdo a la profundidad del agua. En aguas muy profundas donde pueden despreciarse las pérdidas por efectos de la fricción con el fondo y otras causas, y donde la energía se concentra o dispersa si el ancho disminuye o se incrementa, la longitud de onda tiene un valor muy alto mientras que la altura de onda es muy pequeña. Pero, en aguas poco profundas, cerca de las costas, la longitud de onda disminuye (ver fórmula 2.1) y la altura de onda aumenta considerablemente. La energía se concentra en el frente de onda y es liberada al llegar a la costa con gran poder destructivo.

#### **ALTURA DE OLA EN LA COSTA Y RUN-UP**

Mientras el tsunami viaja en alta mar, lejos de las costas, su altura está dada por la altura de la onda definida anteriormente. Pero, al llegar a la costa, desde el punto de vista práctico, lo importante es la altura que la onda alcanza sobre el nivel de referencia más común, es decir, el nivel medio del mar. La altura de ola en la costa denotará entonces, la altura que alcanza la onda sobre el nivel medio del mar. (Ver Figura No. 5).

Fig 5 : GRAFICO DE ALTURA DE ONDA Y RUN-UP

H = ES LA ALTURA DE ONDA DEL TSUNAMI  
 R = ES LA ELEVACION ALCANZADA EN TIERRA POR EL TSUNAMI



Más el viaje del tsunami no se interrumpe en la orilla sino que él penetra en tierra, avanzando todo lo que las condiciones topográficas de la zona le permitan. La cota topográfica máxima (referida al nivel medio del mar) alcanzada por la inundación se conoce como Run-up.

#### MAGNITUD DEL TSUNAMI

La magnitud de un tsunami se mide por la altura máxima de ola y la destrucción que causa en la costa.

Se inserta a continuación la escala propuesta por el Profesor Imamura, quien la dedujo observando los efectos de tsunamis en las costas japonesas, sobre todo en Sanriku, donde como sabemos, debido a la desfavorable combinación de batimetría y topografía, las olas son excepcionalmente altas. Por esta razón, para la costa occidental de Sudamérica la escala es aplicable con reserva, debiéndose tener muy en cuenta las condiciones locales.

#### MAGNITUD DEL TSUNAMI (SEGUN IMAMURA)

Magnitud del Tsunami (m)	Altura máxima de la ola (m)	Descripción de los daños
0	1 a 2	No se producen
1	2 a 3	Se inundan las casas. Las de madera sufren daños. Botes arrastrados y/o destruidos.
2	4 a 6	Edificaciones, embarcaciones y personas son arrastradas.
3	10 a 20	Graves daños a lo largo de 400 kms. de costa.
4	Más de 30	Graves daños a lo largo de más de 500 kms. de costa.

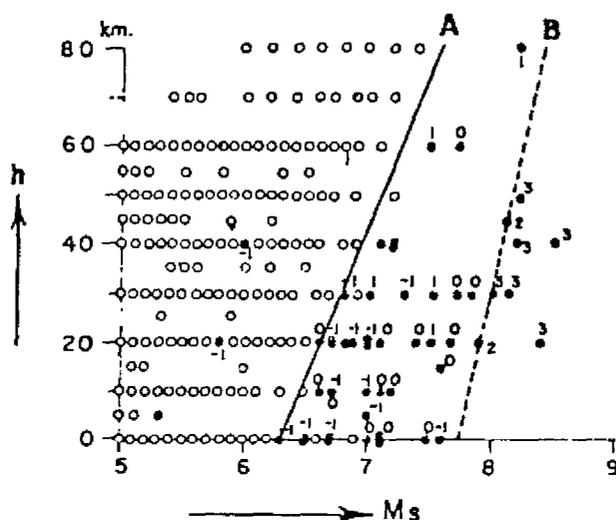
## FACTORES QUE AFECTAN LA MAGNITUD DEL TSUNAMI

La magnitud del tsunami, y por lo tanto su poder destructivo, depende de varios factores:

### - Magnitud del sismo y su profundidad focal.

La relación ha sido determinada estadísticamente por Iida para sismos ocurridos en las cercanías de Japón, por lo que debe utilizarse con las mismas reservas mencionadas anteriormente. (Ver Figura No. 6).

Fig. 6 : RELACION ENTRE LA PROFUNDIDAD FOCAL (h) Y LA MAGNITUD DEL SISMO ( $M_s$ )



○ SISMO NO ACOMPAÑADO POR TSUNAMIS

● SISMO ACOMPAÑADO POR TSUNAMIS

- LOS NUMEROS FUERA DEL CIRCULO SON LA MAGNITUD DEL SISMO  $M_s$

Sin embargo, según recientes estudios, la magnitud de un tsunami se relaciona mejor con el Momento Sísmico ( $M_0$ ), es decir con el trabajo total efectuado por el sismo sobre el área afectada, que con la Magnitud Sísmica ( $M$ ) que mide la energía liberada por el terremoto. La razón está en que la Magnitud Sísmica se calcula utilizando ondas sísmicas cuyos períodos son muy cortos en comparación con los de las ondas de los tsunamis.

### Area de la corteza terrestre que se disloca en el fondo del mar.

Forma en que esto ocurre (instantánea o progresivamente), y velocidad de dislocación.

- **Ruta de propagación del Tsunami.** es decir, el efecto de la batimetría del fondo oceánico, cuyos accidentes pueden constituir obstáculos o causar la convergencia de la energía de las ondas. Por ejemplo, si en la plataforma continental existen cauces que llegan hasta las costas, el tsunami se encausará y avanzará rápidamente y prácticamente sin pérdida de energía por fricción, llegando con gran violencia a la orilla.
- **Variación direccional.** En Japón se ha podido observar que para tsunamis de origen cercano, el ángulo que forma el eje de la bahía con respecto a la dirección de origen del tsunami influye de manera importante en la altura de la ola; los efectos son mayores en las bahías que se abren directamente hacia el origen del tsunami. Similares consecuencias se obtienen para tsunamis de origen lejano. Un ejemplo de esto último son los daños provocados en Hawai y Japón por el tsunami de Chile de 1960, del cual se habló en la introducción del capítulo.
- **Configuración de la bahía.** La configuración de la bahía modifica la altura del tsunami, elevándola considerablemente si se trata de bahías que se angostan (en forma de U, V, W) en zonas de costas altas. Para este caso, el incremento de la altura de la ola se puede estimar mediante la Ley de Green, que se explica más adelante. Por otra parte, la coincidencia entre el período natural de vibración de la masa de agua y el período del tsunami que se introduce en la bahía, puede incrementar la altura de ola de manera considerable.
- **Topografía de la zona inundada.** Si el terreno tiene poca pendiente y no presenta accidentes, el tsunami invade la zona de manera más o menos uniforme, con mayor o menor violencia si se trata de tsunamis de período corto o largo, respectivamente. Conforme se incrementa la pendiente del terreno, disminuye tanto la altura de ola como su velocidad de propagación; pero cuando la masa de agua vuelve al mar tiende a ganar velocidad, causando fuerte erosión. Si hay franjas de terreno de bajo nivel que dan frente al mar, por ejemplo la desembocadura de un río seco, el tsunami se canaliza a través de ellas, pudiendo avanzar grandes distancias tierra adentro. Como puede apreciarse, la altura de la ola depende de muchos factores; por lo tanto, cuando se trata de calcularla para un caso específico, la concordancia del conjunto de hipótesis asumidas con lo que realmente sucederá es muy difícil. Sin embargo, basándose en las condiciones batimétricas y topográficas de la zona pueden estimarse valores que, comparados con las informaciones históricas de alturas de ola y zonas inundadas en eventos anteriores, especialmente durante tsunamis generados por sismos cuyas magnitudes fueron superiores a 8 Richter, conducen a resultados confiables que pueden ser utilizados en la preparación de los planes de protección de la población y zonas amenazadas, así como en el planeamiento de los nuevos asentamientos humanos en zonas cercanas al mar.

#### CRITERIOS PARA ESTIMAR LA ALTURA DE OLA EN LA COSTA

- **En la entrada de la bahía.** Después de estudiar los efectos del tsunami de Sanriku de 1933, Yamaguchi propuso un método simple y práctico para estimar la altura de la ola en la entrada de una bahía,

es decir, antes de sufrir perturbaciones locales. El encontró que en aguas poco profundas (menos de 100 metros) las pérdidas de energía por fricción con el fondo eran muy significativas, y que la altura de la ola decrecía al incrementarse la distancia recorrida. Según su formulación, la elevación del mar sobre su nivel medio ( $H$ ) puede determinarse por:

$$H = 12.3 e^{-0.067 D} \dots\dots (2.7)$$

donde:

D = Distancia en kms. desde la entrada de la bahía hasta la línea batimétrica de los 100 metros.

Como las bahías de Sanriku son muy cerradas, sus entradas o bocas forman prácticamente una línea costera, a la cual se refiere el estudio de Yamaguchi. Entonces, es posible generalizar la aplicación de la fórmula a: la entrada de una bahía muy cerrada, al fondo de una bahía muy abierta, y a la orilla de una larga franja costera. "D" viene a ser la distancia en kms. desde la isobata 100 metros hasta los puntos mencionados.

- Incremento de la altura de ola en la bahía (Ley de Green)

Si se asume que la disipación de energía dentro de una bahía es despreciable debido al relativamente corto camino que recorren las olas, el incremento de su altura ( $H$ ) dentro de la bahía puede estimarse de acuerdo a la Ley de Green. (Ver Figura No. 7).

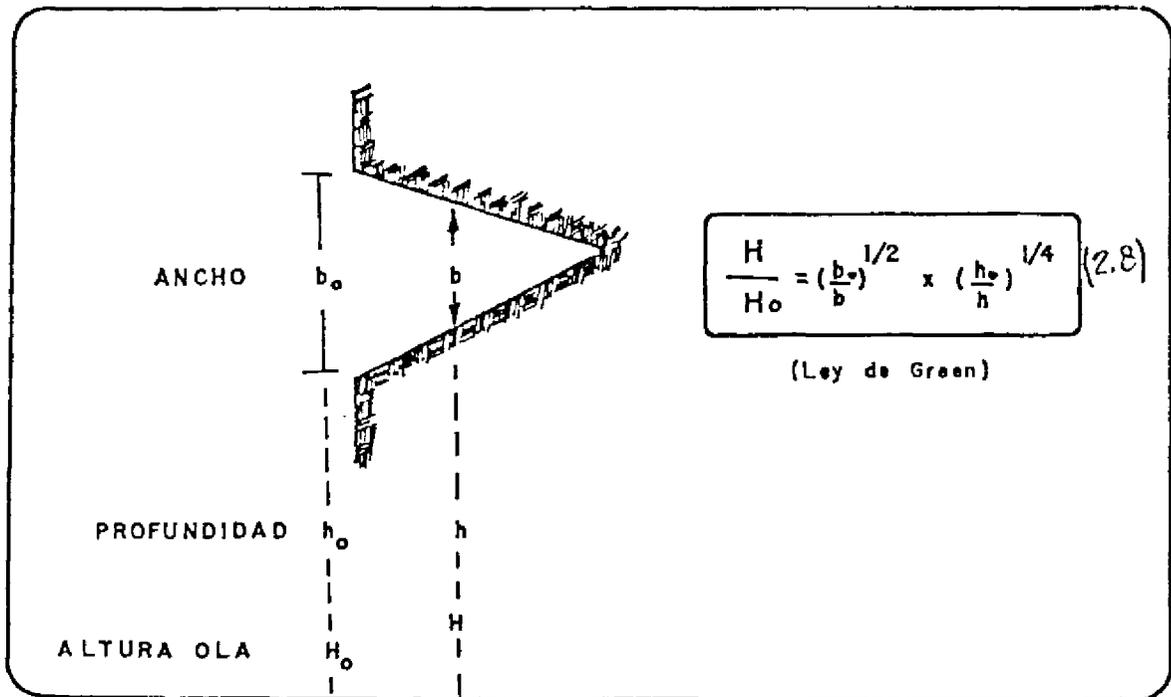


Fig. 7 Influencia de la configuración geométrica de la bahía sobre la altura de ola

donde:

$H_y H_o$  = elevación del mar sobre su nivel medio, en mts., a la entrada y al fondo de la bahía, respectivamente.

$b_y b_o$  = ancho de la bahía, en mts., a la entrada y al fondo de la misma, respectivamente.

$h_y h_o$  = profundidad del mar desde su nivel medio, en mts., a la entrada y al fondo de la bahía, respectivamente.

- **Influencia del período natural de oscilación de la bahía.** Según estudios de efectos de tsunamis en las costas japonesas, la coincidencia entre el período de vibración de la masa de agua de la bahía, que se comporta como un "péndulo fluido", y el período del tsunami que la excita, tiende a incrementar la altura de la ola. Durante el tsunami de Sanriku de 1933, que fue de período corto (unos 10 minutos), los mayores daños ocurrieron en bahías en forma de V cuyo período de oscilación era cercano a dicho valor; en cambio, el tsunami de Chile de 1960 dañó con severidad las bahías más amplias, cuyos períodos naturales eran del orden de 30 a 40 minutos; el período de este tsunami se estimó entre 50 a 70 minutos, pero con fuertes componentes de la segunda armónica. Estas bahías no sufrieron daños en 1933.

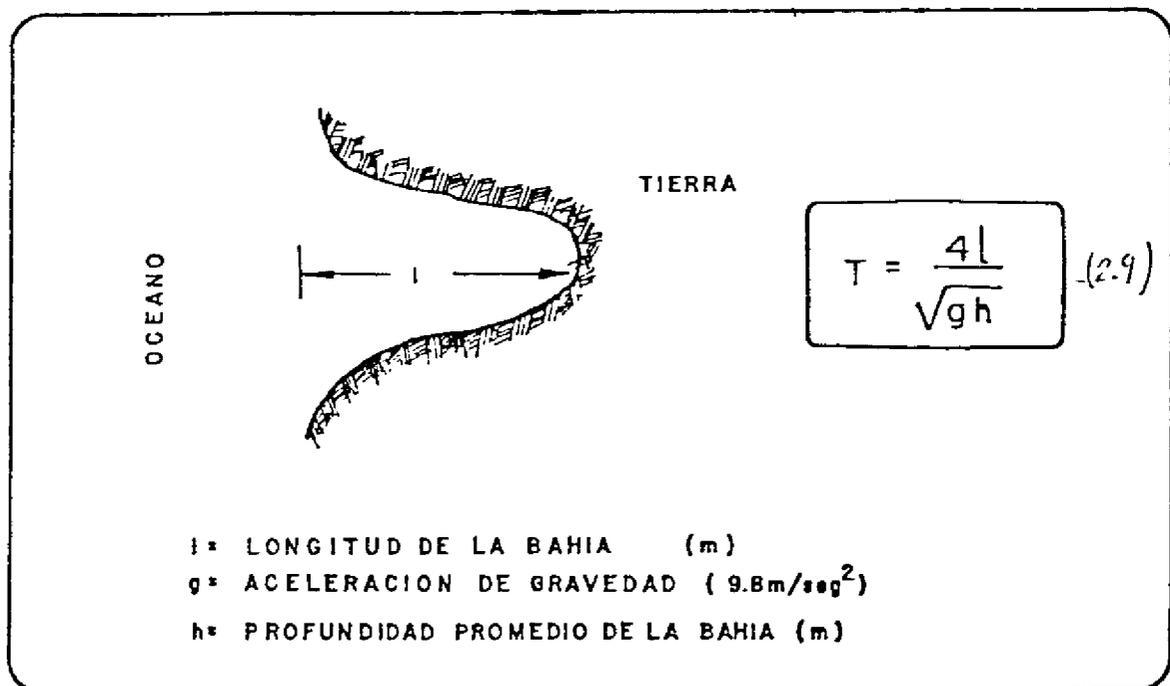


fig. 8 Cálculo del período de una bahía

### INFLUENCIA DE LAS MAREAS EN LA ALTURA DE LA OLA

Las mareas son movimientos periódicos y alternativos de ascenso y descenso del mar (pleamar y bajamar, respectivamente) producidos por la atracción gravitacional que sobre la tierra ejercen el sol y la Lu

na principalmente, y también por la aceleración de su rotación. Las mareas de mayor altura (Sicigias) se producen en luna llena y luna nueva, cuando el Sol y la Luna entran en conjunción, es decir se ubican en el mismo cuadrante, sumándose los efectos de atracción de ambos astros sobre la masa de agua.

Las mareas pueden ser diurnas, si hay una pleamar por día, y semi-diurnas si son 2 pleamares cada 24 horas. En el litoral peruano ocurre el segundo caso, y las mareas altas se inician en el Norte, Ta lara, y se propagan hacia el Sur, llegando a Ilo en unas 4 horas.

El nivel del mar al momento del tsunami influye en la altura de la ola, y por lo tanto en la extensión de la inundación y daños provocados. Por ejemplo, el registro del mareógrafo de La Punta correspondiente al tsunami del 17/10/1966, muestra que al llegar éste a la costa y durante las 4 horas siguientes la marea era alta. Durante este tiempo arribaron la 5ta. y 6ta. olas que fueron las de mayor altura; la 6ta. saturó el límite de registro, superando los 4 mts. s.n.m.m. En cambio, el tsunami del 3/10/1974 arribó a la costa cuando se iniciaba una bajamar, y la ola de mayor altura sobre la marea (unos 3 metros) se produjo cuando el nivel del mar estaba casi un metro por debajo de su nivel medio; así, la altura máxima de ola de este tsunami fue de sólo 2 mts. s.n.m.m. Si la marea hubiera tenido signo contrario (+1), la ola hubiera sido de 4 mts. s.n.m.m.

#### DELIMITACION DE LAS ZONAS INUNDABLES

El comportamiento en tierra de los tsunamis es bastante complejo, porque influyen sobre él varios factores que se conjugan de diversos modos. Sin embargo, la batimetría y sobre todo la topografía 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. Por ejemplo, Magoon indicó que el tsunami de Alaska de 1964 tuvo en Crescent City, California, una altura máxima de 6 mts. s.n.m.m. a lo largo de apreciable longitud de costa, y que 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 la cota del terreno cuya altura es igual a la altura de ola en la costa, pero debe corregirse por efectos de la pendiente del terreno y la posible convergencia o divergencia del frente de onda causada por la topografía.

La pendiente influye de manera importante en la penetración del tsunami en tierra. Cuando la franja de terreno es angosta y la pendiente es relativamente fuerte, la extensión de la zona inundada no es muy grande, pero la altura del Run-up es mayor que la altura del tsunami en la costa. En cambio, cuando el terreno es casi plano, la penetración puede ser de kilómetros, pero la máxima cota que alcanza

la inundación es menor que la altura de ola en la costa, lo que hace pensar que en este caso las pérdidas por fricción en tierra son bastante significativas.

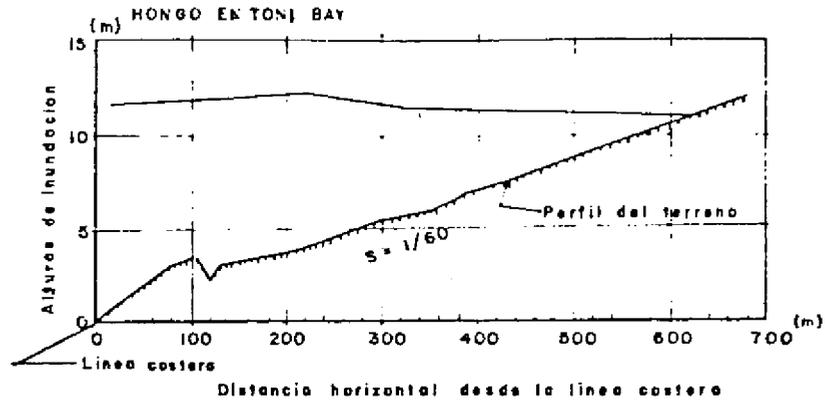


fig. 9 Traza de la línea de inundación en Hongo Toni bay .Japan

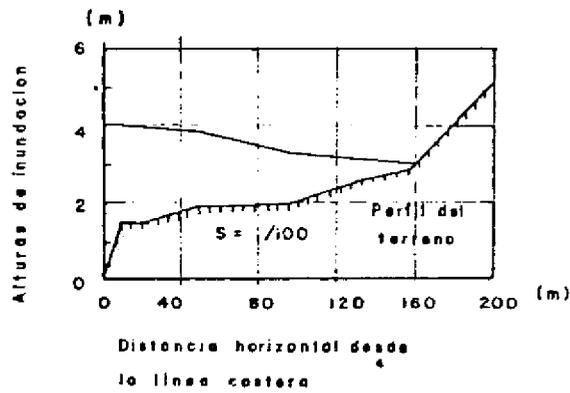


fig. 10 Traza de la línea de inundación en Kamaishi

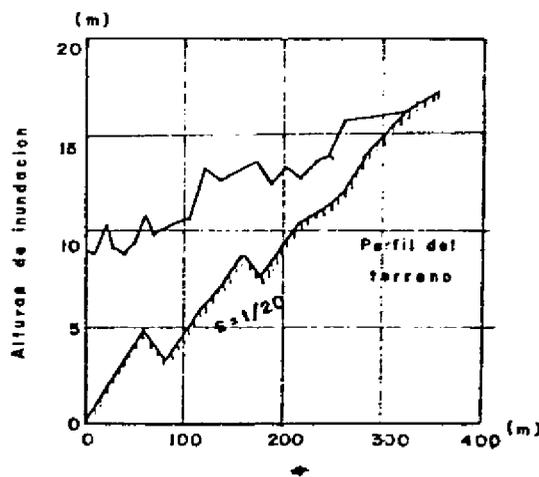


fig. 11 Traza de la línea de inundación en Sasu Toni bay Japan

Alturas de inundación del Tsunami de Sanriku , Japon , 1933

El método que se propone a continuación puede aplicarse en aquellos lugares donde la topografía del terreno no canaliza la energía del tsunami, y por lo tanto no modifica sustancialmente el área inundable. Este método toma en cuenta la influencia de la pendiente del terreno y sus accidentes, responsables de las pérdidas de energía por fricción:

- 1°. Se ubica la altura de ola sobre la línea costera y se traza una recta horizontal a partir de la misma. La intersección de esta línea con el perfil del terreno nos da la primera aproximación de la zona inundable. (Ver Figura No. 12).

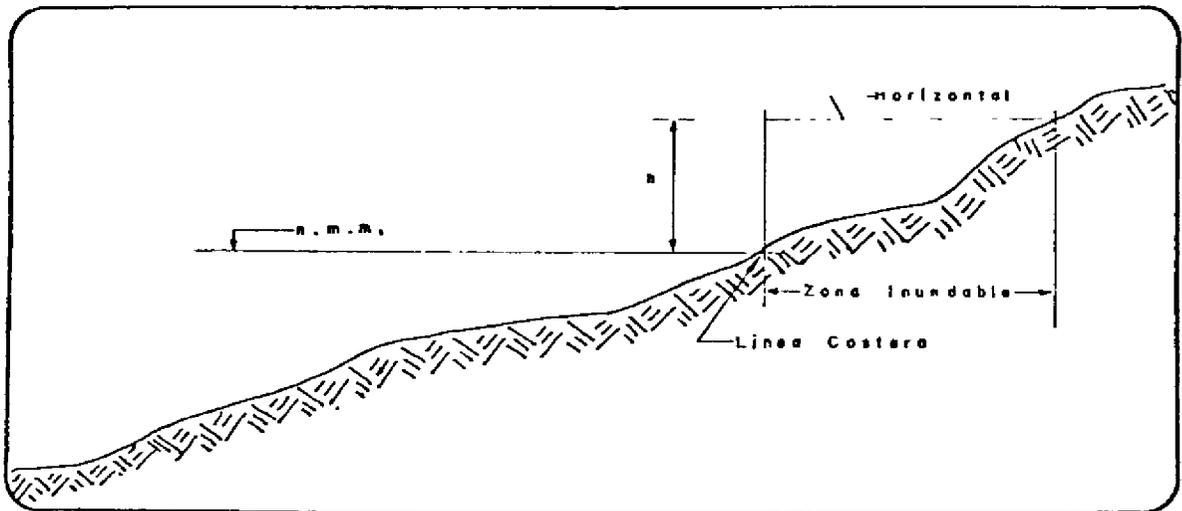


fig 12 - Delimitación aproximada del área inundable

- 2°. La pendiente del terreno corrige la primera aproximación:
  - a. Si el terreno tiene una pendiente menor de  $1/50$ , se trazará desde la altura de ola una recta que declina tierra adentro con pendiente  $1/100$  si los efectos de fricción son fuertes, y  $1/200$  si no son tan intensos. El punto de intersección con el terreno delimita la franja inundable. (Ver Figura No. 13).
  - b. Si el terreno tiene una pendiente mayor de  $1/50$ , la recta que parte desde la altura de ola ascenderá con pendiente  $1/200$ . (Ver Figura No. 14).

Debe anotarse que el Run-up es función también de la concentración de la energía del tsunami cuando éste encuentra cauces que le facilitan la entrada, o de su dispersión cuando las condiciones no le son favorables. Ello debe tenerse muy en cuenta.

#### IMPORTANCIA DE LA HISTORIA EN EL ESTUDIO DE TSUNAMIS

El registro histórico, entendiéndose como tal la recopilación de documentos y depuración de relatos de tsunamis ocurridos y que afectaron a una determinada población, constituye un arma muy útil para eva

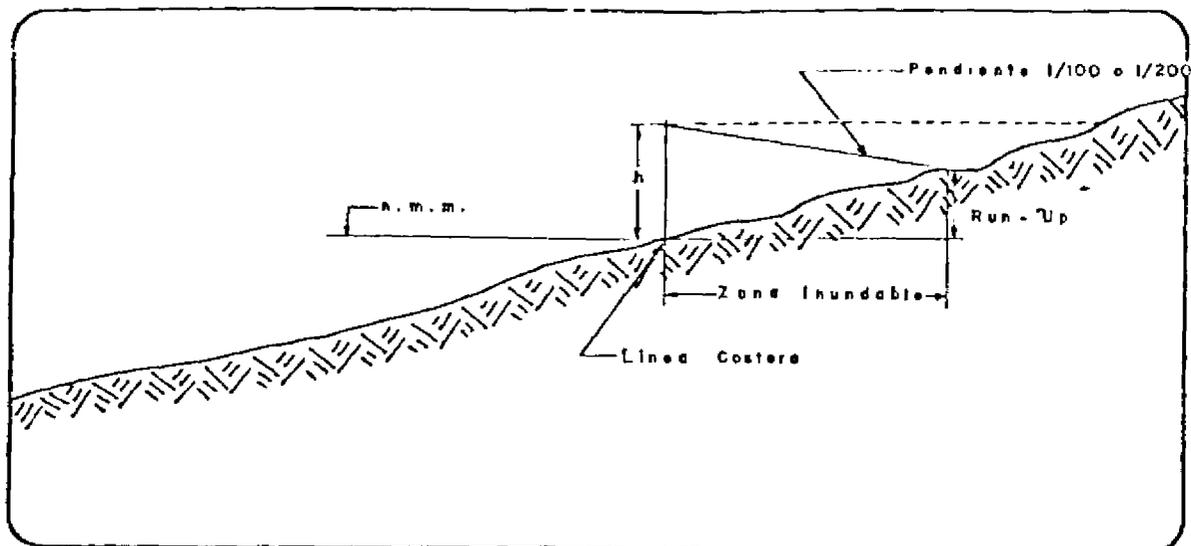


fig 13.- Correccion del area inundable delimitada (Pendiente terreno  $< 1/50$ )

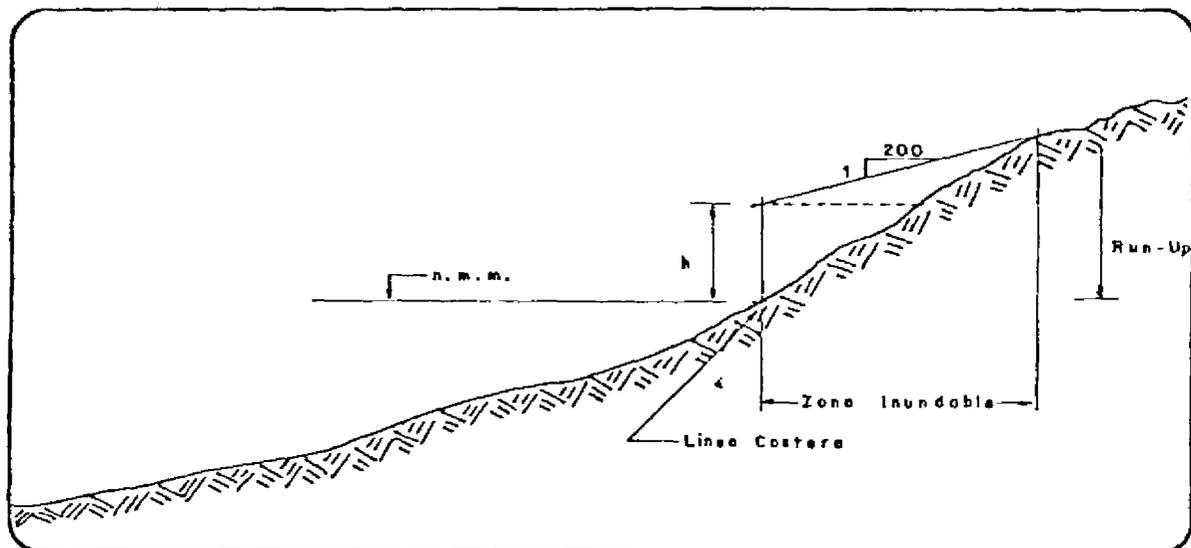


fig 14.- Correccion del area inundable delimitada (Pen. terreno  $> 1/50$ )

lugar los posibles efectos que un tsunami futuro pueda ocasionar, y para recrear los pensamientos y acciones de los pobladores de entonces, antes y después de la ocurrencia de cada evento. Desde el punto de vista de la protección de la población y planificación urbana, esto último es singularmente importante.

El registro histórico proporciona algunas veces:

- el tiempo de llegada de la primera ola a la costa
- la altura de ola, y
- el registro de inundación y destrucción, para algunas localidades; asimismo,

- 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;
- las características de los sismos tsunamigénicos que ocurren en ella;
- la altura máxima de ola;
- el tiempo mínimo de llegada, y
- las zonas inundables, para algunas localidades.

## C A P I T U L O    I I I

### POSIBLES EFECTOS DE TSUNAMIS EN LAS COSTAS DE LIMA METROPOLITANA

#### LA COSTA EN ESTUDIO

El área estudiada comprende las zonas bajas de la costa de Lima - Metropolitana limitada entre Ancón, por el Norte, y Pucusana por el Sur. En su parte central se ubica el Callao, que es el principal puerto marítimo del Perú, por donde se importa y exporta aproximadamente el 60% del volumen total que moviliza el país.

En el Callao se encuentra también la Base Naval Peruana más importante, la Escuela Naval del Perú, la Escuela Marinos Mercantes, y la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina. Hacia el Norte se localiza una de las zonas industriales de Lima, la pista de vuelo del Aeropuerto Internacional Lima-Callao, y en su extremo Norte, una refinería de gasolina (La Pampilla).

Desde Lima hacia el Sur, lo mismo que desde Ventanilla hacia el Norte, las poblaciones estudiadas son áreas recreacionales de verano para los cerca de 5 millones de habitantes de Lima Metropolitana; pero algunas de ellas como Ventanilla, La Punta y Pucusana tienen población estable (residente). Las otras ciudades tienen una población flotante que se duplica o triplica en los meses de verano.

La población amenazada de manera más peligrosa comprende cerca de 200,000 habitantes. En suma, se trata del tramo de costa más importante del país.

#### LA ZONA DE GENERACION DE LOS TSUNAMIS Y CARACTERISTICAS DE LA GENERACION.

En el Capítulo II se consideraron las causas generadoras de los tsunamis que afectan al Perú, concluyéndose que los más destructivos serían los producidos por sismos sudamericanos y algunos telesismos. Dentro de los primeros son singularmente importantes, por el escaso tiempo que media entre su generación y el arribo a la costa y por su posible fuerza destructiva, los generados directamente frente a la costa. El punto de partida de esta parte del estudio fue, entonces, la localización de la zona de generación de tsunamis de origen cercano que afectarían más desfavorablemente las costas de Lima Metropolitana.

Para delimitar la zona se hizo uso de los registros sísmicos (epicentros, profundidades focales, magnitudes) de los últimos años y de algunas apreciaciones históricas (Anexo I). Dentro de estas últimas es importante el estudio de Enrique Silgado sobre los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974.

Si se plotean en un mapa los epicentros de los sismos del: 24/8/1942 (15°S y 76°W; profundidad focal = 60 kms; Magnitud = 8.2 Richter), 17/10/1966 (10.7°S y 78.6°O, p.f. ( $\Delta h$ ) = 38 kms. M = 7.5 Richter), y 3/10/1974 (12.3°S y 77.8°O,  $\Delta h$  = 13 kms. M = 7.5 Richter), se encontrará que la línea que une los tres epicentros se ubica entre la fosa Perú-

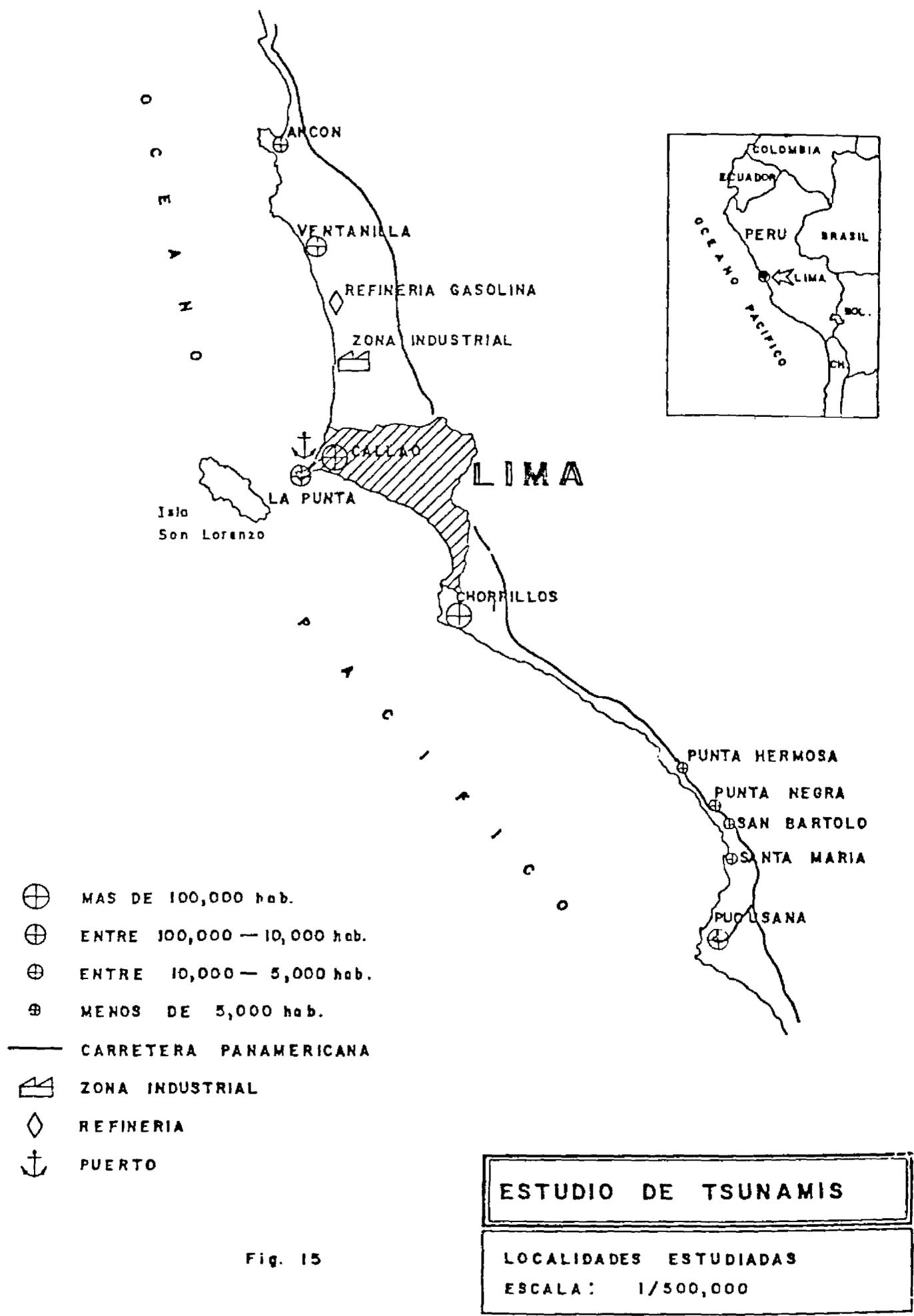


Fig. 15

**ESTUDIO DE TSUNAMIS**

LOCALIDADES ESTUDIADAS  
 ESCALA: 1/500,000

Chile y la costa, y es paralela a ambas y a la Cordillera de los Andes. Por otra parte, Silgado en su estudio asignó a los sismos anteriores a los registros instrumentales, epicentros y magnitudes obtenidas de relaciones empíricas por él encontradas entre la Magnitud, intensidad y extensión areal de los sismos ocurridos en el Perú en los últimos cuarenta años. Así, para Silgado, el sismo del 9/7/1586 habría tenido su epicentro en los  $12.2^{\circ}\text{S}$  y  $77.7^{\circ}\text{O}$  y Magnitud 8.1 Richter; el del 20/10/1687, epicentro en los  $13^{\circ}\text{S}$  y  $77.5^{\circ}\text{O}$ , y Magnitud 8.2 Richter; el del 1/12/1806, epicentro en los  $12^{\circ}\text{S}$  y  $78^{\circ}\text{O}$  (no estimó la Magnitud). Al sismo del 28/10/1746, Silgado le asigna la máxima Magnitud (8.4 Richter) y estima su epicentro en los  $11.6^{\circ}\text{S}$  y  $77.5^{\circ}\text{O}$ , a 24 kms. de la costa. Todos estos sismos generaron tsunamis.

Ahora bien, el tiempo de arribo del tsunami producido por este último sismo fue de 30 minutos; si se utiliza la carta de refracción del tsunami de 1966, preparada para este estudio (ver acápite siguiente), se puede especular la situación del borde de la elipse o frente inicial de onda y, en consecuencia, el epicentro del sismo. En efecto, "retrocediendo" el tsunami 30 minutos desde la costa a mar adentro, se obtiene el frente inicial a partir del cual se plotearía la elipse generadora, cuyo ancho es función de la Magnitud Sísmica pero limitada por el ancho de la interfaz de contacto entre las placas Nazca y Sudamericana, que para el caso de la costa central del Perú se calcula entre 75 a 100 kms. De esta manera, estimamos que el epicentro del sismo de 1746 estuvo en realidad a 100 kms. de la costa, aproximadamente.

En consecuencia, los epicentros de los sismos de 1586, 1687, 1746 y 1806 se ubicarían a uno y otro lado de la línea mencionada al principio y muy cerca de ella, delimitando una franja sísmica que produjo los tsunamis de origen cercano más desfavorables, por el escaso tiempo de arribo a la costa y por su poder destructivo.

Por lo tanto, cabe señalar a la angosta franja entre la fosa Perú-Chile y la costa central del Perú, y paralela a ellas, como la zona sísmica de probable generación de tsunamis de origen cercano a Lima Metropolitana. Esta franja sísmica tendría como eje la línea que une los epicentros de los sismos de 1942, 1966 y 1974, pudiéndosele considerar a dicho eje como la línea de epicentros probable que puede generar un tsunami que llegaría a la costa en el tiempo más corto.

Considerando los registros sísmicos y apreciaciones históricas, los tsunamis se generarían siempre y cuando los sismos en la franja reunieran las siguientes características: Magnitud igual o mayor a 7.5 - Richter, y profundidad focal igual o menor a 60 kms.

#### **APLICACION DEL METODO DE REFRACCION EN LA ESTIMACION DEL TIEMPO DE LLEGADA DE LA PRIMERA OLA A LA COSTA.**

De los tres sismos cuyos epicentros se han elegido como referencia de la zona generadora de tsunamis, los dos últimos (1966 y 1974) - son particularmente importantes para nuestro estudio por las siguientes razones:

- ambos poseen registros confiables de epicentro, magnitud y profundidad focal;
- los tsunamis generados fueron registrados por el mareógrafo de La Pun

ta, el que registró también el momento del sismo. Esto hace posible obtener del mareograma el tiempo real de arribo de la primera ola del tsunami a La Punta.

Como se ha explicado en el Capítulo II, el Método de las curvas de refracción permite reconstruir el viaje del tsunami desde su frente de onda inicial hasta la costa. Como los siguientes frentes se dibujan ca da cierto intervalo de tiempo (p.ej., 1 minuto), el tiempo de viaje es una consecuencia del gráfico. La comparación del tiempo real, dado por el mareograma, y el tiempo hipotético, dado por la Refracción, determi na la precisión de la hipótesis de generación asumida.

El anterior proceso fue aplicado a los tsunamis de 1966 y 1974 con los siguientes resultados.

#### **EL TSUNAMI DEL 17 DE OCTUBRE DE 1966**

El epicentro del sismo que lo generó estuvo ubicado en las coorde nadas  $78.6^\circ$  longitud Oeste y  $10.7^\circ$  latitud Sur, al Noroeste de la costa estudiada. La profundidad focal fue de 38 kms. y la Magnitud 7.5 en la escala Richter.

Aplicando las fórmulas 2.3 y 2.4 del Capítulo II, se encontró que:

$$S = 117.5 \text{ kms. (eje mayor de la elipse)}$$

$$b = 72.8 \text{ kms. (eje menor de la elipse)}$$

Ubicado al centro de la elipse sobre el epicentro y dibujada aque lla, se procedió al trazado de las curvas de refracción que se presen tan en la figura 16. Como se puede observar, las ondas que viajan por zonas profundas lo hacen a mayor velocidad que aquellas que lo hacen pe gadas a la costa, por lo que el frente de onda que inicialmente viaja ba de Norte a Sur, gira gradualmente hasta colocarse (a los 35 minutos de inicia do el viaje) prácticamente paralelo a la costa, y desde ese mo mento sigue avanzando de tal manera.

De los 45 minutos en adelante se ha cambiado la escala del plano de trabajo, pero no se incluye aquí por razones de espacio. El tsunami llega a La Punta 54 minutos después de su partida desde el borde de la elipse.

En la figura 17 se presenta el registro del tsunami obtenido por el mareógrafo de La Punta. En él se observa que el sismo ocurrió a las 16h 41m 58s (hora local) y que la primera ola llegó a dicho lugar a las 17h 36m. El tiempo o intervalo entre ambos eventos es también de 54 minutos. La coincidencia de ambos valores es una casualidad y en general no se espera que esto ocurra. Se considera que los resultados son aceptables si dan valores del mismo orden de magnitud.

#### **EL TSUNAMI DEL 3 DE OCTUBRE DE 1974.**

El epicentro del sismo se ubicó prácticamente frente al Callao:  $77.8^\circ$  Oeste y  $12.3^\circ$  Sur. La profundidad focal fue de 13 kms. y la mag nitud 7.5 Richter. Los ejes de la elipse generadora son iguales a los

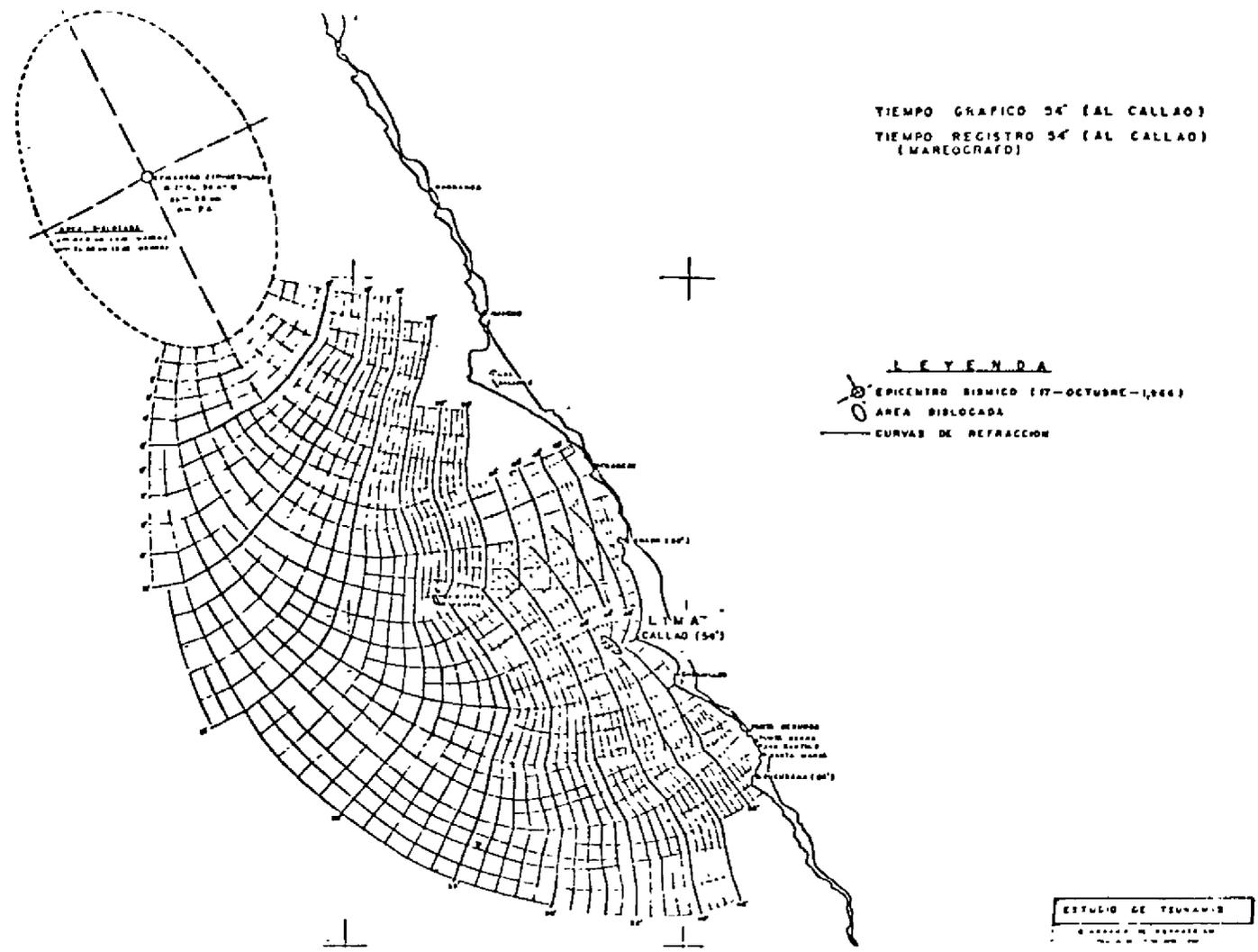


Fig. 16 DIAGRAMA DE REFRACCION DEL TSUNAMI DEL 17 DE OCTUBRE DE 1966 .

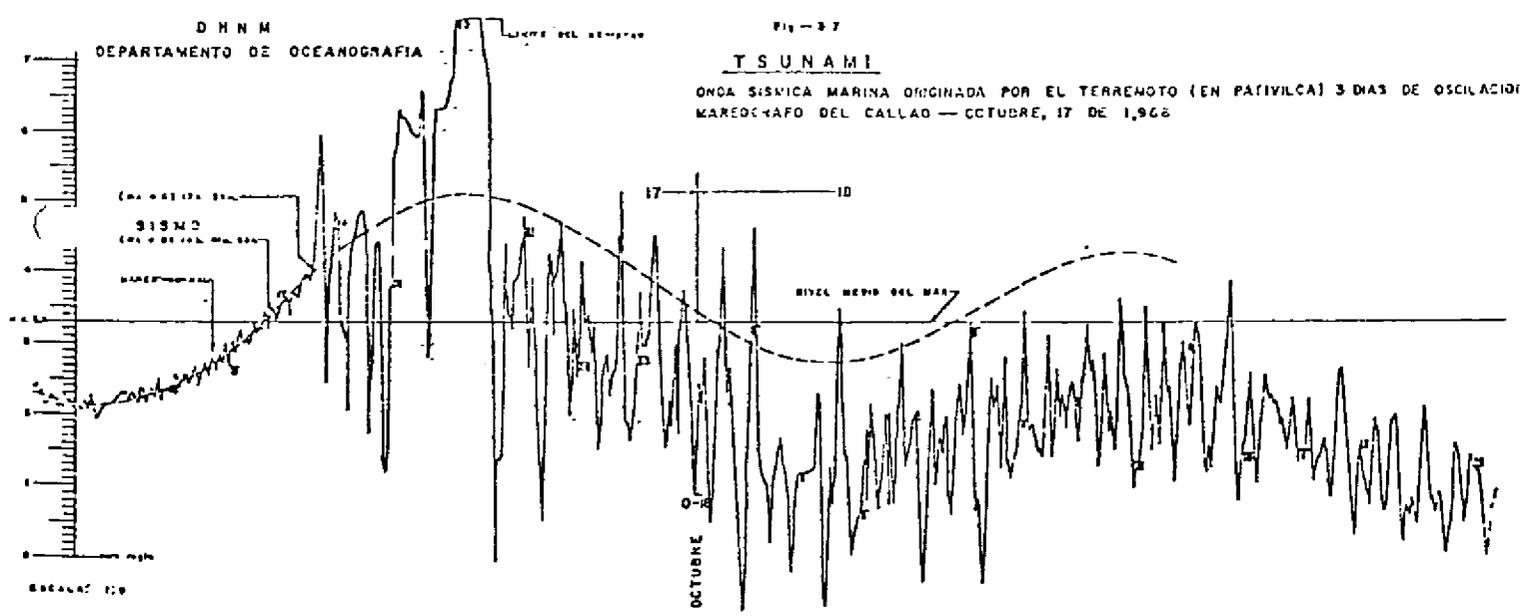


Fig. 17 REGISTRO DEL TSUNAMI DEL 17/10/1966 OBTENIDO EN EL MAREOGRAFO DE LA PUNTA - CALLAO (CORTESIA DE LA DIRECCION DE HIDROGRAFIA Y NAVEGACION DE LA MARINA DE GUERRA DEL PERU )



del sismo de 1966 por estar en función de la Magnitud Sísmica, que es la misma para ambos eventos.

Las curvas de refracción que se presentan en la figura 18 dan un tiempo de viaje de 25 minutos.

Del registro del mareógrafo de La Punta se obtiene que el sismo ocurrió a las 9h 21m (hora local), y que la primera ola llegó a las 9h 42m, lo que da un tiempo de viaje de 21 minutos (Ver figura 19).

Los valores obtenidos, 25 y 21 minutos, son bastante cercanos, por lo tanto aceptables y muy útiles para los fines de nuestro estudio.

Observando los dos diagramas se puede concluir que:

- i) Los frentes de onda de los tsunamis avanzan paralelos a la costa limeña desde 19 a 20 minutos antes de llegar a ella, lo cual es consecuencia de la regularidad de las líneas batimétricas que son también paralelas a la costa (recordar que la velocidad de propagación, y por lo tanto el espacio recorrido en un tiempo dado, son función directa de la profundidad del océano por el cual viaja el tsunami; fórmula 2.2, Capítulo II).
- ii) El diagrama de refracción de 1966 muestra que desde su origen el frente de onda del tsunami gira gradualmente hasta ponerse paralelo a la costa limeña; como el giro es consecuencia de la velocidad y por lo tanto de la profundidad del agua, cabe suponer que cualquiera sea el punto donde se ubique el origen de un tsunami cercano, el frente de onda incidirá paralelo a la costa limeña, de acuerdo a lo expresado en el párrafo i).

En consecuencia, al trazar frentes de onda desde la línea que une los epicentros de los dos sismos (eje de la zona tsunamigénica) se obtienen curvas paralelas a la línea de costa. Estas curvas pueden utilizarse para estimar el tiempo de llegada de un tsunami de origen cercano a cualquier punto de la costa limeña, como se verá a continuación.

#### **GRAFICO PARA ESTIMAR EL MINIMO TIEMPO DE LLEGADA DE LA PRIMERA OLA A CUALQUIER PUNTO DE LA COSTA LIMEÑA.**

El diagrama mostrado en la figura puede utilizarse para calcular de manera rápida y simple el mínimo tiempo de arribo de la primera ola a cualquier punto de la costa limeña, si se asume que el epicentro del sismo tsunamigénico se ubica directamente al frente de dicho punto, y se asume o se da la magnitud del terremoto. Veamos como:

1. Desde el punto de la costa seleccionado se traza una perpendicular a la línea de epicentros. La intersección de ambas será al centro de la elipse.
- 2 A partir del centro de la elipse se traza en dirección a la costa la distancia  $b/2$  o semi eje menor, estimado en función de la fórmula 2.4 del Capítulo II, con las siguientes limitaciones:
  - La Magnitud Sísmica no debe ser menor a 7.5 Richter.



- Como el valor  $b$  depende del ancho de la interfaz de contacto entre las placas Nazca y Sudamericana, el cual se ha venido estimando entre 75 a 100 kms. para la costa central del Perú, la fórmula debe utilizarse para Magnitudes iguales o menores a 8.3 Richter; para valores superiores tomar  $b = 114$  kms.

3. Del tiempo total de viaje entre la línea de epicentros y la costa se resta los minutos que abarca  $b/2$ . La diferencia dará el mínimo tiempo de viaje del tsunami que partiendo del borde de la elipse llegue al punto de la costa escogido.

### **ALTURA DE OLA EN LA COSTA LIMEÑA**

La máxima altura de ola en diferentes puntos de la costa limeña es un dato de suma importancia para los planes de evacuación, ya que nos permite delimitar las zonas inundables y las zonas seguras.

Para determinar la altura de ola en la costa se han empleado los siguientes criterios:

- Fórmula empírica de Yamaguchi (Ver Capítulo II)
- Registros históricos de alturas de olas

Para el caso del Callao y La Punta, la fórmula se ha aplicado a la costa Oeste de la isla San Lorenzo, por considerar que ésta es la primera costa atacada por el tsunami. Además, la isla perturba el avance del tsunami, bifurcándolo, como dos tsunamis menores que se abaten sobre las costas Norte y Sur de La Punta y Callao.

Para el caso de Ancón, bahía que se abre hacia el Norte, la fórmula se ha aplicado en la punta Oeste de la misma, y los efectos locales estimados por la batimetría; ésta tiene una pendiente ascendente uniforme  $1/95$ , por lo que el mar es normalmente apacible y sin olas. Los registros históricos, que son escasos, indican que el tsunami penetra más como inundación que como bravo oleaje, y las áreas inundadas son las mismas para un tsunami de origen cercano originado por un sismo de  $M = 7.5$  Richter, el de 1966, que para un tsunami de tipo local, el producido por el sismo de 1940.

Pucusana es una bahía en U abierta hacia el Noroeste; por lo tanto no se abre directamente hacia el océano, lo que disminuye el riesgo de tener tsunamis con alturas de ola importantes. Frente a la bahía, a 300 metros, está la isla Galápagos, que al igual que San Lorenzo en el Callao, sería la primera costa atacada por el tsunami. En condiciones normales, dentro de la bahía el mar es apacible y sin olas.

- **Aplicación de la fórmula de Yamaguchi a la costa limeña.** Las alturas de ola calculadas según la fórmula son las siguientes: (Ver figura 21).

- . Ancón; entrada de la bahía: 2.63 mts.
- . Ventanilla - Norte del Callao: 3 a 4 mts. (creciente)
- . Costa Oeste de San Lorenzo: 8.8 mts.
- . Chorrillos - Villa: 4.5 mts.
- . Punta Hermosa: 4.5 mts.
- . Punta Negra: 5 mts.

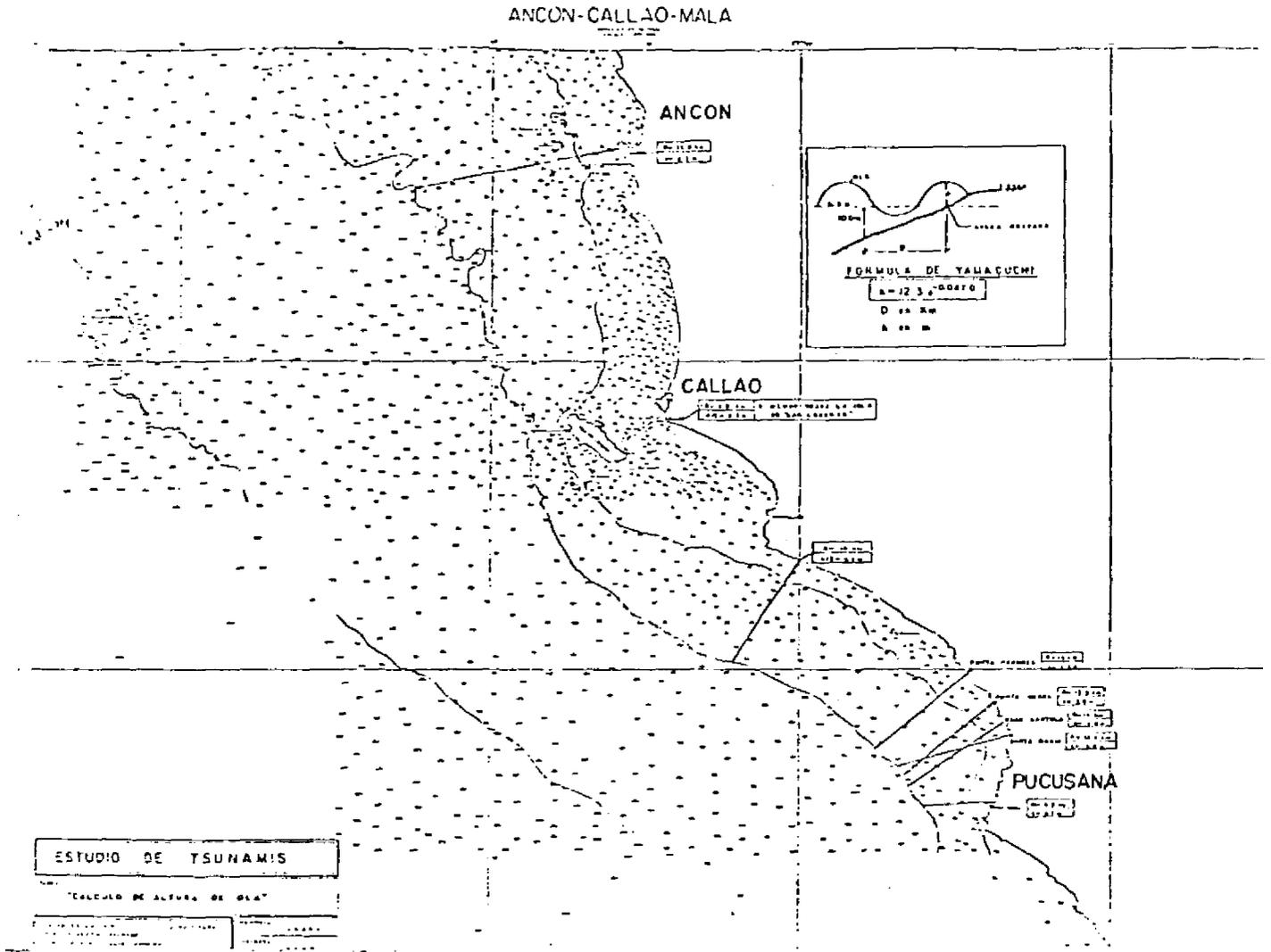


Fig. 21 BATIMETRIA Y UBICACION DE LA ISOBATA DE LOS 100 MTS. FRENTE A LAS COSTAS DE LIMA METROPOLITANA.

- . San Bartolo: 4.8 mts.
- . Santa María: 5 mts.
- . Naplo-Pucusana; entrada de la bahía: 6.7 mts.

- Registros Históricos.

En este acápite nos remitimos a la tabla resumen al final del Anexo I, en la cual se dan las alturas de ola estimadas según los relatos de daños e inundaciones.

El resumen indica que las máximas alturas de ola registradas hasta el momento son:

- . Ancón: 3.2 mts. para sismo en el mar  $M = 7.5$  Richter, y para sismo continental  $M = 8.2$  Richter. (Este último se refiere al sismo de 1940 donde se piensa que hay error en la ubicación del epicentro y que el epicentro realmente estuvo en el mar. Esto se dedujo a partir de las isosistas de ese terremoto).
- . Callao: 7 mts. para sismo en el mar  $M = 8.4$  Richter (magnitud estimada).
- . Pucusana: 3 mts. para sismo en el mar  $M = 7.5$  Richter

- Comparación de ambos criterios.

La comparación de resultados sugiere: a) una coincidencia o aproximación para el caso de Ancón, b) una plausible explicación para la reducción de la altura de ola de 8.8 mts. en San Lorenzo a 7 mts. en el Callao por efectos de fricción y otras causas; y c) una notable diferencia para el caso de Pucusana, donde la distancia desde la entrada de la bahía hasta el fondo de la misma no es tan grande para causar la disminución de la altura de ola en más de 3 mts.

Por otro lado, aceptando los resultados de la fórmula de Yamaguchi y la apreciación histórica sobre el Callao, salta a la vista la diferencia entre las alturas de ola en Callao (7 mts.) y el Norte del Callao (4 mts.), o el Sur (4.5 mts.). Uno de los sustentos de este estudio es haber demostrado que la ola de 1746 fue ligeramente inferior a los 7 metros de altura en la costa. (Ver Anexo I). Cabe preguntarse entonces que condiciones locales afectan al tsunami para producir en esta parte de la costa una ola superior a todas.

La explicación estaría en la presencia de la isla San Lorenzo frente a La Punta. La isla está lo suficientemente alejada de la costa (4 kms. en su punto más cercano) como para que el tsunami llegue a ella con gran energía cinética. La batimetría de la costa Oeste de la isla es profunda, 25 mts. en promedio, mientras que en la costa este es inferior a la mitad; asimismo, la costa Norte es el doble de profunda que la Sur. En los diagramas de refracción se observa como el tsunami al llegar frontalmente a la isla choca con ella y se divide (se difracta) por el Norte y por el Sur. Suponemos que las ondas que inciden en la costa Oeste se reflejan y se suman a las ondas difractadas, creándose flujos que bordean la isla tanto por el Norte como por el Sur; pero, debido a la batimetría, el tsunami avanzará más rápidamente por el Norte donde las aguas son más profundas. En esta zona, la mayor profundidad está frente al Real Felipe (Callao antiguo), por lo que el tsunami se encauzaría, transformando rápidamente su energía cinética en potencial o de altura.

La costa al Norte del Callao es una franja costera muy amplia, y por ello cuando el tsunami incide frontalmente ha disipado ya parte de su energía por fricción con el fondo. No hay el efecto local de encauce que ocurriría frente al Callao.

La costa al Sur del Callao crece rápidamente en altura hasta formar acantilados; la batimetría es de pendiente más bien suave, sin efectos locales de encauce.

Para el caso de Ancón, los registros históricos y la ola calculada son del mismo orden, aunque habría que anotar que el registro histórico no contempla el caso de un tsunami generado por un sismo en el mar de magnitud mayor, como en el caso del Callao. Pucusana adolece del mismo defecto, con la adicional desventaja de que la presencia de la isla frente a la bahía complica la apreciación; por ello es preferible optar por el lado conservador y suponer en las playas de Pucusana y Naplo la altura de ola en la isla dada por la fórmula de Yamaguchi.

En consecuencia, las probables máximas alturas de ola en la costa limeña serían:

- . Ancón: 3.2 mts.
- . Ventanilla-Norte del Callao: 3 a 4 mts.
- . Callao-La Punta: 7 mts.
- . Chorrillos-Villa: 4.5 mts.
- . Punta Hermosa: 4.5 mts.
- . Punta Negra: 5 mts.
- . San Bartolo: 4.8 mts.
- . Santa María: 5 mts.
- . Naplo-Pucusana: 6.7 mts.

Por razones de orden práctico se considera como altura de trabajo 7 mts. para el Callao-La Punta y Naplo-Pucusana. Para los otros lugares 6 mts. y para Ancón 5 mts. considerando las incertidumbres de efectos locales en las "bahías".

## LA ALARMA

Para implementar la alarma en caso de un tsunami producido por un sismo submarino dentro de un área distante 600 kms. de las costas japonesas, se requiere un tiempo límite de 20 minutos cuando se usan sistemas computarizados de procesamiento de datos que ubican el epicentro del sismo y, en consecuencia, la dirección de origen del tsunami.

Los tsunamis limeños se han originado y seguramente tendrán como origen más probable la franja sísmicamente activa cuyo eje está a 80 kms. de la costa. El tsunami ahí generado llegará a la costa más cercana en un lapso cercano a los 20 minutos después de ocurrido el sismo. Por lo tanto, el tiempo de que se dispone para evacuar a la población de las zonas amenazadas es muy corto, y descarta un sistema de alarma por procesamiento de datos. Puesto que un tsunami no es un evento frecuente en nuestra patria, la población debe conocer la causa que puede originarlo: un sismo en el mar, cuya Magnitud sea fácilmente evaluada por los efectos que produce (Intensidad).

Como se ha visto, para el caso limeño los sismos potencialmente tsunamigénicos parecen agruparse dentro de las siguientes caracterís

ticas:

- . Magnitud, M, mayor o igual a 7.5 Richter;
- . Profundidad focal, h, menor o igual a 60 kms.

Las fórmulas de Shebalin relacionan la magnitud y la profundidad focal del sismo con la intensidad del mismo. Para profundidades menores o iguales a 60 kms. Shebalin propone:

$$I = 1.5 M - 3.5 \log h + 3$$

la cual, aplicada a los límites arriba mencionados, nos dá que el sismo menos intenso que podría provocar un tsunami tendría una intensidad equivalente al grado VIII en la escala Mercalli Modificada.

En consecuencia, la ocurrencia de un sismo de intensidad igual o mayor al grado VIII M.M. será la primera señal de alarma de probable ocurrencia de un tsunami. La población deberá entonces evacuar las zonas amenazadas por el mar.

### DURACION DE LA ALARMA

Según observaciones mundiales de tsunamis de origen cercano, las olas más altas son unas 10 a 15, después de las cuales la amplitud de crece notoriamente. Si se asume que el período de estas olas es en promedio 30 minutos, el tiempo de duración de la alarma sería unas 7h 30m. Las informaciones históricas indican también que la primera ola no es la de mayor altura, sino que ésta se dá generalmente entre la 3ra. y la 6ta.

Revisando los mareogramas registrados en La Punta durante los tsunamis de 1966 y 1974, se puede concluir que la perturbación del mar duró unas 24 horas en total, pero después de las primeras 9hs en 1966 y 8hs en 1974 la amplitud de las olas decreció ostensiblemente. En 1966, las 5ta y 6ta olas fueron las más altas, y la 3ra en 1974.

Podemos concluir que para tsunamis de origen cercano, la duración de la alarma o la permanencia en los refugios debe ser de unas 10 horas, y que la ola de mayor altura, la más destructiva, estará entre la 3ra. y 6ta. olas.

Para tsunamis de origen lejano, en que los períodos son mucho mayores y el número de olas es también mayor, la perturbación dura más que para los de origen cercano; pero las olas serían de menor altura. En estos casos, en que el alerta proviene de otras naciones a través de comunicaciones radiales, la alarma debe ser transmitida a la población por un organismo oficial local: Defensa Civil en coordinación con la Marina de Guerra.

Es importante destacar que el funcionamiento adecuado de un Plan de Evacuación depende en mucho de una alarma oportuna, por lo que en este trabajo se plantea la creación de un Sistema Nacional de Alerta y Alarma contra Tsunamis, que toma en cuenta las organizaciones nacionales y locales ya establecidas y que por sus actuales funciones sirven de base a la creación del Sistema.

## C A P I T U L O   I V

### PROTECCION DE LA POBLACION

#### ALERTA Y ALARMA, EVACUACION Y REFUGIO

Uno de los principales objetivos de este estudio es la protección de la población de Lima Metropolitana que vive y/o trabaja en las zonas inundables por tsunamis.

El actual Sistema Regional de Alerta contra Tsunamis, enlaza a tres instituciones nacionales como son: La Marina, el Instituto Geográfico y Defensa Civil que depende del Ministerio del Interior. La primera controla todos los puertos de la costa peruana, y a Hidrografía y Navegación que es la entidad encargada de registrar todos los fenómenos marítimos, entre otras importantes actividades. El segundo posee una red de estaciones de registros sísmicos más importantes de Sudamérica. La tercera es la institución creada para ayudar a la población en caso de desastre. El Sistema se enlaza internacionalmente con el Observatorio de Honolulu, en caso de ocurrencia de tsunami generado en cualquier punto del Pacífico.

Porque un sismo muy fuerte puede producir un tsunami cuyo tiempo de viaje sea muy corto, en cuyo caso el procesamiento de datos no es efectivo, el Sistema debe mejorarse. Se hace necesario que el poblador costero conozca el riesgo adicional que conlleva un sismo intenso; en consecuencia, que sea parte del Sistema.

Por lo tanto, en coordinación con las instituciones mencionadas, se está proponiendo una mejora y ampliación en el sistema de alerta existente.

Determinadas las probables alturas de ola en cada una de las poblaciones de Lima Metropolitana, en función de estos datos y la topografía de cada zona se delimitaron las áreas inundables. Los criterios empleados están descritos en el Capítulo II.

Se ha determinado también para cada lugar la zona de refugio en función de su accesibilidad, altitud mínima de 10 mts. s.n.m.m., y área disponible para albergue de la población afectada. Para el Callao se ha contemplado, además, la existencia de facilidades para dar servicios a una importante población refugiada, y cubrir necesidades especiales como dar techo a niños y ancianos, hospital para la atención de enfermos, y, sobre todo, el abastecimiento de agua que es esencial para la supervivencia de los refugiados. La Punta es un caso especial, ya que se trata de una baja península que se interna 2 kms. en el mar. Se estima que en el caso de un tsunami de origen cercano, parte de la población no podrá abandonar el área en el tiempo disponible, por lo que se ha seleccionado ahí edificaciones altas y resistentes a terremotos e inundaciones, que sirvan como refugio de emergencia hasta que el período crítico haya pasado.

## SISTEMA DE ALERTA Y ALARMA CONTRA TSUNAMIS

- **Objetivos del Sistema.** El Sistema se concibe como un Organismo Oficial encargado de proteger la vida humana ante los riesgos de ocurrencia de tsunamis en las zonas de residencia y/o trabajo, previendo dichas ocurrencias y sus posibles consecuencias, y alentando cualquier iniciativa en favor de una mayor y mejor protección. El Sistema será el vigilante permanente y deberá estar listo para actuar cuando se presente un período crítico.

- **Períodos Críticos del Sistema.** Un Período Crítico para el Sistema comenzará al conocerse la probabilidad de un ataque de Tsunami. Porque los más destructivos son generalmente causados por sismos, la localización del epicentro origina dos tipos de períodos críticos:

a. Período Crítico por la probable ocurrencia de un Tsunami luego de un sismo en la costa (Tsunami de Origen Cercano), para el cual el intervalo que transcurre entre el momento del sismo y el arribo de la primera ola a la costa es muy corto, constituyéndose el tiempo en el elemento primordial para las acciones de protección de la población. En este caso el sismo es la primera señal de alarma. Un sismo cuyas características en la zona sean iguales o mayores a las referidas a continuación, puede generar un tsunami:

- si es difícil permanecer en pie;
- si es dificultoso conducir automóviles;
- si se observan derrumbes en las edificaciones de albañilería - de ladrillo, y/o monumentos, y/o depósitos elevados o chimeneas.

En resumen, si el sismo tiene intensidad en la zona igual o mayor a VIII en la Escala Mercalli Modificada.

Debe tomarse en cuenta, además, la posibilidad de ocurrencia de un sismo moderado, no tsunamigónico, al cual suceden cierto número de réplicas; algunas de ellas puede ser de Magnitud (y por consiguiente de intensidad) mayor. Esto significa que el Sistema debe estar en alerta permanente desde el sismo inicial en previsión de una réplica importante.

b. Período Crítico por la probable ocurrencia de un tsunami originado por un sismo en el mar pero lejano a nuestra costa (Tsunami de Origen Lejano), donde el factor tiempo deja de ser primordial. En este caso, el alerta inicial proviene del Sistema de Alarma contra Tsunamis con sede en Hawaii (Siglas en inglés: SSWWSS = Seismic Sea Waves Warning System), y cuyo mensaje es captado por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina Peruana (DHNM), y por CORPAC en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (Ver figura 22).

**Medidas preventivas del Sistema.** Destinadas a crear la infraestructura operacional del Sistema. Ellas son:

1. Conocimiento cabal por parte de sus integrantes de los aspectos sismológicos más importantes de la zona, y evaluación de los efectos de un sismo por medio de la Escala de Intensidades.
2. Conocimiento cabal por parte de sus integrantes de los aspectos más importantes sobre los orígenes de los tsunamis y sus efectos

sobre las poblaciones a lo largo de la historia peruana.

3. Conocimiento cabal por parte de sus integrantes del riesgo de tsunamis y los tipos de Períodos Críticos.
  4. Conocimiento cabal por parte de sus integrantes del Plan de Evacuación y Refugio de la Población local.
  5. Conocimiento previo y solución de las dificultades y necesidades que se derivan de una movilización multitudinaria, multitud a la que hay que ofrecer además refugio y socorro por un tiempo que puede ser prolongado.
  6. Difusión e instrucción a nivel poblacional sobre los riesgos de tsunamis en la zona y las medidas destinadas a su protección (Sistema de Alerta y Alarma, Evacuación, Refugios de Emergencia y Refugios Temporales).
  7. Revisión periódica del sistema de comunicación instantánea entre el Organismo principal del Sistema y los organismos locales.
  8. Instalación de un sistema de alarma local, el cual puede consistir en sirenas instaladas en las edificaciones más altas originadas cerca o en la playa, y en otras zonas susceptibles de inundación.
- **Organización.** El Sistema estará constituido por los siguientes organismos:
- . Organismo de alcance nacional, conformado por la Secretaría Ejecutiva del Comité Nacional de Defensa Civil (SECNDC) y la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina (DHNM).
  - . Organismos locales, de proyección zonal, supeditados al anterior; conformados en cada caso por el Comité Local de Defensa Civil y la Capitanía del Puerto u otro representante de la Marina de Guerra.
  - . Brigadas de Defensa Civil, de proyección vecinal, dependientes del Comité Local de Defensa Civil.
- **Funciones Generales.**
- . El Organismo Nacional será el encargado autorizado de recepcionar, evaluar, enviar y cancelar información y mensajes a nivel nacional e internacional. Cuidará mantener el nivel óptimo de las comunicaciones con los Organismos Locales; supervisará el cumplimiento de lo dispuesto en los Planes de Evacuación y Refugio existentes, y encargará la elaboración de similares para las poblaciones que carecen de ellos. Es el vigilante permanente. Autónomo en sus decisiones. Es quien difundirá la alarma a nivel nacional.
  - . Los Organismos Locales. Serán los encargados de recepcionar los mensajes emitidos por el Organismo Nacional, así como informarle de cualquier anomalía. Cuidarán el funcionamiento del Plan de Evacuación de su localidad, para lo cual deberán supervisar periódicamente el estado de las Rutas de Evacuación y el mantenimiento de los Refugios.

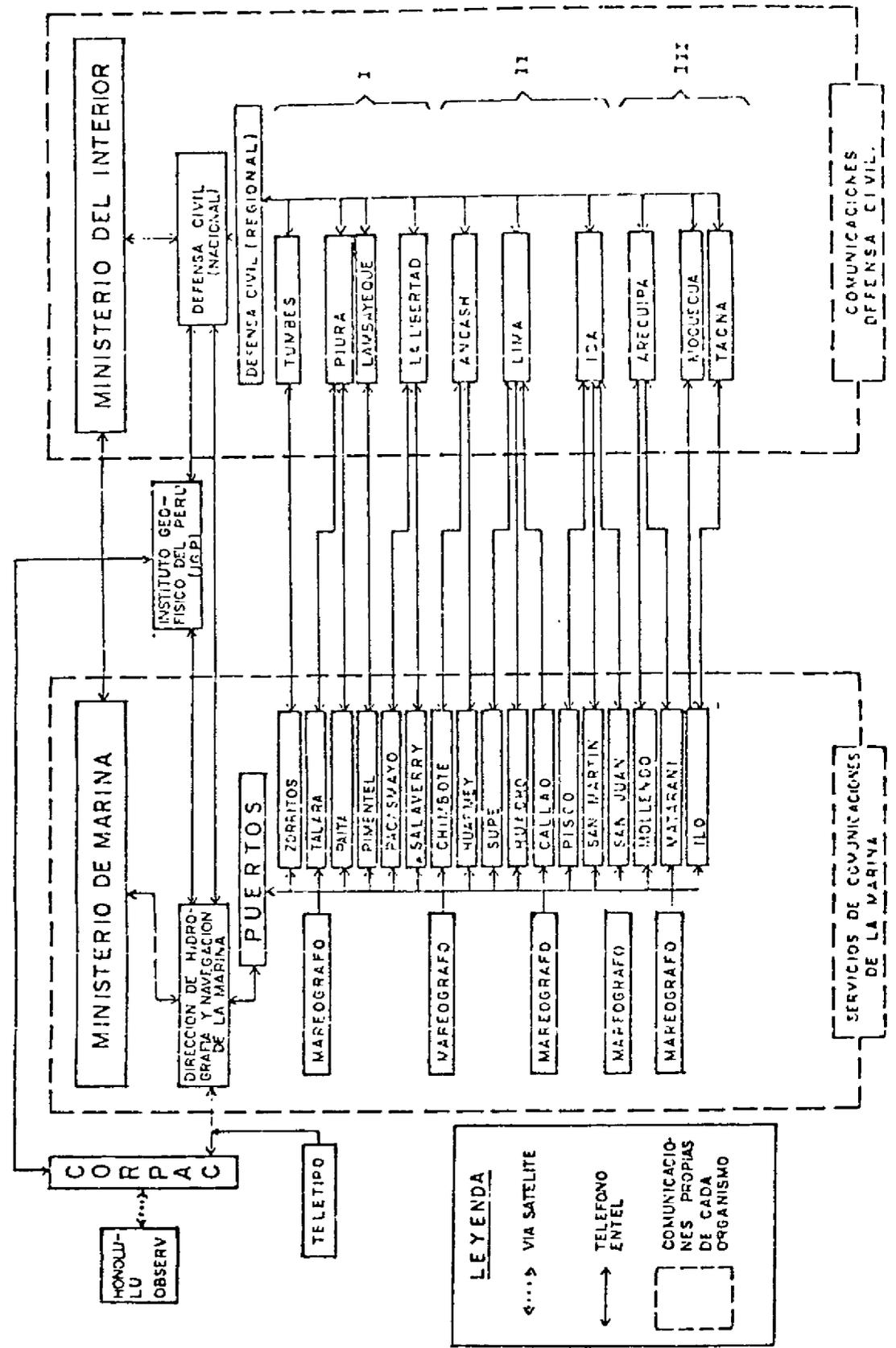
Fig. 22

SISTEMA REGIONAL DE ALERTA CONTRA LOS TSUNAMIS

PERU

SISTEMA DE ALERTA NACIONAL

FASE I



- . Las Brigadas. Son organizaciones pequeñas, de preferencia una por cada manzana de casas, constituidas por los vecinos, y que dependen de Defensa Civil para su instrucción y capacitación en los riesgos de tsunamis y el Plan de Evacuación y Refugio de su localidad, y serán los encargados de ponerlo en marcha.

**- Funcionamiento del Sistema durante un Período Crítico.**

a. Tsunami de Origen Cercano.

- Ocurrido un sismo, los líderes de las Brigadas deberán evaluar rápidamente si el sismo puede o no ser causa de un ataque del mar. Para ello harán uso de la Escala de Intensidades de Mercalli (Modificada) según se señala en el acápite denominado "Períodos Críticos del Sistema".
- Si el resultado de la evaluación es afirmativo, los líderes de las Brigadas iniciarán el Plan de Evacuación de la población amenazada hacia los Refugios de Emergencia y Refugios Temporales.
- Simultáneamente, el Organismo Local difundirá la alarma, en apoyo a la acción de las Brigadas.
- El Organismo Nacional entrará en contacto directo con todos y cada uno de los Organismos Locales.
- El Organismo Local será el único autorizado a cancelar la señal de alarma.

b. Tsunami de Origen Lejano.

- El Organismo Nacional, a través de la DHNM, recibirá el alerta del eventual ataque de tsunami emitido por el SSWWSS. De inmediato comunicará tal información a la SECNDC y a los Organismos Locales.
- De acuerdo a la magnitud del ataque del tsunami que se espera ocurra, los Organismos Nacional y Locales difundirán la alarma en las zonas susceptibles de inundación.
- Al difundirse la señal, las Brigadas pondrán en marcha el Plan de Evacuación de la localidad.

**MEDIDAS GENERALES DE PRECAUCION CONTRA TSUNAMIS DESTINADAS A LA POBLACION DE LIMA METROPOLITANA.**

- Si recibe el aviso de alarma contra tsunamis, trasládese cuanto antes con su familia a un lugar elevado, de por lo menos 10 metros sobre el nivel del mar.
- Si llega la primera ola sísmica marina, que puede ser de altura considerable, no piense que el peligro pasó. Son varias las olas que llegan sucesivamente, con intervalo de 10 a 30 minutos entre ellas. En la mayoría de los casos, la tercera a sexta ola son las más destructivas.

Si el mar se retira anormalmente, o hay una elevación no común de la marea, puede ser un aviso de que se va a producir un tsunami, sobre todo si algún tiempo antes se ha sentido un sismo, leve pero de larga duración, que puede corresponder a un terremoto distante, ubicado en el mar, y que puede originar un tsunami.

- Si tiene una ocasión de seleccionar el lugar de ubicación de su vivienda, industria, etc., procure que se halle en terrenos de más de 6 ó 7 metros sobre el nivel del mar. (Para las costas de Lima Metropolitana. Estas alturas serán mayores para el sur del país a partir de Ica y frente al Dpto. de Piura debido a que las aguas profundas llegan a puntos muy cercanos de las costas. El lugar más peligroso es el vértice de una entrante del mar en forma de U o V.
- En caso de alerta de tsunami causado por un sismo lejano, hay tiempo suficiente para proteger las embarcaciones ancladas en la bahía. Sáquelas de este lugar y llévelas mar adentro, a lugares de aguas profundas. Ahí el efecto del tsunami será mucho menor.

### **EVACUACION DE PUCUSANA**

El distrito de Pucusana está ubicado en el extremo Sur del litoral de la provincia de Lima, a 60 kms. de la capital, en una pequeña bahía en forma de U que se abre hacia el Noroeste. La entrada o boca de la bahía está a unos 2 kms. al Norte, frente al balneario de Naplo, que sí da directamente al océano. La bahía de Pucusana está protegida en el lado Oeste por la Isla Galápagos, que forma con la punta Sur una garganta. En general, fuera de las playas mencionadas, el litoral está formado por acantilados.

Pucusana se asienta sobre una área de pendiente moderada, inclinada E-0, y rodeada de colinas redondeadas de rocas volcánicas. El suelo es predominantemente arenoso. Su población se acerca a los 5,000 habitantes, en su mayoría dedicados a la pesca y actividades afines. En el verano, la población se duplica, y en los fines de semana de esos meses el incremento es aún mayor. Otro sector significativo de la población se dedica al comercio y a la atención de los veraneantes, proporcionándoles hospedaje y/o alimentación en pensiones, hoteles y restaurantes.

En Naplo, asentado contra cerros, la pendiente de la parte central es suave hasta la cota de los 6 metros; luego, se pronuncia.

Para los tipos de construcción que predominan en Pucusana, se puede tomar como típico lo que existe frente al mar, donde el 71% es de ladrillo y/o concreto, 24% de maderá y 5% de adobe. En cambio, en Naplo el 100% es de ladrillo y/o concreto.

Por lo complicado de la batimetría y topografía del área, es muy difícil estimar la altura de ola. En todo caso, Naplo puede recibir directamente el impacto de las olas del tsunami. En cambio, en Pucusana tendrá efectos destructores importantes si el origen del tsunami se ubica al Noroeste, frente a la boca de la bahía. En casos como el de esta localidad, el tsunami puede tener trayectorias complicadas e

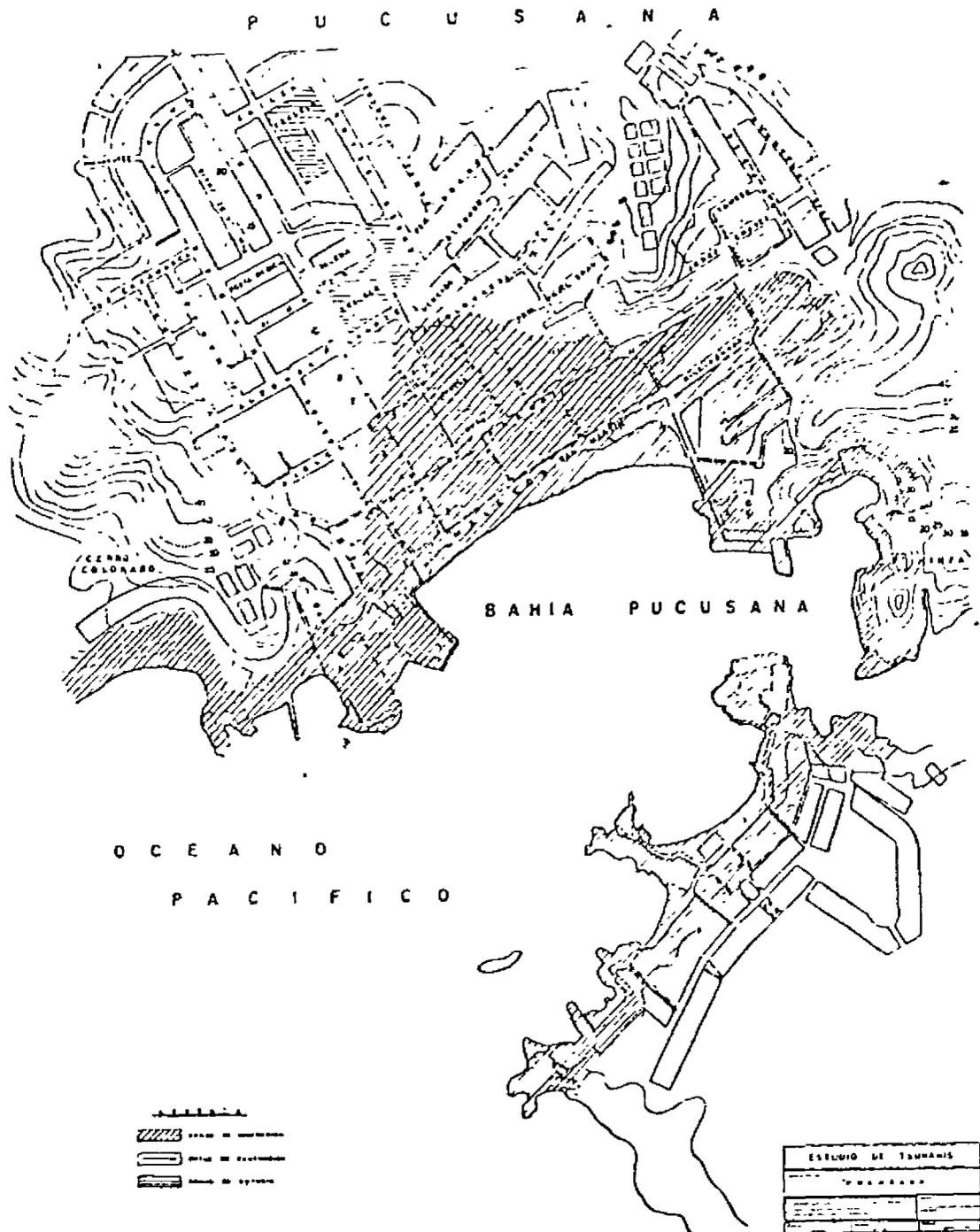


Fig. 23 AREAS INUNDABLES Y ZONAS DE REFUGIO EN PUCUSANA.

impredicibles, pues dependiendo del ángulo con que entra en la bahía puede reflejarse en uno y otro lado, como ocurrió en la bahía de Ofunato, Japón, en 1933.

Haciendo los mejores estimados, se ha considerado altura de ola máxima probable de 7 metros. Se ha considerado también, que las pérdidas por fricción en tierra serían muy pequeñas por el corto camino que recorrerían las olas tanto en Naplo como en Pucusana. De acuerdo a estas consideraciones se ha delimitado el área inundable.

La población que afectaría el tsunami sería el 33%. Para tsunamis cuya altura de ola sea menor a lo estimado como máximo, las construcciones de concreto y/o ladrillo pueden resistir el embate de las olas con daños menores, pero los daños en casas de madera y adobe serán muy importantes. Dado que el suelo es arenoso y la pendiente moderada a fuerte, el mar en su regreso puede alcanzar velocidades altas y causar fuerte erosión del suelo.

Para tsunamis cuya altura de ola fuera la máxima esperada, los daños que cause pueden ser severos, pero la probabilidad de ocurrencia un suceso así es remota.

La evacuación de la población es relativamente simple por la presencia de cerros rodeando la población. La parte alta del poblado está en cotas difícilmente alcanzables por el tsunami, por lo que puede ser utilizada como refugio.

Pucusana tiene servicio telefónico, posta médica y Puesto de la Guardia Civil, que forma parte del Comité Distrital de Defensa Civil.

#### **EVACUACION DE SANTA MARIA**

54 kms. al Sur de Lima se encuentra el Distrito de Santa María, en una amplia bahía abierta directamente hacia el océano. Su cota es accidentada, de elevados acantilados y arrecifes, excepto la zona Norte denominada "La Playuela", que es una playa amplia que se prolonga en un terreno de suave pendiente. La población está asentada en zonas relativamente seguras, sobre los 15 mts. s.n.m.m., excepto un pequeño sector que se ubica en cotas inferiores a los 10 mts. s.n.m.m.

Por ser Santa María un balneario, su población es pequeña durante el invierno. Según el Censo de 1981, esta era de 198 habitantes. En los meses de verano la población se hace varias veces mayor. La población estable se dedica al comercio y a la pesca.

La gran mayoría de las edificaciones en Santa María son construcciones muy recientes, ya que el balneario fue creado entre los años 1958-60. Ellas son de concreto armado y ladrillo, con una arquitectura moderna e incluso sofisticada.

La probable máxima altura de ola en la costa de Santa María es de 5 metros. Observando la batimetría y topografía de la zona es posible afirmar que esta altura de ola no sufrirá incremento por efecto de la forma de la bahía, ya que ésta es muy abierta. Los efectos atenuantes de fricción con el terreno no existen porque no hay terrenos amplios. Únicamente en el Sector Norte se tendrán edificaciones afec

tadas, porque en los sectores Central y Sur de las edificaciones están en cotas elevadas respecto al mar. En el Sector Norte los daños sobre las viviendas a lo largo de la playa pueden minimizarse si se refuerza el muro de 3 mts. de alto que supuestamente las protege. Las instalaciones del Club Esmeralda, sin embargo, están expuestas al ataque directo de las olas.

Las zonas de refugio se encuentran muy cerca ya que la zona inundable está rodeada de zonas elevadas, a las cuales se puede acceder fácilmente a través de las rutas señaladas.

En Santa María se cuenta actualmente con una posta médica que brinda atención restringida durante el invierno y funciona normalmente durante el verano. La población cuenta con servicios de agua potable y desague; tiene una central generadora de energía eléctrica, alumbrado público y privado con redes subterráneas y servicio telefónico. Existe un puesto de la Guardia Civil.

#### EVACUACION DE SAN BARTOLO

San Bartolo se encuentra ubicado a 52 kms. al Sur de Lima, sobre una bahía en forma de U muy abierta que mira directamente al océano. El litoral es muy accidentado, observándose acantilados de alturas superiores a los 20 metros. La población se asienta principalmente en una zona de suave pendiente y cota mayor a los 20 mts. s.n.m.m., aunque la otra parte se ubica cerca a la playa en una franja de 40 a 50 mts. - de ancho.

La población estable de San Bartolo asciende a 2,924 habitantes, y se duplica en los meses de verano. La ocupación principal de los residentes es la pesca y el comercio, en invierno, a lo que se añade la atención de los veraneantes en la temporada de baños. Predominan las construcciones de concreto y ladrillo sobre las de adobe y madera, y la mayoría son de un solo piso.

Se estima que la altura de ola máxima probable sea de 5 metros, la cual no sufrirá incremento por efecto de la forma de la bahía, ya que ésta es una U muy abierta. Sí puede haber incremento, aunque no importante, por el escaso recorrido de la ola desde la línea de costa hasta el poblado bajo y los acantilados. En esta zona inundable, el tsunami causará gran destrucción ya que las edificaciones se encuentran expuestas al ataque directo del mar, siendo muy probable que las construcciones de madera y adobe sean destruídas, e inundadas las de ladrillo y concreto. La población de la zona, que se estima en 520 personas permanentes y otras tantas eventuales en verano, se encuentra expuesta a un alto riesgo por no contar con suficientes rutas de escape hacia las partes altas de la bahía. Por ello, en este estudio se propone la apertura de nuevas vías de evacuación que complementen a las existentes.

San Bartolo no cuenta aún con servicio de agua potable, la que suministra a la población mediante camiones cisterna. Tiene una posta médica de atención permanente, un Puesto de la Guardia Civil, y se enlaza telefónicamente con el resto del país.



## EVACUACION DE PUNTA NEGRA

Punta Negra está situada entre los kilómetros 46 y 51 de la Carretera Panamericana Sur. Es un recto litoral de playas muy amplias, en cuya zona central se aprecia una península pequeña o punta natural que da el nombre al lugar. Al Norte de la punta, donde el terreno tiene una suave pendiente, las viviendas se ubican cerca a la orilla; en cambio, en la zona central donde la topografía es accidentada y en la zona sur la población se asienta en zonas más altas, 8 a 9 mts. sobre el nivel del mar.

Según el Censo de 1981, la población de Punta Negra es de 552 residentes que se dedican a la pesca o al comercio. Esta población prácticamente se duplica en los meses de verano.

Las construcciones tienen una antigüedad de 15 a 20 años. Muchas son de concreto y ladrillo; las otras de adobe y madera. Su altura varía de uno a dos pisos.

La altura de ola máxima probable se estima en 5 metros en la línea costera. No habrá incremento por efecto de bahía ya que se trata de un recto litoral. Más bien, la ola perderá energía por fricción con el terreno, sobre todo en el sector Norte donde, sin embargo, las construcciones están más expuestas. Se estima que los daños aquí serán por inundación, excepto en el Club Social y Deportivo del lugar cuyas instalaciones, por su cercanía a la orilla, están expuestas al ataque directo del tsunami.

Se propone aquí la habilitación de rutas de evacuación que complementen a las ya existentes.

Punta Negra no cuenta con servicio de agua potable. Sí tiene servicio de energía eléctrica y telefónico. Existe una posta médica que atiende diariamente en verano e interdiariamente en invierno. Hay también un Puesto de la Guardia Civil.

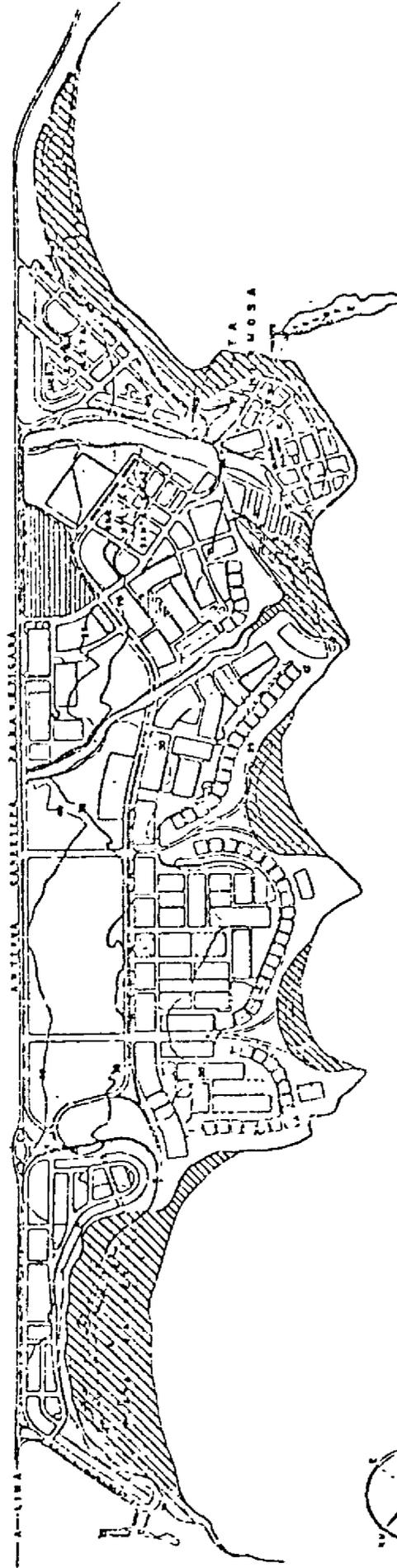
## EVACUACION DE PUNTA HERMOSA

El Distrito de Punta Hermosa está ubicado a 43 kms. al Sur de Lima, a lo largo de un litoral formado por pequeñas playas bordeadas por elevados acantilados. Por esta razón, la mayor parte de la población se asienta en terrenos a más de 25 metros sobre el nivel del mar, y una pequeña parte en las playas. La población estable asciende a 1,010 habitantes que se dedican a la pesca y al comercio; población que se duplica prácticamente en los meses de verano. Las edificaciones son recientes, casi todas de concreto y ladrillo, y pocas de adobe y madera, de uno y dos pisos.

La altura de ola máxima probable en la costa se estima cercana a los 5 metros. Por las características relatadas el área inundable es mínima y se limita a las playas; el mar afectará solamente las edificaciones que en ella se encuentren, pero la población podrá evacuar rápidamente hacia las partes altas gracias a las rutas de escape que existen.

Punta Hermosa cuenta con los servicios de una posta médica y un Puesto de la Guardia Civil.

P U N T A .      H E R M O S A



O C E A N O    P A C I F I C O

- LEYENDA
- TERRENO DE IRREGULARIDAD
  - ZONAS DE EXPANSION
  - TERRENO DE RESERVA

ESTUDIO DE "SUNAMUIS	
"PUNTA HERMOSA"	

Fig. 25

## EVACUACION DE CHORRILLOS-VILLA

El Distrito de Chorrillos está ubicado al Sur de la ciudad de Lima, limitando por el Norte con los Distritos de Barranco y Surco, por el Este con el de San Juan de Miraflores, y por el Sur con el de Villa María del Triunfo. Su población total es de 186,724 habitantes, según el Censo de 1981.

El litoral Norte forma parte de una gran bahía, donde las playas son amplias y rematan al pie de elevados acantilados. El litoral Sur, que es casi recto, es de topografía menos abrupta, conformado por una ancha faja de terreno donde la cota es menor a los 5 mts. s.n.m.m. La población se asienta en las zonas altas y alejadas del mar, excepto un pequeño porcentaje que habita en el litoral Sur, cerca al océano.

La altura de ola máxima probable en la costa se estima cercana a los 5 mts. sin incremento por efecto de bahía. En el litoral Sur es importante la fricción con el terreno, de modo que se espera que el tsunami decrezca rápidamente en altura conforme penetre en tierra. En esta zona se asientan diversos clubes de playa, se está consolidando una urbanización ("La Encantada"), y hay proyectos para dos más (Urbanización "Las Brisas" y Lotización "Playa Verde"). Por lo tanto, la población que sería afectada en un evento próximo es muy poca, pero puede potencialmente aumentar conforme se desarrollen los proyectos mencionados.

Se recomienda que las zonas de refugio estén sobre la cota de los 15 mts. s.n.m.m.; por lo tanto la población deberá evacuar hacia la Urb. San Juan Bautista de Villa, o a la Urb. Villa Marina, o a la Urb. Las Delicias de Villa. Actualmente no existe un acceso directo hacia esta última que es la más cercana a la zona inundable. Asimismo no existen rutas de evacuación directas desde "La Encantada" hacia las zonas de refugio. Por lo demás, las filtraciones de agua han casi destruido un apreciable tramo de la antigua Carretera Panamericana que corre paralela a la zona inundable y fuera de ella. Todas estas deficiencias deben ser subsanadas.

En lo que respecta al sector costero del Distrito de Villa María del Triunfo, éste es un largo litoral donde un terreno arenoso de suave pendiente avanza 600 metros desde la orilla y remata en elevados cerros de arena. Son pocas las viviendas en esta zona, más bien dedicada a la recreación y donde proliferan las granjas avícolas. Existe también una fábrica de ladrillos, y la refinería de Conchán de Petróleos del Perú.

La altura de ola estimada es de 5 metros, y en la delimitación de la franja inundable se han considerado los efectos de fricción con el terreno. Se observa que algunos sectores de la Carretera Panamericana Sur están dentro de la zona afectada por el tsunami, lo que puede significar interrupción en el transporte. Se recomienda que se tomen las medidas necesarias para proteger las instalaciones de la refinería que puedan ser afectadas por el mar.

La única zona de refugio para este sector es el cerro de arena que lo limita.

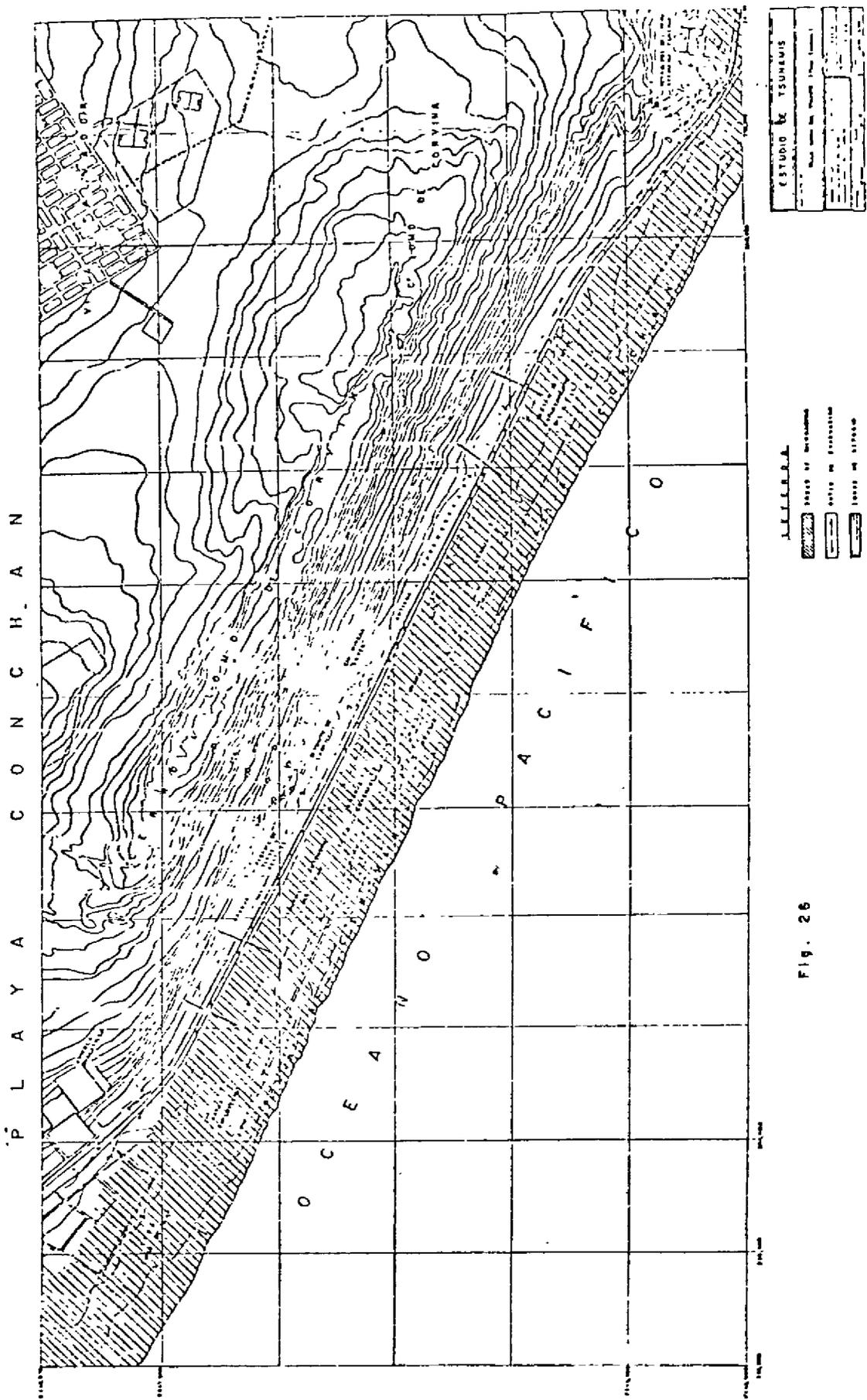


Fig. 26

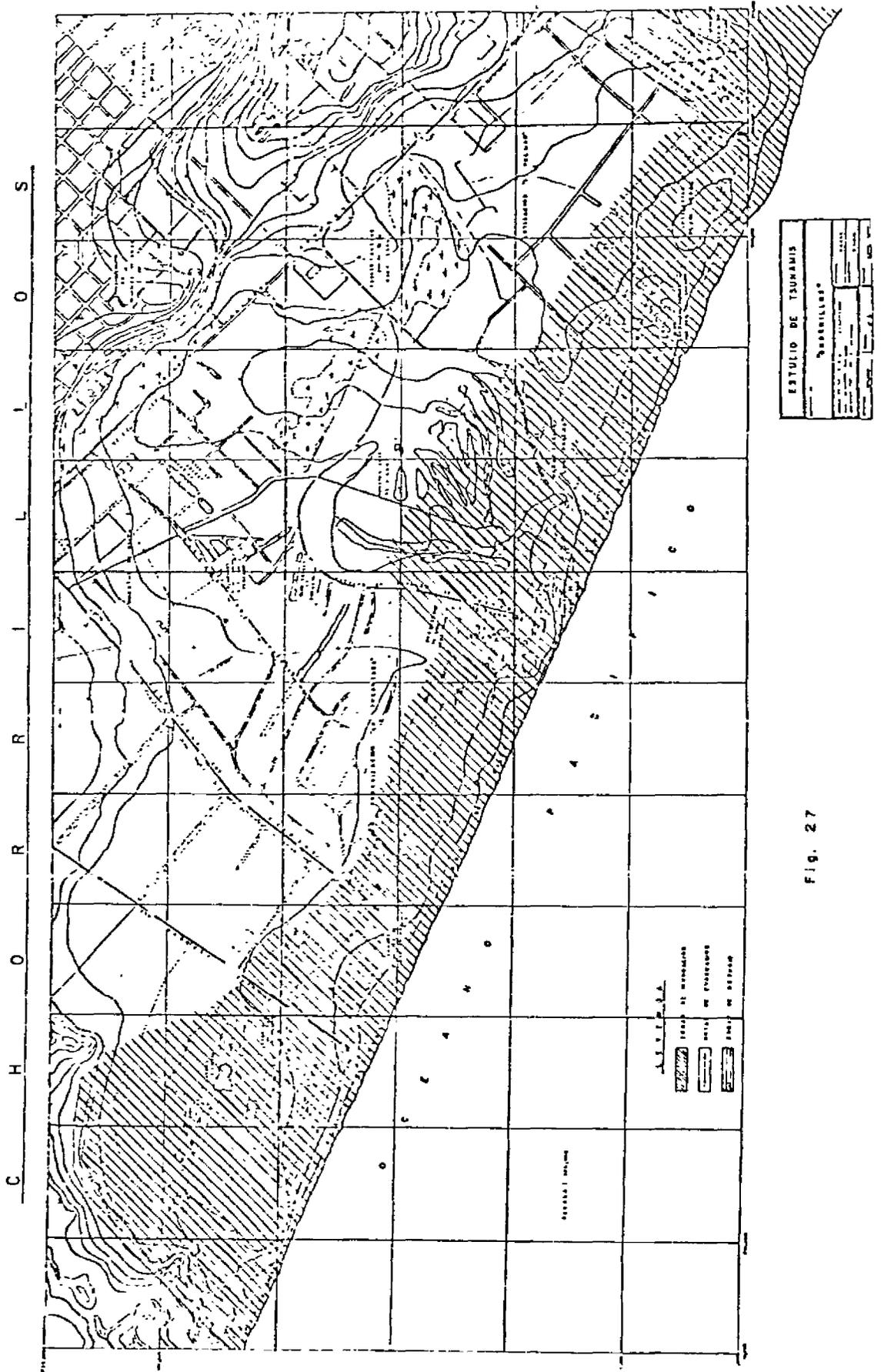


Fig. 27

## EVACUACION DE LA PUNTA-CALLAO

La provincia Constitucional del Callao está limitada políticamente por el Norte por el río Chillón, por el Este por las cumbres de los cerros Marqués, La Regla y las haciendas Maranga, Aramburú y Conde Torres; y por el Oeste y el Sur por el Océano Pacífico. Comprende los Distritos de La Punta, Callao, Bellavista, La Perla, Carmen de La Legua-Reynoso y Ventanilla. Su población total es, según el Censo de 1981, de 446,730 habitantes.

Topográficamente, La Punta es una península de unos 2 kms. de largo, que en su parte más estrecha tiene 210 metros entre orillas. Su cota asciende suavemente desde 1.0 mts. en la periferia hasta los 3 mts. en las inmediaciones del Castillo Real Felipe. Frente a su extremo y separada por 4 kms. de aguas poco profundas se encuentra la isla San Lorenzo.

El Castillo Real Felipe se alza en un pequeño promontorio, la cota más elevada dentro de la zona que tiene en promedio de 2.8 a 3 mts. El terreno sigue ascendiendo suavemente hasta los 5 mts. cerca del Mercado Central, y luego con pendiente más acentuada hasta los 10 mts. en los cruces de la Avenida República de Panamá con Buenos Aires y Saénz Peña. Desde el extremo más alejado de La Punta hasta los cruces mencionados hay aproximadamente 4.5 kms.

En La Punta se distinguen dos riberas: La Norte llamada Cantolao donde el mar es tranquilo, y la Sur llamada Mar Brava justamente por la braveza del mar. En esta zona existe un gran rompeolas construido para evitar la entrada del mar que periódicamente inundaba las casas de esta ribera. La población, según el Censo, es de 6,355 personas, - de las cuales 38% son menores de 15 años, 50% están entre los 15 y 50 años, y 12% son mayores a esa edad. En cuanto a las construcciones, 53% son de material noble (ladrillo y/o concreto), 47% de adobe o quincha o madera. Del total, 80% se dedican a vivienda y el resto sirve como centros de educación (Escuela Naval, Universidad Técnica del Callao, - Escuela Superior de Guerra, 5 colegios) o como sede de numerosos centros institucionales recreativos y deportivos, servicios, etc. Frente a Cantolao anclan sin número de botes y pequeños yates.

Chucuito se llama la zona de la península más cercana a la costa en sí, entre La Punta y el Real Felipe. Su cota promedio es de 3 mts. y sus dos playas conservan las mismas características descritas aunque cambian de nombre: Chucuito, la playa Norte, y Carpayo la Sur. El mar suele invadir en ocasiones de altas mareas por la calle Estados Unidos, situada entre la Gran Unidad Escolar Dos de Mayo y los astilleros Maggiolo, muy cerca al Real Felipe, pasando las defensas de 4 mts. s.n.m.m.

La población de Chucuito es de 3,080 habitantes, que en relación de edades guardan las mismas proporciones de La Punta. Las construcciones son 50% de material noble, y 50% de adobe, quincha o madera, generalmente en mal estado. Aunque un gran porcentaje se dedica a vivienda, Chucuito alberga a la Escuela de Marineros Mercantes, el Instituto del Mar, la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina, los Servicios de Transporte Terrestre de la Marina, dos centros educativos, la sede de la Corporación Peruana de Vapores, los astilleros mencionados, amén de otros servicios.

A partir del Real Felipe, el Callao presenta tres zonas claramente diferenciadas. Una, central, a lo largo de la Avenida Saénz Peña, de carácter comercial y de servicio; alberga Bancos, Agencias de Aduana, Cines y Teatros, Coliseos, Centros Institucionales y 6 colegios. Sus edificaciones son 66% de adobe, quincha o madera, y 34% de ladrillo y/o concreto. La segunda zona, al Sur de la anterior, donde predominan las construcciones de uno y dos pisos dedicados a vivienda, en igual proporción en cuanto a uno de materiales de construcción se refiere; tugurizada. En su ribera existen defensas levantadas con acumulación de desmonte. En esta zona funcionan 9 colegios, el Instituto Nacional de Rehabilitación, la Cárcel Pública. La tercera zona está al Norte de las anteriores y limita con la ribera Norte; comprende la parte más antigua del Callao, aledaña al Real Felipe, formada por calles estrechas y viviendas muy antiguas y pintorescas (algunas de sus calles son empedradas o adoquinadas). Conforme se avanza hacia el Norte, las edificaciones mejoran en calidad, aunque en el límite con la zona industrial existen unos tugurios de madera, esteras y otros materiales similares. A lo largo de esta tercera zona funcionan el Palacio de Justicia, la Central de la Policía de Investigaciones del Callao, la Dirección de Aduanas, el Museo Naval, la Capitanía, Bancos, una Fábrica de Cerveza, un Molino, el Servicio Industrial de la Marina, la Planta Shell, la Mobil Oil, la Texaco; 14 colegios y un Asilo de Ancianos. Además, la cruza la línea férrea Lima-Callao, y en la ribera se asientan el Terminal Marítimo y el Pesquero.

La altura de ola máxima probable estimada es de 6 a 7 metros en la línea de costa, y el área inundable se ha delimitado ateniéndose a los relatos históricos del tsunami de 1746, que ha sido el mayor y el más destructivo. De esta manera, la zona inundable abarca La Punta, Chucuito, y parte del Callao hasta el límite con el Distrito de Bellavista, o sea hasta las Avenidas Contralmirante Mora, República de Panamá y la calle Vigil.

Dado el escaso tiempo (20 a 30 minutos) que dispondrían los pobladores de La Punta y Chucuito para evacuar en caso de un tsunami de origen cercano, y dadas las características topográficas de la zona, ha sido necesario señalar algunos inmuebles cercanos que reúnen condiciones para funcionar como Refugios de Emergencia. Estos refugios servirán sólo a la población que no disponiendo de vehículos deba evacuar a pie, considerando que la distancia entre La Punta y el límite de la zona crítica o inundable es aproximadamente 3.8 kms. Dichos refugios son: el edificio de la Corporación Peruana de Vapores (6 años de antigüedad, 12 pisos sobre el terreno, diseñado sísmicamente y concebido para soportar ataque de un tsunami; se levanta en la parte más estrecha de la península, entre La Punta y Chucuito, y se calcula podrá albergar 3,000 personas casi el 50% de la población de La Punta, y el 33% de La Punta y Chucuito juntas; requiere, sin embargo, algunas mejoras); el edificio del Banco de la Nación de La Punta, sito en la esquina de la Avenida Grau y la calle Arrieta (15 años de antigüedad, 8 pisos y azotea; funciona como vivienda y se estima puede albergar 700 personas contando con la colaboración de los propietarios de los departamentos; requiere mejoras, principalmente en la escalera que conduce a los pisos superiores). Se piensa que con adecuada coordinación de autoridades, algunos edificios de la Escuela Naval de La Punta pueden servir de refugios de emergencia.



Otro problema de evacuación se presenta en la zona más antigua del Callao, por la estrechez de las calles y el mal estado de conservación de las viviendas. Para los pobladores de esta zona y aledañas, se señala como refugio de emergencia al Castillo Real Felipe. Este, construido entre 1746 y 1774, se caracteriza por sus murallas almenadas de gruesa plataforma, cuya sección típica consta de dos muros paralelos - de sección trapezoidal de ladrillo, de 3 mts. de base y 2 mts. de coordinación; la cimentación se supone muy profunda pues el Castillo estuvo rodeado por un foso de 2.5 mts. de profundidad. El relleno de los muros es de tierra compactada, y las murallas están revestidas de piedra. La plataforma o camino de la ronda, tiene casi 18 mts. de ancho y su nivel promedio es de 8 mts. sobre el nivel del mar. El acceso a ellas es por rampas. El Castillo tiene dos puertas, de las cuales sólo una está en uso, la que dá hacia la Avenida Saénz Peña. Se ha escogido al Real Felipe como refugio de emergencia porque la historia señala que fue edificado como consecuencia de la destrucción de las murallas del Callao por el tsunami de 1746, y quien lo diseñó propuso también el traslado de la ciudad a lo que hoy es Bellavista. Cabe pensar que el autor del proyecto, quien visitó la zona del desastre al día siguiente de ocurrido el maremoto, tomó en cuenta lo que vió al concebir el Castillo. Por lo demás, durante el maremoto 22 hombres salvaron la vida aferrados a la muralla del Fuerte Santa Cruz, y eso lleva a considerar como la zona más segura del Castillo aquella correspondiente a la plataforma Sur, entre el Baluarte San José y el San Felipe, que corresponde a la ubicación de las antiguas murallas que no fueron arrasadas. La plataforma mencionada comprende la edificación conocida como El Caballero, que posee dos niveles, el último a más de 10 mts. s.n.m.m. y con una área capaz de albergar unas 1,000 personas.

Otros refugios de emergencia son: el edificio ubicado en la primera cuadra de la Avenida Saénz Peña, donde funcionará el Banco de Desarrollo de la Construcción; y el ubicado en la séptima cuadra de la Avenida 2 de Mayo. Ambos son de diseño sismorresistente, tienen 9 pisos y están en zonas protegidas del ataque directo del tsunami. Se calcula que cada uno puede albergar hasta 1,000 personas.

Para la evacuación de los habitantes de la zona crítica, se ha pensado en dos tipos de vías: peatonales y vehiculares. Desde La Punta parten una vía vehicular y otra peatonal. La primera comienza en la Avenida Grau, empalmando con la Avenida Buenos Aires a través de la Avenida Progreso, y llega hasta la Avenida Colonial. La segunda la forman los jirones Bolognesí y Gamarra; vía que pasa por el Edificio CPV y llega hasta el Real Felipe. Cabe hacer notar que el buen funcionamiento del Plan de Evacuación y el uso del Castillo como refugio, dependen de la puesta en uso de la puerta que dá al jirón Gamarra, hoy clausurada.

Los habitantes del Callao, zona Sur, dispondrán de una vía vehicular adicional constituida por la Avenida José Galvéz, y dos vías peatonales, jirones Ancash y Apurímac. La zona central evacuará peatonalmente a través de la Avenida Saénz Peña; mientras que la zona Norte usará las Avenidas Guardia Chalaca y Argentina como vías vehiculares y peatonales al mismo tiempo, pero dividiendo el flujo de personas y vehículos en los carriles que posee cada una.

Con excepción de la Avenida Argentina, que puede ser usada para e

Fig. 30 VIAS PRINCIPALES DE EVACUACION DEL CALLAO .

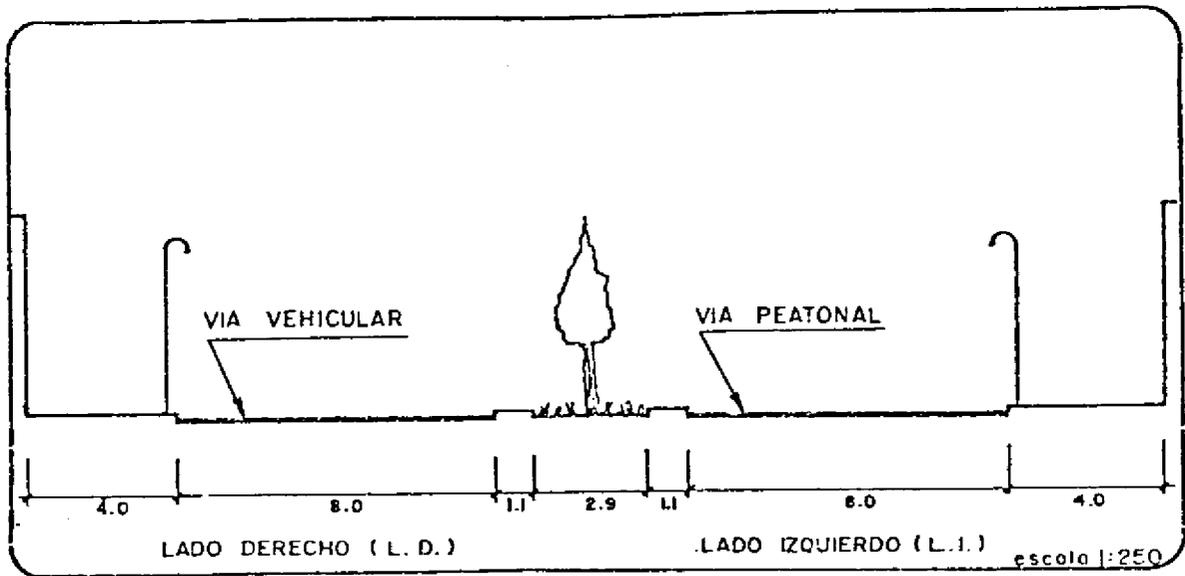


fig.30a. Corte transversal de la Av. Buenos Aires (Entre las cuadras 01-08)

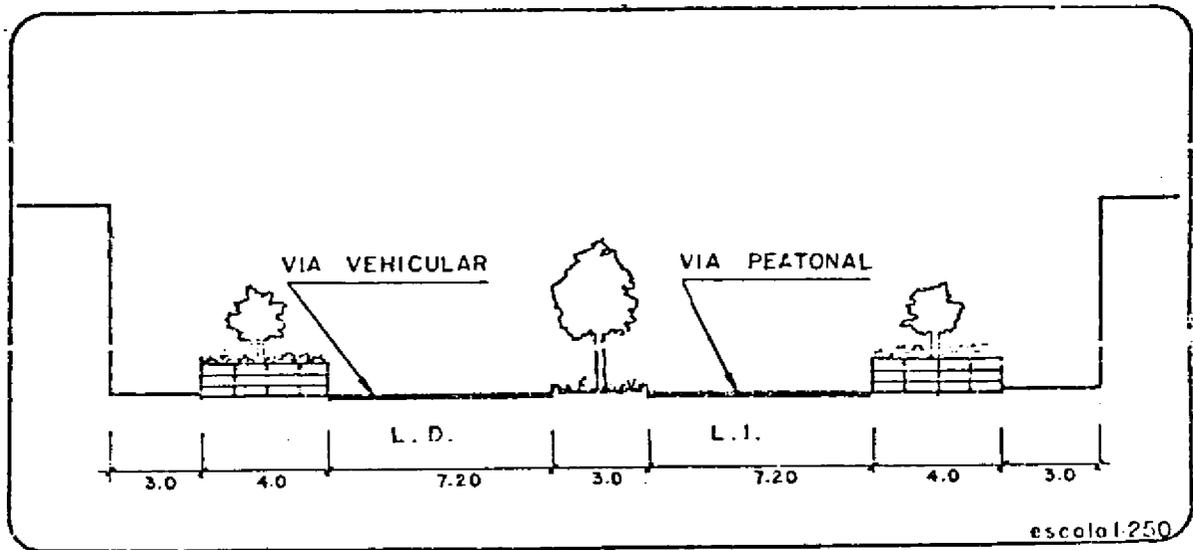


fig.30b. Corte transversal de la Av. Guardia Chalaca



Fig. 29

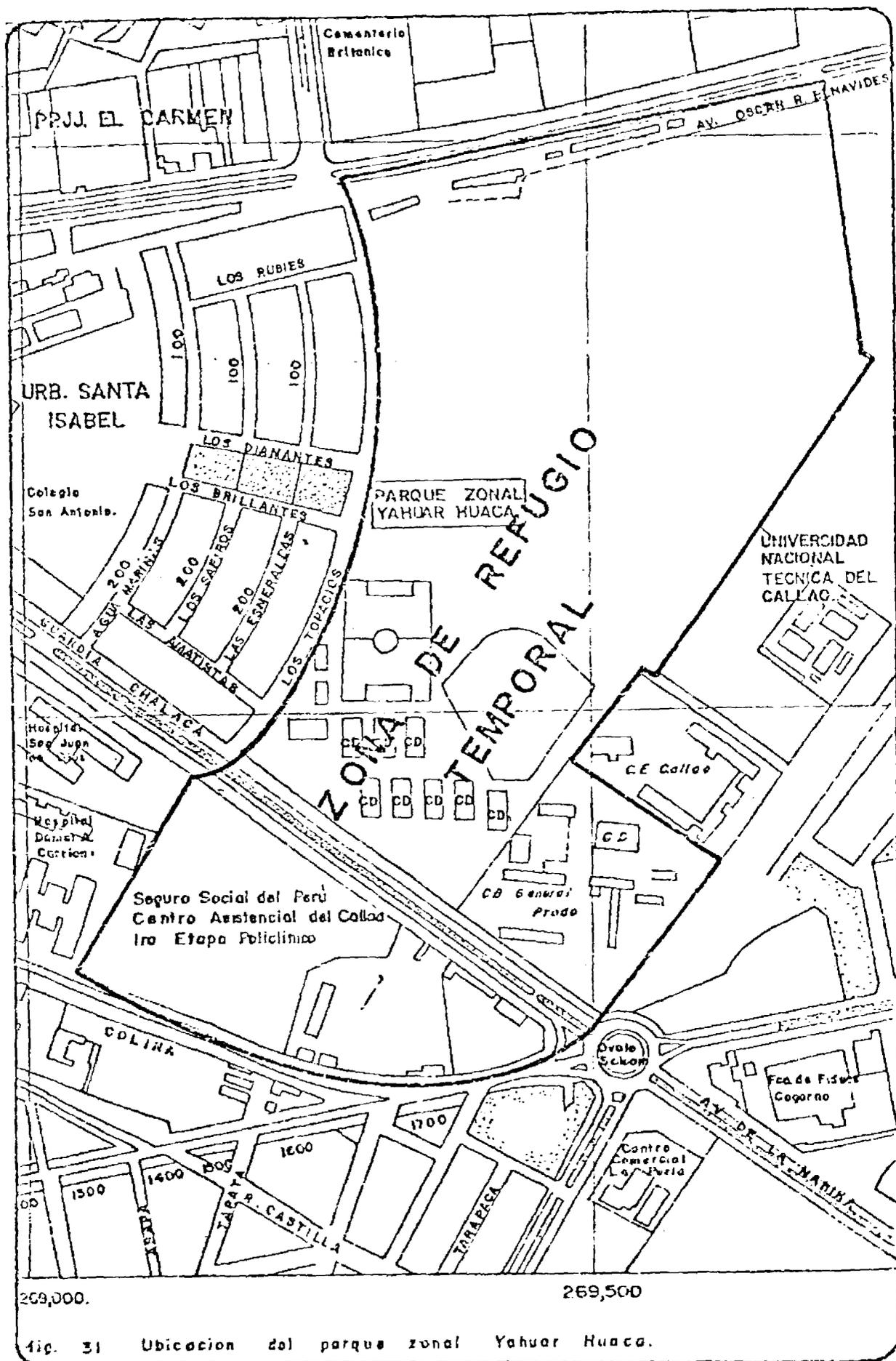


Fig. 31 Ubicación del parque zonal Yahuar Huaca.

vacuar directamente hacia Lima, el resto de vías conducen a través del Parque Zonal Yahuar Huaca, designado como Refugio Temporal de la población damnificada.

Este refugio se encuentra entre las cuadras 21 y 22 de la Avenida Guardia Chalaca, en Bellavista. Tiene una superficie de 21 Hectáreas, terreno de moderada pendiente que asciende de este a oeste, desde los 20 hasta los 24 metros s.n.m.m. Colinda con la Avenida Colonial, la calle Los Topacios y el Colegio General Prado. Ha sido escogido también por estar cerca a 3 centros hospitalarios: Hospital Daniel A. Carrión, Hospital San Juan de Dios, y el Centro Asistencial del Callao, - propiedad del Seguro Social del Perú. Otra ventaja adicional la constituye el que el Colegio General Prado haya sido adecuadamente reforzado contra sismos, por lo que puede ser usado también como refugio.

Actualmente el parque está dedicado en parte a servir como área recreativa deportiva, con ciertas instalaciones sanitarias y un pozo de agua que, sin embargo, no es utilizado para su servicio. En cuanto a energía eléctrica, el parque carece de ella, a pesar de que dentro de él existe una sub-estación que presta servicios a la vecindad.

Si el parque es implementado con los servicios de atención necesarios, estará en capacidad de albergar cerca de 22,000 damnificados.

#### **EVACUACION DE LA COSTA AL NORTE DEL CALLAO (BOCANA DEL RIO RIMAC-LA PAMPILLA)**

El litoral mencionado comprende unos 13 kms. de costa abierta. La Pampilla, en el extremo Norte, es una zona de altos cerros de 100 y más metros de altura que llegan al mar. De ahí hacia el Sur, en una longitud de 5.5 kms. las estribaciones se retiran permitiendo una franja costera de 600 a 800 metros de ancho, franja que es cruzada por el río Chillón. Con el cerro Oquendo desaparecen las estribaciones y en 2 kms. de costa la única prominencia es el cerro La Regla, mientras que el terreno presenta una moderada pendiente que se suaviza conforme se aproxima al cauce del Rímac. El suelo de esta zona es arenoso, fino a mediano, con partículas finas de limo orgánico no plástico. La napa freática es alta, a pocos metros del perfil natural del terreno.

Es característica de la ribera la presencia de grandes cantidades de guijarros o cantos rodados de diverso tamaño.

En cuanto a usos del terreno, la margen Sur del Rímac la reserva la Marina para su establecimiento penal. Desde la margen Norte y 2.5 kms. más en esta dirección se usan como tierras de cultivo, asentándose en las riberas 3 pueblos jóvenes o barriadas y una fábrica pesquera. Hacia el Este, distante 2 kms. de la orilla y a cota superior a los 15 metros sobre el nivel del mar, se encuentra la pista de vuelo del Aeropuerto Internacional Lima-Callao. Al Norte de la zona descrita el terreno es utilizado en gran parte como asentamiento de diversas industrias, observándose también grandes claros que sirven como tierra de cultivo o son simplemente eriazos. En el límite Norte; la refinería La Pampilla se ubica sobre una pronunciada pendiente.

Existe una población fija y una flotante. La primera constituida por los habitantes de las barriadas; la segunda la forman los trabaja-

dores de las industrias. Prácticamente es una población dispersa pues se reparte en pequeños grupos a lo largo de la costa, por lo que no es posible estimar el total.

La inspección de la ribera donde moran los pueblos jóvenes, revela precariedad de condiciones; las viviendas están construidas con madera, cartón y otros materiales ligeros.

En cuanto a las instalaciones industriales, ellas son de diversa categoría, edad y tipo: construcciones de concreto armado, ladrillo y metálicas. El costo de las mismas y de las instalaciones interiores, maquinarias, insumos y productos almacenados es muy alto.

A lo largo del litoral y paralela a la costa corre la carretera - que une Callao con Ventanilla, flanqueada por postes de energía eléctrica, así como la red telefónica. La carretera está a más de 500 metros de la playa.

Se estima que la altura de ola en la costa será de 3 a 4 metros. La zona que inundará el tsunami tiene un ancho máximo de 500 metros donde el terreno tiene suave pendiente, y mínimo de 100 donde la pendiente es moderada a fuerte; la inundación se incrementará en profundidad en los terrenos aledaños a las desembocaduras de los ríos Chillón y Rímac.

La inundación afectará a los Pueblos de las riberas y posiblemente los destruirá. Afectará parcialmente a la mayoría de las fábricas cercanas a la playa, y con mayor énfasis a aquellas construidas a niveles inferiores al perfil natural del terreno.

La evacuación de la población es muy simple porque el acceso a la zona no inundable se hace directamente a través de los terrenos y las pistas y veredas que existen. Puede asumirse como zona segura la comprendida desde los 100 metros antes de la carretera Callao-Ventanilla.

Los únicos servicios asistenciales son los que proporcionan las fábricas a sus trabajadores.

#### **EVACUACION DE ANCON.**

Treintaicinco kilómetros al Norte de Lima se encuentra el Distrito de Ancón. Topográficamente es una amplia bahía que mira también hacia el Norte, flanqueada por cerros al Este y al Oeste, y al centro un terreno arenoso de moderada pendiente. El balneario se recuesta sobre el lado Oeste y tiene 3 playas: la más extrema, pequeña y medianamente profunda; la segunda es una angosta franja; y la tercera que es muy amplia y abarca el vértice de la bahía.

En este vértice, lo que en un principio fueron rancherías se convirtieron, desde 20 y más años atrás, en edificios de 9 pisos levantados uno al lado del otro y frente a la tranquila mar, con arquitectura muy característica: terrazas y ventanales. Al medio dejaron un claro, donde el antiguo muelle de pescadores se prolonga en el pequeño parque Noriega y, cruzando el malecón, la Plaza Talleri, acogedor paseo que lleva hasta la Iglesia, 400 metros desde la orilla. Tras los edificios, una parte del poblado conserva su antiguo ambiente, con viviendas de

uno y dos pisos, algunas de madera; donde las calles son peatonales o cruzadas por bicicletas. Al lado Este de la plaza las vías son también vehiculares y conectan la Comisaría, el Cine, el Mercado, el Centro Asistencial, el Museo y Biblioteca, los Colegios y el Estadio, con las nuevas urbanizaciones y la Autopista Lima-Ancón o la carretera Panamericana Norte.

Con el tiempo y el auge, el balneario creció hacia el Oeste. El actual frente playero lo constituyen altos edificios de departamentos, que se conectan peatonalmente por medio del malecón, y con la parte alta por veredas y escaleras practicadas en el cerro. Sobre él corre una pista que lleva hasta la playa Oeste, en la cual están el Yatch Club y una línea de edificios de 5 y 6 pisos, la mayoría con sótano, levantados a unos 70 metros de la orilla, y parcialmente defendidos por un muro de 1 metro de alto. Como la playa es pequeña, las nuevas residencias tienden a ubicarse en la falda del cerro.

Ancón comienza a crecer también hacia el Este, superada la barrera que significaba la Base Aérea en el centro de la bahía. En esta zona, nuevas urbanizaciones se extienden desde la playa hasta la parte alta del terreno.

Según el Censo, habitan en Ancón 8,610 residentes, cifra que seguramente se duplica en los meses de verano. Un gran porcentaje de residentes ocupa la parte alta del poblado.

La altura de ola del tsunami se estima ligeramente inferior a los 3.5 mts. por las razones expuestas en otra parte de este informe. Se estima asimismo que la inundación se producirá más como una alta marea que como consecuencia de un bravo oleaje; por lo tanto no habrá mayor daño por ataque directo, salvo los causados por impacto de los botes - de pequeños yates que el mar arrastre. Sin duda, el mar inundará los sótanos de los edificios de la playa Oeste. Por otro lado, si, como es probable, el tsunami se produce como consecuencia de un fuerte sismo, los edificios de la playa pueden verse afectados por el movimiento; es más, muchos de ellos, especialmente los más antiguos, muestran daños en los muros y en los bordes de las losas por impacto de uno contra otro en sismos anteriores. Se hace notar que estas edificaciones, a juzgar por su antigüedad, no han soportado terremotos de magnitud mayor a 7.5 Richter.

Si los edificios no fueran seriamente dañados, sus pisos superiores servirían de refugio a sus ocupantes. En todo caso, la evacuación de los habitantes de la playa podrá efectuarse fácilmente a través de las veredas y pasajes que existen y que conducen a la parte alta. La mayor inundación se dará en la parte central, sobre la Plaza Talleri, pero también aquí la evacuación es rápida.

Si fuera necesario, podrá utilizarse el Estadio como refugio temporal de la población damnificada.

## N O T A

EN ESTE CAPITULO SE HAN INCLUIDO A MANERA DE EJEMPLOS ILUSTRATIVOS, LOS PLANOS DE ALGUNOS BALNEARIOS ESTUDIADOS, PERO OBLIGADOS POR EL TIPO DE PUBLICACION, A ESCALA TAN REDUCIDA QUE SE PIERDEN MUCHOS DETALLES.

EL AUTOR POSEE LOS PLANOS ORIGINALES A ESCALA MUCHO MAYOR DE TODAS LAS LOCALIDADES ESTUDIADAS ENTRE PUCUSANA Y ANCON DONDE SE PUEDEN OBSERVAR CLARAMENTE: LAS ZONAS INUNDABLES, LAS RUTAS DE ESCAPE Y LAS ZONAS DE REFUGIO. ESTOS PLANOS ESTAN A DISPOSICION DE LOS COMITES DISTRITALES QUE SÉ FORMEN EN CADA LOCALIDAD, ASI COMO DEL INSTITUTO NACIONAL DE DESARROLLO URBANO. IGUALMENTE ESTA A DISPOSICION DE ELLOS PARA PODERLOS ASESORAR EN SUS PLANES DE PREVENCION QUE DESARROLLEN.

POSTERIORMENTE UNA VEZ QUE UNDRU ENVIE OFICIALMENTE LOS DOCUMENTOS AL GOBIERNO PERUANO, LA SECRETARIA EJECUTIVA DEL COMITE NACIONAL DE DEFENSA CIVIL SERA DEPOSITARIO DE LOS PLANOS MENCIONADOS, DE DONDE PODRAN SER OBTENIDOS.

## CAPITULO V

### PROTECCION DE LAS OBRAS CIVILES

En este capítulo se tipifican los daños que los tsunamis causan a las Obras Civiles, en base a las experiencias obtenidas en diversos lugares del Pacífico. Se presentan las medidas generales de protección de edificaciones de zonas inundables por maremotos, y de protección de obras portuarias.

En la segunda parte, el autor reseña sus observaciones de las obras de defensa contra tsunamis existentes en la región de Sanriku, Japón, durante su visita a estas costas en 1981.

#### DAÑOS CAUSADOS POR TSUNAMIS EN LAS COSTAS

Ya que del presente siglo prácticamente no se tiene un registro peruano de estructuras dañadas por tsunamis, las experiencias de Japón, Alaska, Hawai y Chile sirven para tipificar los daños que un tsunami puede causar, en los siguientes:

- **Daños causados por el frente del tsunami.** Los daños son causados por el momento de flujo del tsunami, es decir la masa de agua impulsada hacia adelante, al impactar con fuerza contra edificaciones, muelles, embarcaciones, etc., siendo más graves los efectos en los vértices de las bahías en forma de V cuando son atacadas por tsunamis de período corto.

La destrucción puede incrementarse si el tsunami arrastra troncos, embarcaciones y otros objetos flotantes. Aún embarcaciones de gran tamaño pueden ser llevadas tierra adentro, como ocurrió con la nave norteamericana USA-Wateree, la cual quedó varada a 400 metros de la orilla por efecto del tsunami de Arica de 1868.

- **Daños por inundación.** En este caso, el flujo arrastra gran cantidad de material fino en suspensión. El barro y la arena pueden malograr maquinarias, tierras de cultivo, enterrar canales, etc.
- **Daños por socavamiento.** Las estructuras portuarias son las más sensibles a este tipo de daño, pues las ondas del tsunami remueven con fuerza el fondo oceánico pudiendo causar el socavamiento de tablaestacas, cimentación de edificios y otras estructuras, y depositar el material removido en canales, etc., enterrándolos.

En consecuencia, las obras civiles que tienen mayor probabilidad de ser dañadas por un tsunami son las Edificaciones y las Obras Portuarias. Por esta razón es necesario protegerlas siguiendo las siguientes recomendaciones:

#### RECOMENDACIONES PARA EDIFICACIONES

- Las edificaciones deben ser de concreto armado, albañilería reforzada o acero, unidas firmemente a su cimentación.

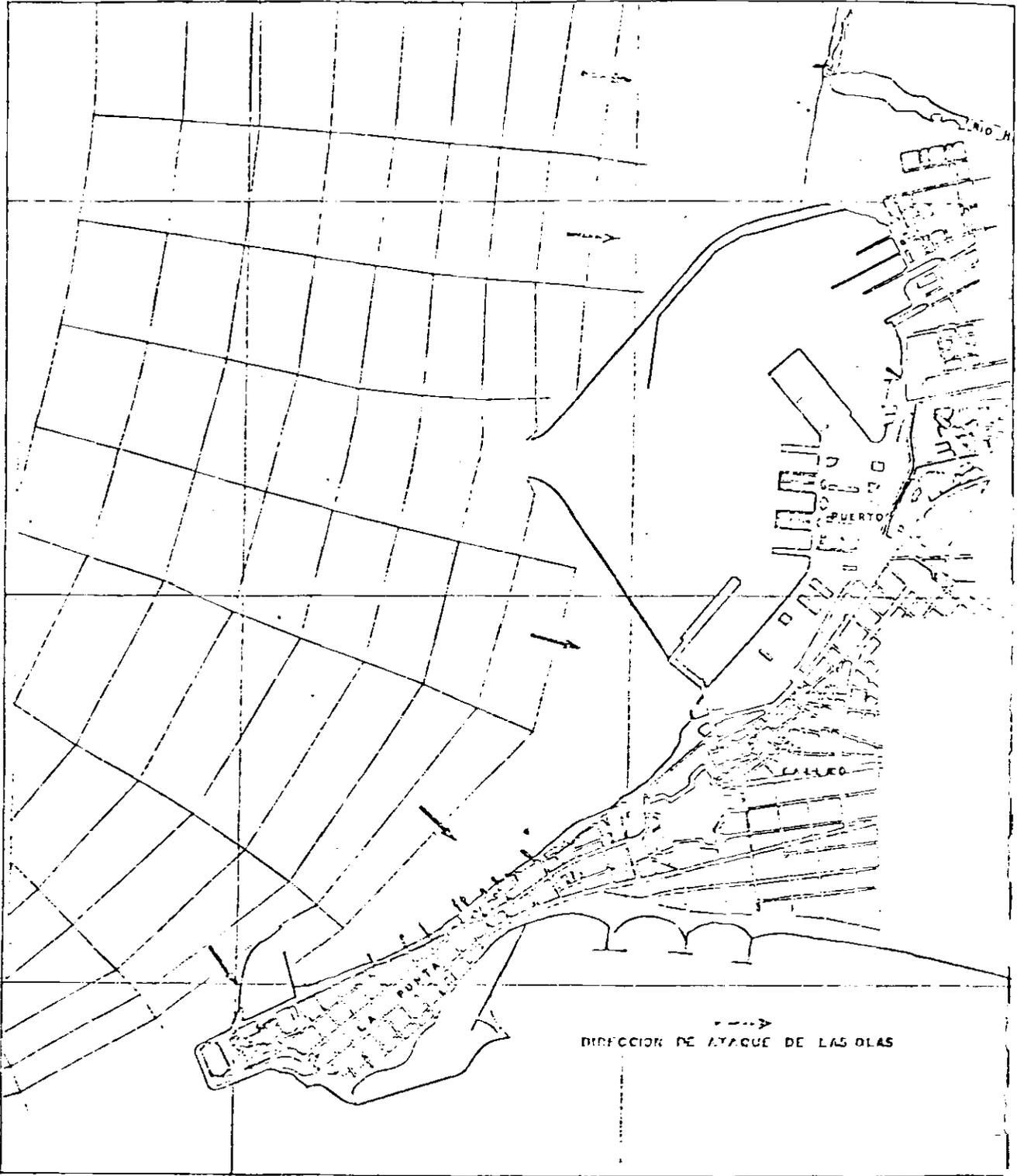


Fig. 32a DIRECCION DE ATAQUE DE LAS OLAS EN LA PUNTA - CALLAO POR SU LADO NORTE .

- Deben presentar el menor frente posible a la dirección prevista de ataque de las olas. No siempre es obvia la dirección de ataque. En el caso de La Punta, Isla San Lorenzo esta ha sido determinada trazando las curvas de refracción tal como se puede observar en la figura 32a.
- Es deseable la incorporación de muros de corte, orientados de tal manera que ayuden a la edificación a soportar el empuje del agua.
- Las edificaciones ubicadas en la "primera línea" del ataque del tsu-nami sufrirán los impactos más violentos. Por lo tanto deben ser diseñadas teniendo en cuenta este factor. En edificaciones de varios pisos da buen resultado dejar el primero como área libre, para par-ques de automóviles, jardines, etc., sirviendo los pisos superiores de refugio de emergencia.
- Para prevenir la socavación es conveniente una cimentación profunda y proteger el pie de la edificación con una losa de concreto que re-mate en mandil, colocando ahí grandes piedras o bloques de concreto enterrados.

#### RECOMENDACIONES PARA OBRAS PORTUARIAS.

- Para optimizar su estabilidad, los rompeolas deben estar conformados por material grueso, revestidos por bloques de piedras muy pesadas, del orden de varias toneladas. Las pendientes laterales deben ser de 1:1.5 a 1:2 (relación de la altura a proyección horizontal de la pendiente).
- Los pilotes de los muelles deben estar clavados a profundidad tal que evite daños por socavamiento. Además, la unión del pilote a la su-perestructura debe ser monolítica.
- Al efectuar el diseño de los muros de contención y tablaestacas debe suponerse la condición más desfavorable, o sea la que ocurre al re-tornar el agua desde tierra firme hacia el océano, lo que provoca empuje sobre el lado opuesto de dichas estructuras.
- Los tanques de combustible deben ubicarse de manera que no reciban el impacto directo de las olas, y rodearse de un dique de contención que repela el agua.
- No es posible proteger de manera especial los terraplenes de carrete-ras y ferrocarriles, pero se recomienda usar en ellos material lo más grueso posible.

#### OBRAS DE PROTECCION CONTRA TSUNAMIS EN JAPON.

En Japón los tsunamis han causado numerosas víctimas y graves da-ños materiales; por ello no es extraño que la palabra que internacio-nalmente los designa sea una palabra japonesa. Estos fenómenos han sido particularmente severos en la región de Sanriku, donde las condicio-nes batimétricas y topográficas se conjugan desfavorablemente, forman-do bahías en "V" que concentran en su vértice la energía de las olas del tsunami, alcanzando éstas alturas de 20 metros.

Sin embargo, en condiciones normales, cuando el tsunami no ataca, estas bahías son de aguas tranquilas, y el perfil de las costas se asemeja a los dedos abiertos de una mano, con altos acantilados y hermosos paisajes. Son actividades de esta región, la pesca y el cultivo de peces, mariscos y algas en granjas marinas, aunque existe también una importante siderúrgica en Kamaishi.

La región fue visitada por el grupo de asistentes al Simposio Internacional de Tsunamis 1981, entre los que se encontraba el autor. Las explicaciones estuvieron a cargo de un grupo de expertos de la Universidad de Tohoku.

A manera de informe, el autor presenta aquí un resumen de sus observaciones sobre obras de defensa existentes o en construcción (1981) en la región de Sanriku, entre Ofunato y Taro. (Ver Figura 32).

En general, las obras de defensa contra tsunamis consisten en las siguientes:

- Rompeolas, cuya ubicación se selecciona cuidadosamente, ubicándoseles generalmente a la entrada de la bahía. Son verdaderas "represas sumergidas" que amortiguan el impacto del tsunami, disminuyendo considerablemente la altura de las olas.

En su diseño generalmente se consideran: fuerzas de inercia y presión dinámica del agua; flotabilidad, peso muerto, fuerza del tsunami, y diferencia de presión hidrostática entre una y otra cara del rompeolas. Esta última fuerza es necesario evaluarla con sumo cuidado, pues se tiene como precedente que en 1968, durante el sismo de Tokachi-Oki, el rompeolas Kawaragi que protegía el puerto de Hachinohe colapsó en una longitud de 338 metros debido al gran desnivel de agua entre las caras interior y exterior del rompeolas, causado por la diferencia de fase del tsunami. El rompeolas mencionado era del tipo compuerta, en base a caissons.

La figura 34 presenta el rompeolas construido en la bahía de Ofunato que es larga y angosta. (Ver figura 33). Como se puede apreciar, el rompeolas tiene una sola abertura central que permite el paso de barcos de 100,000 toneladas de peso muerto. El canal de navegación tiene 16.3 metros de profundidad y 200 metros de ancho. La parte más profunda donde se construyó el rompeolas tiene 38 metros, y la altura total de la estructura es de 40 metros. En su construcción se empleó 1.13 millones de metros cúbicos de roca. En la parte superior del rompeolas se colocaron unos caissons de concreto armado de 10x12x11.5 metros, que fueron prefabricados en Miyako y transportados por mar hasta Ofunato.

En Kamaishi, un importante centro productor de acero, se está construyendo un rompeolas a la entrada de la bahía. A diferencia del de Ofunato, aquel tiene aberturas en el centro y en cada extremo, con lo que se consigue mejor circulación de las corrientes marinas, favorable a la producción de las granjas locales.

En general, los rompeolas son estructuras costosas porque requieren de técnica sofisticada en su construcción.

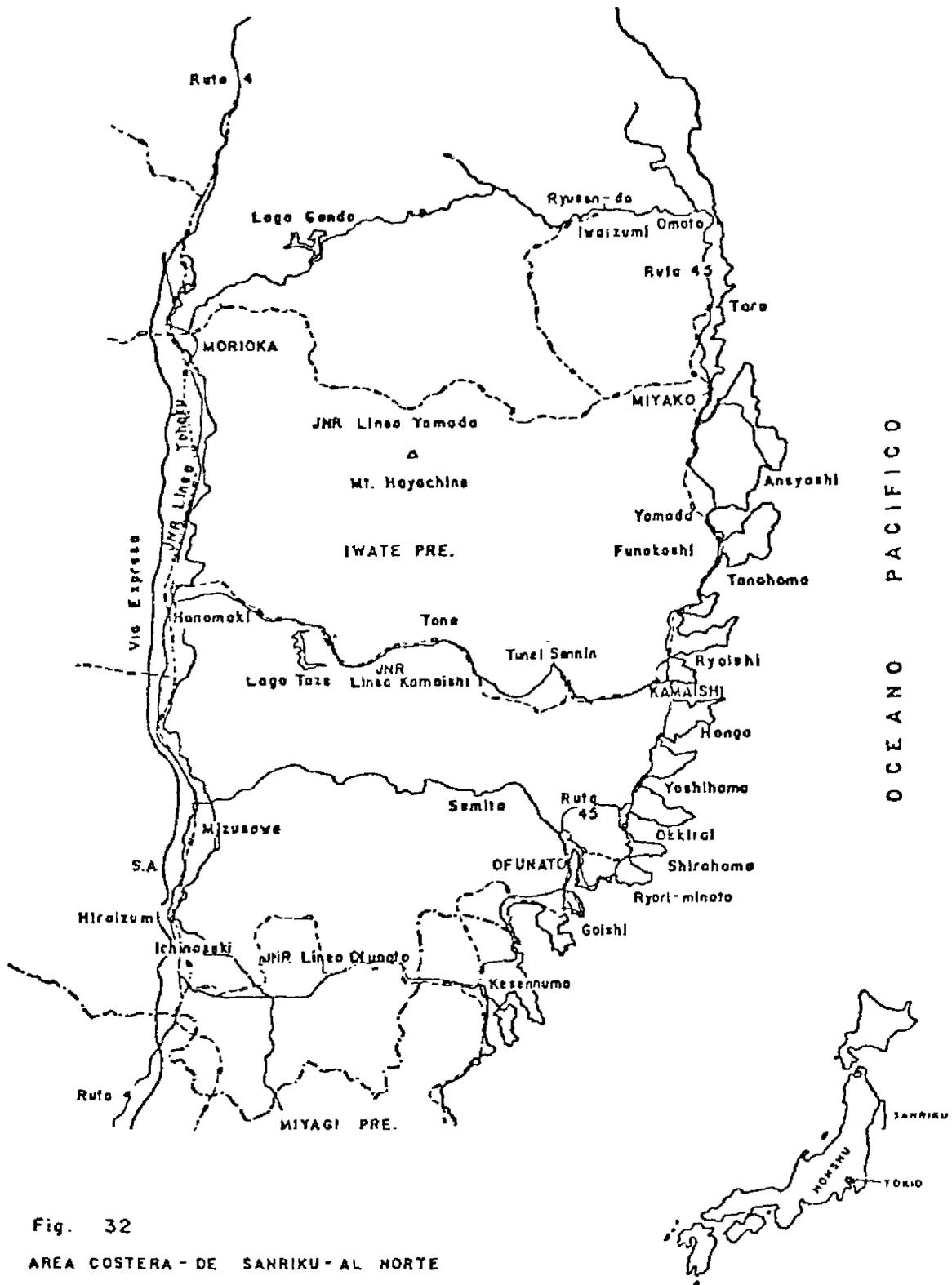


Fig. 32  
 AREA COSTERA - DE SANRIKU - AL NORTE  
 DE LA ISLA HONSHU - JAPON.

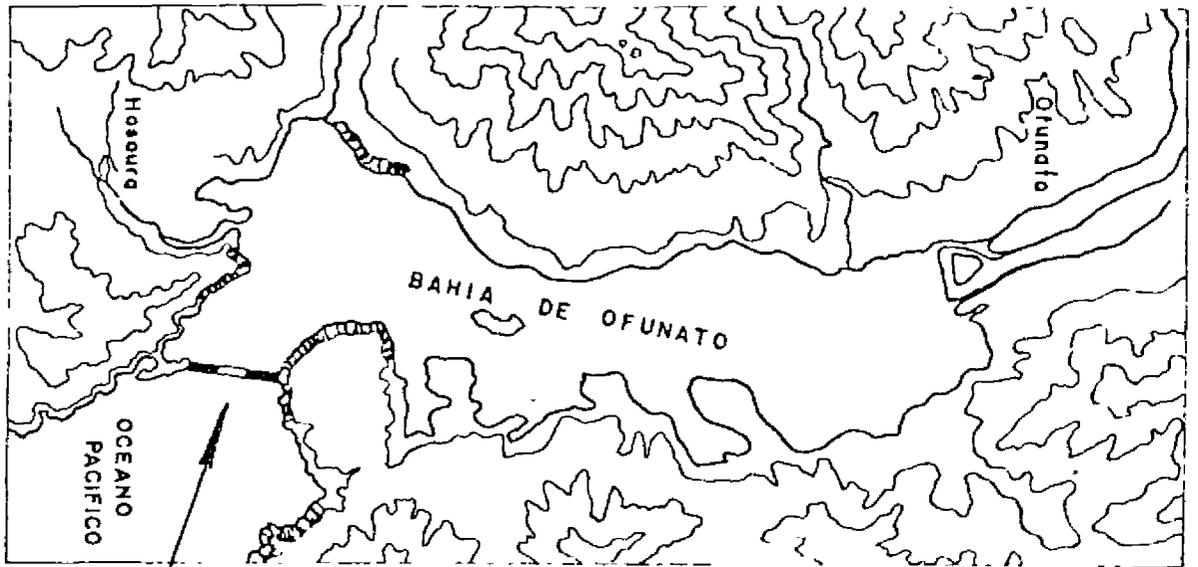
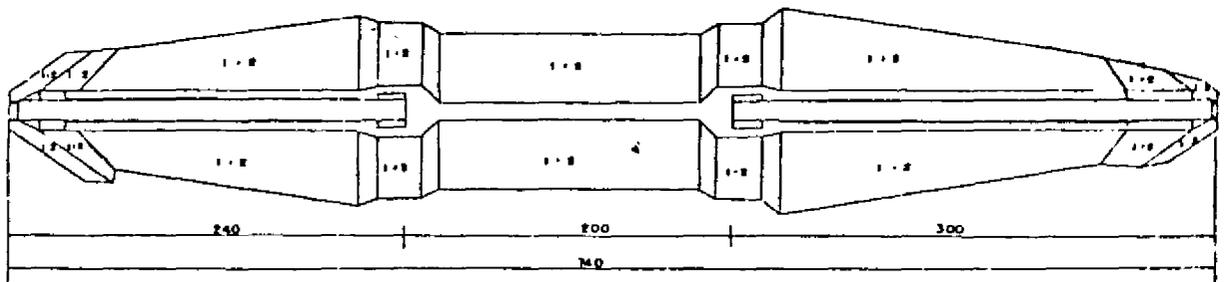


Fig. 33 UBICACION DEL ROMPEOLAS EN LA BAHIA DE OFUNATO

PLANTA



ELEVACION

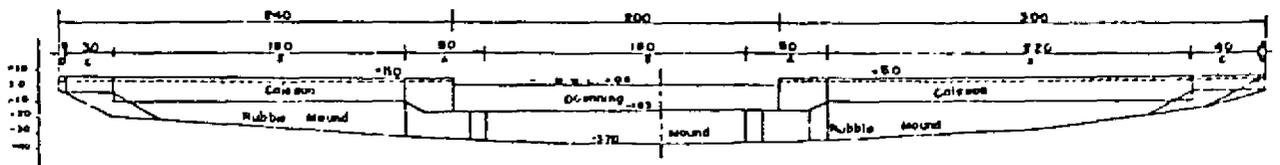


Fig. 34 ROMPEOLAS DE OFUNATO ( DIMENSIONES EN METROS )

- Muros de defensa o malecones. Son las obras de defensa más populares en Sanriku. Aún los pequeños valles agrícolas de escasa población están protegidos por estas estructuras construídas en la línea de playa.

Los factores que se tienen en cuenta para su diseño son: la altura de ola, la cual se puede estimar con fórmulas empíricas y datos históricos, o empleando en su cálculo métodos numéricos a partir de un supuesto sismo tsunamigénico. También la presión dinámica causada por el tsunami, estimada por la fórmula de Hiroi:  $p = 1.5 Wh$ , donde  $p$  es la presión en Ton/m<sup>2</sup>,  $W$  es el peso específico del agua en Ton/m<sup>3</sup>, y  $h$  la altura de la onda en el frontis del muro, en metros. Por último, se considera la socavación del pie de la estructura, fenómeno que atenta la estabilidad del muro; por ello, la pendiente del muro es más bien tendida: 1:1.5 a 1:2 (relación de la proyección vertical a la horizontal).

Los muros necesitan también de un sistema de drenaje que evite la acumulación de agua dentro o detrás de su estructura y disminuya su resistencia. Los construídos con esta característica han resistido bastante bien los tsunamis ocurridos.

Debido a su altura, unos 6 metros, los muros interfieren en las actividades diarias de pesca o en las granjas marinas. Por ello se les ha dotado de unas puertas que se cierran con ingeniosos mecanismos. Otro problema lo constituyen las aberturas necesarias para el paso de los ríos. En la localidad de Minato existe un puente que al ser accionado por un mecanismo se convierte en compuerta, impidiendo que el tsunami remonte por el cauce e inunde los valles.

Las figuras 35 y 36 siguientes presentan cortes de los muros de defensa en Taro y Yoshihama. Otras localidades poseen muros de defensa hidráulicamente más eficientes que los mostrados, pues debido a un perfil en curvatura, la ola del tsunami trepa y retorna al mar.

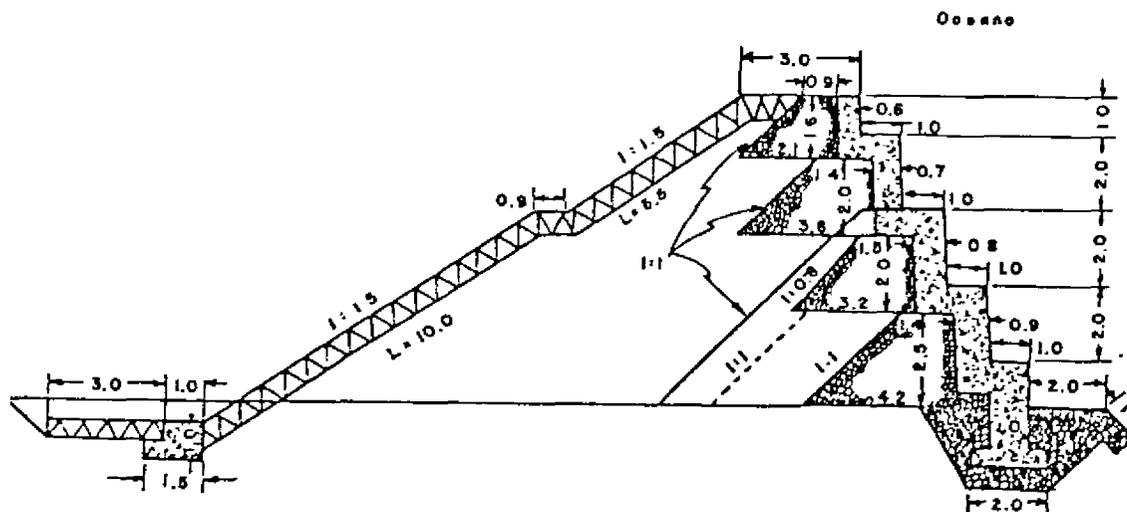


Fig 35 Muro de defensa contra tsunami en Taro

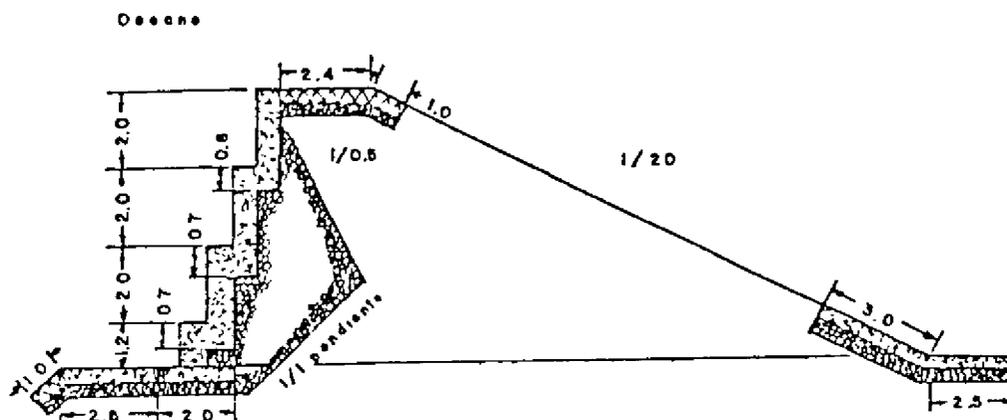


Fig. 36 Muro de defensa contra Tsunami en Yoshihama

- Un tipo de defensa menor consiste en plantar vegetación tupida, reforzada con línea de pinos. Estas líneas verdes amortiguan el impacto del frente de ondas y retrasan el avance del tsunami en tierra.
- La reubicación de las viviendas de varios puertos pesqueros, desde las partes bajas a plataformas ubicadas a mayor altura o en los flancos de pequeños valles, evitando la parte frontal por donde atacan los tsunamis.
- Construcción y mantenimiento de rutas de escape desde las zonas inundables hacia las zonas altas, siguiendo siempre un principio básico: ganar pendiente lo más rápidamente posible.

Para países con restricciones de tipo económico, como el Perú, - la construcción de obras de defensa como son los rompeolas y muros de protección es un tanto difícil. Es más provechoso abocarse al estudio de posibles emplazamientos de nuevas obras portuarias, y seleccionar a aquellas áreas donde las condiciones batimétricas y topográficas sean tales que impidan que el tsunami alcance alturas importantes. Por ejemplo, la bahía de Chimbote, cuya isla reduce la entrada de la bahía, presenta condiciones favorables.

Las tres últimas medidas de defensa mencionadas, son, en cambio, factibles de ejecutarse en países en desarrollo.

## CAPITULO VI

### PLANIFICACION FISICA CONTRA DESASTRES NATURALES

Se ha dicho que la Planificación Física de una urbe traslada los objetivos sociales y económicos del desarrollo a los patrones de uso del suelo; proporcionando a los futuros habitantes una adecuada calidad de vida, donde su protección y la de sus propiedades es esencial.

El primer paso es la selección del sitio por evaluación de las condiciones naturales existentes. De acuerdo a ella, la zona se divide en subzonas o microzonas con distintos grados de riesgo, confeccionándose así el Mapa de Microzonificación.

Con dicho documento se procede a definir los patrones de uso del suelo, destinando las zonas de menor riesgo para los componentes más importantes del asentamiento: áreas residenciales de alta densidad, áreas destinadas a las actividades económicas de las que depende la población, etc.; y las de mayor riesgo para áreas recreacionales o agrícolas. Por otra parte, la evaluación sirve para diseñar, por ejemplo, los sistemas de abastecimiento de agua, que suelen ser muy vulnerables en suelos arenosos saturados y poco compactos, como son los de las costas bajas.

En el Plan Maestro que define el modelo de desarrollo de una ciudad y constituye una guía para su implementación, deben incorporarse todas las medidas protectoras contra desastres naturales que puedan ocurrir en el área.

En consecuencia, la planificación física contra desastres naturales tiende a disminuir el riesgo potencial y mitigar las consecuencias de eventos destructivos o cadena de eventos, localizando y limitando al ámbito de la catástrofe, facilitando de esta manera las operaciones de rescate y socorro, rehabilitación y reconstrucción.

#### **PLANIFICACION FISICA CONTRA TSUNAMIS DE LAS COSTAS DE LIMA METROPOLITANA.**

A lo largo de los 100 kms. de costa limeña existe actualmente un apreciable número de asentamientos humanos. Para fines del presente siglo la actual población se habrá duplicado, lo que significa que cientos de miles de nuevos habitantes morarán a lo largo de la costa mencionada; vidas que será necesario proteger de los desastres naturales. Este objetivo puede lograrse a costo poco significativo si se planifican los nuevos asentamientos y las acciones tendientes a ello se inician de inmediato.

Se ha desarrollado en el país una metodología para estudios de Microzonificación (ver referencia 30 y 31) que conjuga los últimos avances de la Ingeniería con la realidad geográfica y socioeconómica de cada región, tomando en cuenta la ocurrencia de fenómenos de geodinámica externa, como son los deslizamientos, avalanchas, huaycos, inundaciones, etc., y los sismos y sus efectos secundarios, como son los tsunamis.

Tratándose de tsunamis, puede concluirse del presente estudio que, la costa limeña con cota topográfica inferior a los 6 metros desde el nivel del mar ubicados a menos de 0.5 kms. de la línea de costa constituye zona de mayor riesgo. La planificación física de estas costas enfrenta entonces dos situaciones:

- **Zonas habitadas.** En éstas, la planificación empieza por la delimitación de las zonas de mayor riesgo (zonas de ataque del tsunami o zonas inundables) y zonas seguras. Puesto que seguramente gran parte de las primeras están ocupadas, el siguiente paso consiste en separar los distintos problemas que posee cada una. Los problemas se reúnen en dos grandes grupos:
  - . Zonas residenciales
  - . Zonas industriales

Las primeras pueden ser de baja, mediana o alta densidad. Las últimas corresponden generalmente a habitantes de bajos ingresos, cuyas viviendas corren el riesgo de ser destruidas o seriamente dañadas, dificultando la reconstrucción y constituyéndose muchas veces en una pesada carga para la economía local.

Las medidas de protección física de los habitantes de estas zonas están dadas en los Planes de Evacuación formulados en el Capítulo IV, pero en lo que atañe al planeamiento físico éste requiere medidas adicionales como:

- . implementación del refugio temporal escogido;
- . reubicación de los habitantes de muy bajo ingreso que moran en las zonas de máximo riesgo;
- . modernización de las viviendas de los habitantes de mediano nivel de ingreso que moran en las mencionadas zonas;
- . creación de refugios de emergencia adicionales a los señalados en los Planes.

En cuanto a las zonas industriales, cuya paralización deviene no sólo en pérdidas económicas inmediata sino también en paralización de la producción y un proceso de reconstrucción o rehabilitación que puede ser largo, es preferible optar por mejorar las medidas de protección. Debe tenerse en cuenta que Lima Metropolitana comprende al Callao, el puerto comercial e industrial más importante de la Nación

- **Zonas costeras bajas que serán ocupadas a corto y mediano plazo.**

En este caso, lo más recomendable es efectuar los estudios de microzonificación antes de iniciar los proyectos de planeamiento y diseño urbano. Sin embargo, se mencionan las siguientes reglas generales a manera de guía:

- . Debe considerarse como zona inundable la zona de riesgo anteriormente mencionada. Esta área debe destinarse preferentemente a actividades recreativas, que son necesarias para los cerca de 10 millones de habitantes que tendrá Lima en el año 2,000.
- . En caso de que por razones prácticas sea necesario edificar en las áreas inundables (por ejemplo, depósitos en terminales marítimos, terminales pesqueros, etc.) es imprescindible determinar la altura y dirección de ataque de las olas, y hacer uso de las recomendaciones para edificaciones que se han dado en el capítulo anterior.

- . Si por razones de fuerza mayor se urbanizan zonas inundables, debe preverse vías de evacuación, separando el tránsito vehicular del peatonal. Una regla básica que deben observar estas vías es, que deben ir contra la pendiente (ganar altura) y paralelas a la dirección prevista de ataque de las olas, de tal manera que por ellas se llegue a la zona segura en el menor tiempo posible.

En resumen podemos mencionar que si en las costas de Lima Metropolitana, se construye a más de 6 metros de altura o a menor altura pero retirado más de 0.5 km. de la línea de costa, el riesgo de daños por tsunamis es mínimo y no es necesario tomar precauciones adicionales con respecto a defensa contra maremotos.

Sin embargo si se construye dentro de los límites indicados, se deberá tener en cuenta las recomendaciones indicadas anteriormente; pero esto último debe evitarse en lo posible.

#### IMPLICANCIAS DEL ESTUDIO EN EL PLANEAMIENTO REGIONAL.

Uno de los hechos que por años había llamado la atención al autor, es que todos los tsunamis importantes que han afectado la costa oeste de Sudamérica en los últimos 400 años han ocurrido entre el Callao-Perú, y el Sur de Chile. La historia no registra tsunamis importantes en la costa norte del Perú.

Durante el desarrollo del estudio el problema quedó aclarado. Si se observa un Mapa físico-político del Perú se podrá ver que las costas de los Dptos. de Lima hasta Lambayeque presentan una plataforma continental bastante amplia, es decir que se tiene aguas poco profundas a una gran distancia. Tal como se ha mostrado en el Capítulo III, la fórmula de Yamaguchi dice que la altura de ola es función de una potencia negativa de la distancia medida de la costa hasta la isobata de los 100 mts. Al estar esta línea (la isobata) a gran distancia de la costa, - la altura de ola va reduciéndose por fricción con el fondo marino, que es poco profundo, llegando a la costa bastante deprimida.

Este hecho puede ser útil para el planeamiento regional si se trata de ubicar instalaciones importantes en la orilla del mar: puertos, plantas termoeléctricas, reactores nucleares, complejos pesqueros, etc., pues se sabe que en el tramo comprendido entre Lima y Lambayeque el riesgo por tsunami es menor que en otros lugares de la costa peruana, como por ejemplo en la costa sur donde se tiene aguas profundas cerca de la costa. Aquí las olas tienen mayor altura y también llegan a la costa en menor tiempo que en el tramo anteriormente mencionado.

## B I B L I O G R A F I A

1. ABE, KATSUYUKI (1979)  
"Size of Great Earthquakes of 1837-1974 inferred from Tsunami data"  
Journal of Geophysical Research - Vol. 84, Ner 84.
2. AIDA ISAMU (1969)  
"Numerical Experiments for the Tsunami propagation - The 1964 Niga-  
ta Tsunami and the 1968 Tokachi-Oki Tsunami".  
Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 47, pp 673-700,  
Tokyo, Japan.
3. AIDA ISAMU (1978)  
"Reliability of a Tsunami Source model derived from Parameters"  
Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan.
4. CAMFIELD, FREDERICK (1978)  
"Tsunami Engineering"  
Coastal Engineering Research Center, U.S.A.
5. CASAS, ALBERTO (1974)  
"Estimaciones de DAños por Sismo y Tsunamis en Zonas Bajas del Callao"  
Tesis de Grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad  
Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
6. COORDINATING COMMITTEE FOR EARTHQUAKE PREDICTION (1975)  
"Earthquake Prediction Research in Japan"  
Tokyo, Japan.
7. COX DOAK AND JOSEPH MORGAN (1977)  
"Local tsunamis and possible local tsunamis in Hawaii"  
Hawaii Institute of Geophysics. University of Hawaii, U.S.A.
8. DELGADO ALBERTO Y GARCIA CELIA (1982)  
"Plan de Evacuación de Ciudades Afectadas por Tsunamis, Zona La Pun-  
ta-Pucusana".  
Tesis de Grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad  
Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
9. DEFENSA CIVIL DEL PERU (1977)  
"Evacuation"  
Secretaría Ejecutiva del Comité Nacional de Defensa Civil, Lima, Perú.
10. DEPARTMENT OF COMMERCE, NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRA-  
TION (1975).  
"Tsunami, the Great Waves"  
Hawaii, U.S.A.
11. DEPARTMENT OF COMMERCE, NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRA-  
TION (1980)  
"Catalog of Tsunami Photographs"  
Boulder, Colorado, U.S.A.
12. DEPARTMENT OF COMMERCE, COAST AND GEODETIC SURVEY (1954)  
"The Tsunami of November 4, 1952 as Recorded at Vide Stations"  
Washington D.C., U.S.A.

13. DEPARTMENT OF COMMERCE, COAST AND GEODETIC SURVEY (1967)  
"The Tsunami of March 28, 1964 as Recorded at Tide Stations"  
Washington D.C., U.S.A.
14. DEPARTMENT OF COMMERCE, COAST AND GEODETIC SURVEY (1960)  
"Tsunami, The story of the Seismic Sea-Wave Warning System"  
U.S.A.
15. CODOY VASQUEZ Y MONGE JOAQUIN (1975)  
"Metodología para la Evaluación del Riesgo de Tsunamis"  
Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas-  
Departamento de Obras Civiles, Sección Estructuras. Santiago, Chile.
16. HAAS J.E. AND P.B. TRAINER (1973)  
"Effectiveness of the Tsunami Warning System in Selected Coastal -  
Towns in Alaska".  
Fifth World Conference on Earthquake Engineering. Rome, Italy.
17. HATORI TOKUTARO (1970)  
"Vertical Trustal Deformation and Tsunami Energy"  
Bulletin of the Earthquake Research Institute. Vol. 48, pp 171-188,  
Tokyo, Japan.
18. HATORI TOKUTARO (1978)  
"A Follow-up of Tsunami Warning in Japan"  
Japan.
19. HEBENSTREIT GERALD Y WHITAKER ROBERT (1981)  
"Evaluación del Riesgo de Tsunamis que Presentan Posibles Eventos  
Sísmicos: Efectos Cerca de la Superficie".  
Agencia para el desarrollo Internacional, Departamento de Estado  
de los Estados Unidos de Norteamérica. Science Applications, Inc.
20. INSTITUTO HIDROGRAFICO DE LA ARMADA DE CHILE (1975)  
"Instrucciones Generales sobre el Sistema de Alarma de Maremotos"  
Valparaiso, Chile.
21. INSTITUTO HIDROGRAFICO DE LA ARMADA DE CHILE (1977)  
"Evaluación de Riesgo de Tsunami para la Costa Norte de Chile en-  
tre Paralelos 18° y 24°S".  
Valparaiso, Chile.
22. INTERNATIONAL TSUNAMI INFORMATION CENTER (U.S.A.)  
"Tsunami Newsletter"  
Hawaii, U.S.A.
23. INTERNATIONAL TSUNAMI SYMPOSIUM (1981)  
"Abstracts"  
Sendai, Ofunato, Kamaishi; Japan.
24. JAPAN NATIONAL WORKING GROUP IN TSUNAMIS (1981)  
"An introductions to Tsunamis and defence works in the Sanriku  
Coastal Areas"  
Special Report for the International Tsunami Symposium 1981.

25. JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY, CITY BUREAU, MINISTRY OF CONSTRUCTION (1980)  
"City Planning in Japan"  
Tokyo, Japan.
26. JENNINGS PAUL AND KANAMORI HIROO (1979)  
"Determination of Local Magnitude,  $M_1$ , from Seismoscope Records"  
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 69, U.S.A.
27. JENNINGS PAUL AND KANAMORI HIROO (1978)  
"Determination of Local Magnitude,  $M_1$ , from Strongmotion Accelerograms"  
Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 68, U.S.A.
28. KANAMORI HIROO (1979)  
"A Semi-empirical Approach to Prediction of Long-period Ground Motions from Great Earthquakes"  
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 69, U.S.A.
29. KARTZEV B. y JAZANOVSKI P. (1980)  
"La Naturaleza no es Indómita"  
Editorial MIR, Moscú, URSS.
30. KUROIWA J., DEZA E., JAEN H. AND KOGAN J. (1978)  
"Microzonation Method and Techniques Used in Peru"  
Proc. 2nd International Conference on Microzonation, Vol. 1 pp 341-452. San Francisco, California, U.S.A.
31. KUROIWA, JULIO (1982)  
"Simplified Microzonation Method for Urban Planning"  
Proc. 3rd International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, U.S.A.
32. KUROIWA, JULIO (1977)  
"Protección de Lima Metropolitana ante Sismos Destructivos"  
UNI y Secretaría Ejecutiva del Comité Nacional de Defensa Civil, 136 págs. Lima, Perú.
33. KAJIURA KIJIRO (1981)  
"Tsunami Energy in Relation to Parameters of the Earthquake model"  
Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan.
34. KUMIZI IIDA AND COX DOAK  
"Preliminary Catalog of Tsunamis Occurring in the Pacific Ocean"  
Hawaii Institute of Geophysics. Hawaii, U.S.A.
35. MINISTERIO DE MARINA, PERU. DIRECCION DE HIDROGRAFIA Y NAVEGACION  
Planos Batimétricos de la Costa Peruana. Mareogramas.
36. MINISTERIO DE MARINA, PERU. DIRECCION DE HIDROGRAFIA Y NAVEGACION  
"Tsunamis"  
Folleto de divulgación.
37. TAROTOWN, OFUNATO CITY, IWATE PREFECTURE (1980)  
"A Plan of Tsunami Warning and Refuge Practice"  
Japan.

# A N E X O I

## HISTORIA DE VEINTIUN TSUNAMIS OCURRIDOS EN LIMA ENTRE 1586 Y 1974

(El 18 de Enero de 1,535 Francisco Pizarro, Conquistador del Perú, fundó la ciudad Capital de la nueva colonia en el valle del Rímac; lugar elegido por la bonanza del clima, su fertilidad y cercanía a un puerto natural que facilitaba las comunicaciones con la Madre Patria, España. Lima, según una descripción de mediados del siglo XVI, consistía en poco más de 500 casas que ocupaban un área en la que cualquier ciudad española albergaría 1,500 y ésto porque al trazarla se quiso evitar los defectos comunes a aquellas, procurando calles anchas y rectas y viviendas amplias. El trazo perpendicular de las vías dió origen a las islas cuadradas o Manzanas, cada una constituida por cuatro Solares, y cuyos lados fueron llamados Cuadras, nombre que subsiste. Las construcciones no levantaron más de un piso sobre el suelo porque la madera se corrompía rápidamente; los muros fueron de adobe, muy anchos, y los techos ligeros.

Por el tiempo del establecimiento español, el Callao, cuyo nombre probablemente se deba a los guijarros o cantos rodados que caracterizan sus playas, estaba poblado por nativos asentados en los terrenos que hoy se conocen como Maranga, Bellavista y Bocanegra, significativamente lejos del mar. El puerto en sí, entonces llamado "Puerto de Lima" o "Santa María", distaba 12 kilómetros de Lima y estaba a unos 3 metros sobre el nivel del mar. Uno de sus primeros habitantes, Diego Ruiz, obtuvo en 1,537 licencia para construir un Tambo u hospedaje para descanso de los viajeros y, a la vez, cobertizo de las mercaderías. Con el tiempo, la importancia del puerto se incrementó al concurrir a él los envíos de oro y plata provenientes de las minas, por lo que se convirtió en meta de piratas y corsarios, como el inglés Drake que lo saqueó en 1,579.

En el trazo del poblado debió seguramente emplearse el mismo criterio adoptado en Lima, pero no se tomó en cuenta su posible destrucción por causa de una invasión o salida del mar, quizás por ignorancia de estas ocurrencias. De hecho, los primeros relatos de Tsunamis en el Perú son posteriores a la fundación de Lima).

**9 de Julio de 1,586.** Poco después de las 7 de la noche la tierra tembló fuertemente en Lima, causando la destrucción de iglesias, conventos, hospitales y casas. El temblor fue sentido hasta unos 500 Kms, al norte y otros tantos por el sur; incluso en la región central (Huánuco) y centro-sur (Cuzco). Murieron en Lima alrededor de 20 personas. Silgado estima (Referencia Bibliográfica No. 1) la magnitud del sismo en 8.1 según la escala de Richter.

El Virrey, Don Fernando Torres de Portugal, en carta al Rey de España le refería que al momento del sismo se encontraba en el Puerto del Callao inspeccionando la Armada Real. Se trasladó entonces a una barraca situada a 300 pasos (250 metros) de la orilla, pero noticiado de

la braveza del mar buscó refugio en zona más alta. El mar se retiró inicialmente, y luego se alzó cerca de 2 brazas (3.60 metros) inundando parte del pueblo. Retiróse y volvió a salir, y esta vez llevó consigo la barraca con toda la mercadería almacenada y algunos barcos y carros que por allí había. Las aguas llegaron también hasta el Monasterio de Santo Domingo, distante unos 200 metros de la orilla. En otra parte de su memoria afirma el Virrey que "fue tanta el agua que quedó por allí que (temo) otro y otros días no se pueda andar a caballo".

El tsunami fue observado en las costas de Sanriku, al Norte del Japón.

**24 de Noviembre de 1,604.** Sobre la 1.30 de la tarde un gran terremoto asoló la costa sur del Perú, arruinando las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna y Arica, extendiéndose los daños hasta Ica por el norte. En Lima, según las crónicas, el sismo fue moderado. Según Silgado, la magnitud fue cercana al 8.4 Richter.

El tsunami que siguió fue de enorme poder destructivo para el puerto de Arica, donde 23 personas murieron. Refieren los testimonios de la época que el mar se retiró dejando en seco el surgidero de los navíos. "En el puerto del Callao el mar no salió con tanta furia como en otras partes", sino que "hubo un golpe de agua que sin entrar en él lo dejó hecho isla, de manera que por algunos días no se podía pasar de Lima al Callao sin atravesar un gran charco", refiere el P. Bernabé Cobo en su "Historia del Nuevo Mundo".

(Entre los años 1,640-1,647, siendo Virrey el Marqués de Mancera, se construyeron las murallas que rodearon al pueblo del Callao, por lo que desde entonces se le llamó Presidio. Las murallas eran de aproximadamente 4 metros de altura, exteriormente de piedra e interiormente de adobe. En plano, su contorno adoptaba la forma de un segmento circular deformado, con la parte recta haciendo frente a la bahía en una longitud a los 1,200 metros, encerrando así una superficie aproximada de 59 Hectáreas. Estaban provistas de 13 núcleos artillados o baluartes, convenientemente distribuidos en su contorno, y que eran terraplenes elevados construidos para emplazar sobre ellos la artillería, de modo de ofrecer un mayor dominio sobre el campo. Si nos guiamos por las cotas actuales del terreno, el borde de las murallas superaba en algo los 7 metros de altura sobre el nivel del mar.

El presidio tuvo cuatro Puertas, llamadas: de Santiago, situada al norte y cerca al mar; de Lima, hacia la Mar Brava, hacia lo que hoy es Chucuito y La Punta; y Real, hacia el muelle. Las dos primeras conducían hacia el camino a Lima).

**20 de Octubre de 1,687.** Ocurrieron en Lima dos temblores; el primero hacia las 4 y 15 de la tarde, y el segundo, el más prolongado, a las 5,30. Murieron cerca de 100 pobladores, quedando la ciudad tan dañada que, por muchos días, la población pernoctó en tiendas de esteras en plazas y huertos. Los estragos llegaron hasta 700 kms. al sur de Lima, habiéndose observado también la formación de grandes grietas de kilómetros de extensión.

Luego del segundo temblor, el mar se retiró dejando gran parte

del puerto seco, volviendo "con mayor ímpetu y furia contra la tierra que la inundó toda y de los que pudieron escapar de la horribilidad y temblor del terremoto se anegaron muchos en el mismo camino que escogieron para salvar vidas", informó el Virrey. Murieron en el puerto cerca de 300 pobladores.

Según la encuesta hecha por el Cabildo de la ciudad, la ola marina entró al puerto pasando por encima de las murallas, e hizo encallar dos embarcaciones. Más al sur, a unas cinco leguas (28 kms.) de Lima, el mar desapareció un pueblo de pescadores llamado Quircay (hoy Lurín). Los estragos causados por el tsunami fueron grandes a lo largo de la costa comprendida entre Chancay (al norte de Lima) y Arequipa.

Otros testimonios refieren que el tsunami se repitió en la mañana del día 22; y se sabe asimismo que en esta fecha llegó a las costas de Japón.

Silgado le asigna al terremoto magnitud 8.2 Richter.

(Es notoria la discrepancia entre el relato del Virrey y la encuesta del Cabildo. En efecto, si la ola pasó por encima de las murallas debió superar los 7 metros de altura, y en consecuencia se hubiera producido, por lo menos, destrucción y mortandad similares a las causadas por el tsunami de 1,746. Ello no ocurrió, lo que hace suponer que la altura de ola fue menor, y lo sucedido acorde al informe del Virrey.

Por lo demás, una crónica del tsunami de 1,746 -Referencia Bibliográfica No. 2- al describir el impacto que la noticia de la destrucción del Callao causó entre los habitantes de Lima, dice que "excedió lejos todos los grandes sismos que antes ahí sucedieron, porque si bien algunas veces ellos fueron ocasión de flujos (del mar) dentro de la Guarnición, hasta entonces esos flujos no causaron mayor daño al pueblo o a sus moradores..."

Entre el 23 de Setiembre y el 9 de Octubre de 1,713 estuvo anclado en el Callao el navío "San José" mandado por el marino francés Francisco A. Frezier. En este corto período, Frezier levantó el plano de la ciudad amurallada incluyendo un área baja al norte de ella, en la cual eran abundantes los afloramientos de agua dulce o puquios; los más importantes eran los del Chivato en terrenos del fundo La Legua, y de Miranaves en la hacienda del mismo nombre; de los cuales se formaba un arroyuelo cuyas aguas desde el establecimiento español fueron dedicadas al abastecimiento de los habitantes. Este es el río que en el plano de Frezier se confunde con el Rímac. De sus observaciones sobre esta zona baja, el marino auguró que la ciudad podría ser anegada por una salida del mar.- Francisco Amadeo Frezier. "Relation du voyage du la mer du sud". París, 1,732.

A la zona baja, hoy poblada y con cota topográfica entre 2.40-2.80 metros, daba la Puerta de Santiago; y según el relato del Virrey, muchos de los que pretendieron escapar perecieron ahogados en la inundación. Si se considera además que la altura de ola en 1,586 fue de 3.60 metros, y que las magnitudes de estos sismos son similares, puede concluirse en que la altura de ola en 1,687 bordeó los 4 metros).

El día Octubre de 1,746. El terremoto y el tsunami que le siguió son los más pavorosos de la historia sísmica peruana. Lima, al decir de los cronistas, había alcanzado grado de perfección por sus bien regladas calles, magníficos templos y vistosas fuentes. El terremoto ocurrido a las 10 y 30 de la noche fue prolongado (3 a 4 minutos según Llano y Zapata -Referencia Bibliográfica No. 3), y causó tal destrucción que de las 3,000 casas distribuidas en 150 manzanas sólo quedaron en pie 25; y la acumulación de escombros fue tal que a los vecinos les era imposible reconocer sus calles. En las 24 horas siguientes ocurrieron 200 temblores, y 430 entre la fecha del sismo y mediados de Febrero del año siguiente. Según el relato oficial murieron 1,141 habitantes de un total de 50,000, aunque Llano y Zapata afirma que el número debe elevarse a 2,000 incluyendo así los muertos por el hambre y la peste que sucedieron.

En el Callao no quedó edificio en pie; sólo las murallas resistieron el sismo. Pero media hora más tarde el mar alzóse y entro al Puerto. Volvió por segunda vez y desenterró murallas y baluartes desde sus cimientos. De las 23 embarcaciones surtas en el puerto, 19 se fueron a pique y 4 fueron llevadas por las olas tierra adentro. Una de ellas, el navío de guerra "San Fermín", fue llevado hasta lo que entonces eran tierras bajas de la hacienda Chacra Alta, y allí encalló, en lo que hoy es esquina de las calles Saloom y Colón. Cerca de él encalló el "San Antonio", barco que arribaba de Guayaquil donde había sido construido, y posiblemente el mascarón de proa que hoy se aprecia en la esquina de la calle Cochrane y Avda. Buenos Aires, a unos 150 metros de la señal anterior, pertenecía al navío. Según datos de Jorge Juan y Antonio Ulloa, el "San Fermín" medía 28.50 metros de quilla y 9.70 metros de manga, y montaba 30 cañones de 6 libras de bala (Jorge Juan y Antonio de Ulloa; "Noticias Secretas de América"; editado en 1,748 aproximadamente).

El tercer barco, el "Michilot" varó donde estuvo ubicado el antiguo Hospital de San Juan de Dios. El último, llamado "Socorro", fue llevado por las aguas hasta las estribaciones de la cordillera andina según el relato contemporáneo; presumiéndose que encallara en el extremo sur de la bahía de Chorrillos, donde las estribaciones son notables.

De los 4,900 habitantes que tenía el Callao salvaron la vida sólo 200. Algunos por encontrarse a bordo de los barcos que fueron llevados por el mar sobre el pueblo; otros, asidos a maderos. Veintidos se libraron de la muerte aferrados a la muralla del Baluarte Santa Cruz (el cual estaba situado un poco al norte de lo que hoy es el Baluarte San José del Castillo Real Felipe. La veracidad de este hecho parece confirmarse porque el Virrey mandó formar la Primera Compañía de la nueva fortaleza a base de los 6 soldados sobrevivientes del Regimiento Portugal del Presidio). De los que el mar arrastró, unos fueron llevados por las olas hasta la isla San Lorenzo, distante 6 millas de la costa; otros a diferentes playas del sur (Miraflores, Barranco, Chorrillos), donde vararon incluso al cabo de cinco días. Los testimonios de algunos sobrevivientes refieren como los flujos y reflujos encontráronse, rodeando de esta forma al pueblo y arrasando cuanto en él había. Llano y Zapata refiere el trágico caso de cuatro hombres a los cuales fue imposible rescatar por impedirlo el volumen de desechos que el mar llevaba consigo.

El terremoto fue sentido en Guayaquil (1,100 kms. al norte de Lima), y en Cuzco y Tacna por el sur. El tsunami llegó a Concepción, Chile, al cabo de 6 y 1/2 horas, e inundó 3 a 4 cuadras del puerto. Silgado le atribuye al sismo la magnitud máxima ocurrida en el Perú: 8.4 en la escala de Richter.

(Es importante señalar que por primera vez se obtiene un registro histórico del intervalo transcurrido entre el momento del sismo y la llegada del tsunami a la costa, en el cual coinciden las crónicas consultadas. Los treinta minutos sirven para delimitar la zona del probable epicentro del sismo, basándose en las Cartas de Refracción o avance de la ola, preparadas para los tsunamis de 1,966 u 1,974, para este Informe. De esta manera se estima que el epicentro estuvo en el mar, a 100 kms. de la costa.

Del relato de éste y los anteriores tsunamis puede inferirse que la invasión del mar ocurrió principalmente por la zona baja al norte de las murallas, zona de los puguíos y el río. Consecuencia de ello es que, cuando se decidió la construcción de la nueva fortaleza, el Real Felipe, se escogió el lugar más alto dentro de los linderos del antiguo Callao. Don Luis Godín, Cosmógrafo Mayor del Reino, encargado de examinar a los arquitectos, agrimensores, maestros de obra y tasadores de inmuebles de Lima, fue comisionado por el Virrey para proyectar la nueva fortaleza. En su proyecto, Godín aconsejó trasladar la ciudad a los terrenos que se conocen hoy como Bellavista; ideó también ubicar el puerto tierra adentro, para lo cual sugirió obras que harían navegable el río mencionado. El Virrey aceptó la nueva ubicación de la ciudad pero postergó la idea del puerto. El emplazamiento escogido por Godín sugiere hoy que el mar en su salida no llegó más allá de los 1,000 metros tierra adentro y quedó por debajo de la cota topográfica de los 8 metros.

El que veintidos hombres se libraran de la muerte sobre una muralla de 7 metros sobre el nivel del mar, indica que la altura de ola en ese punto no alcanzó tal dimensión. Más aún, las murallas del Real Felipe se alzaron 4 metros sobre un terreno cuya cota topográfica media es también 4 mts. y seguramente en su construcción se tomó en cuenta la posibilidad de un nuevo maremoto. Todo tiende a señalar que la altura de ola del tsunami de 1,746 fue inferior a los 7 metros.

Cabe agregar que, treinta años más tarde, en Diciembre de 1,776, ocurrió una salida del mar que aisló el Castillo. Las bravezas obligaron al Virrey a reforzar la orilla, pues amenazaban destruir la Casa de Administración de Rentas y los almacenes que se levantaban fuera de la fortaleza y al pie del mar.

Paulatinamente, la zona baja fue poblándose con edificaciones comerciales y administrativas, pese a las disposiciones legales y militares que las prohibían. Los esfuerzos de los sucesivos gobernantes por arrasarlas fracasaron al enfrentarse a los intereses de los comerciantes afianzados en el lugar; y así, las precarias viviendas y almacenes dieron origen a lo que fue luego el Callao Republicano).

1° de Diciembre de 1,806. A las 6 de la tarde ocurrió el mayor temblor desde 1,746. Duró aproximadamente un minuto. El mar salió fuera de sus límites ordinarios y causó averías en algunos barcos surtos

en la bahía. Se dice que levantó un ancla de tonelada y media y la depositó sobre la casa del Capitán del Puerto.

(Hacia 1,865, el tráfico marítimo del Callao era servido por una pequeña ensenada artificial que formaba el molo o dique colonial, el que fue empezado por Amat para reemplazar los muelles destruidos por el tsunami de 1,746. En este año de 1,865 se inició la construcción de un muelle metálico cuyo arranque en tierra, en una longitud de 94 metros, se hacía sobre pilotes de fundición y proseguía en un molo de albañilería de 76 metros, el cual formaba parte del cabezo o escollo. Este muelle se erigió sobre el colonial. La construcción de la Dársena es posterior; tenía un desarrollo interior de 820 metros de muelles, con una altura de 1.80 metros sobre la pleamar, y su boca de entrada era protegida por un rompeolas de 200 metros de extensión. Los malecones de la Dársena eran macizos, con muros exteriores de piedra, y en la poza que encerraban se construyó un espigón de 150 metros con tablero de madera sobre pilotes metálicos. En el diseño se ganó una apreciable área al mar y al mismo tiempo se estabilizaron las orillas marinas fronterizas a la obra y que hasta entonces habían sido inundadas por las bravezas. La Obra fue entregada en 1,877.- Alberto Regal. Referencia Bibliográfica No. 4.

El río formado por los puquios desapareció con el incremento de la población).

**9 de Mayo de 1,877.** A las 8 y 28 de la noche ocurrió un terremoto frente a las localidades de Mollendo, Ilo y Arica, que fue seguido por un tsunami que destruyó Arica. En el Callao se sintieron leves temblores; el mar embraveció y alrededor de las 4 de la tarde del día 10 cubrió la estación del muelle Dársena. El tsunami llegó hasta Nueva Zelanda y Yokohama en Japón.

**12 de Enero de 1,914.** Un pequeño tsunami de origen desconocido inundó la Escuela Naval de La Punta. Hubo daños menores en ella y en edificaciones aledañas.

**10 de Noviembre de 1,922.** Un sismo de magnitud 8.3 Richter, ocurrido al norte de Chile, generó un tsunami que llegó al Callao el día 11. No hay referencias de daños.

**24 de Mayo de 1,940.** El epicentro del sismo ocurrido a las 11 y 35 de la mañana y que afectó duramente a Lima, fue determinado por el Laboratorio de Pasadena, California, en los 10°S y 77.8°O, a profundidad focal de 42 kms. y con magnitud 8,2 Richter. Fue sentido desde Guayaquil por el norte, hasta Arica por el sur. Murieron 179 personas y 3,500 quedaron heridas.

Luego del sismo se produjo un pequeño tsunami; en Ancón el mar retiróse inicialmente unos 150 metros, dejando seco el muelle, y luego avanzó lentamente, pasando los muros del malecón. El fenómeno de retroceso y avance fue también observado en La Punta, Callao, y el puerto de Pisco, en Ica.

Es interesante señalar aquí que el epicentro está localizado en tierra firme, a 40 kilómetros de la costa.

**24 de Agosto de 1,942.** Sismo frente a Nazca a las 5 y 50 de la tarde, con magnitud 8.4 Richter y profundidad focal de 60 km. Se observó el levantamiento de un espigón que servía de embarcadero en la bahía de San Juan, prueba de una emersión local de la costa según Broggi (1,946; citado por Silgado). El sismo, de un minuto de duración, tuvo gran intensidad en los Departamentos de Ica y Arequipa. El tsunami originado fue apreciado en el Callao, por el norte, y Matarani por el Sur. En Puerto Lomas, al sur de Nazca, el mar se retiró más de 200 metros, regresando luego para inundar el pueblo, destruyendo embarcaciones y almacenes de la Aduana y causando heridos.

**1° de Abril de 1,946.** Terremoto en las Aleutianas, magnitud 7.4 Richter. El tsunami que originó fue observado por 33 mareógrafos del Pacífico; en el Perú fue registrado en Talara (puerto del norte), Callao y Matarani. No hay registro de daños.

**4 de Marzo de 1,952.** Sismo en Tohachi, Hokkaido (Japón), que produjo un tsunami que llegó al Callao. No se tienen mayores datos.

**4 de Noviembre de 1,952.** Terremoto en Kamchatka, con magnitud 8.2-8.4 Richter. El tsunami fue observado por 71 mareógrafos del Pacífico, y llegó al Callao a las 6 y 50 de la mañana del día 5. Los cambios abruptos en el nivel del mar formaron remolinos y corrientes, particularmente en el área encerrada por el rompeolas del Terminal Marítimo donde las corrientes desarrollaron velocidades de 10 nudos. Más de 30 yates y pequeños botes fueron dañados, y las grandes naves se vieron impedidas de cumplir sus itinerarios por la braveza del mar. Además, algunas casas de La Punta fueron inundadas en la tarde del día 5. Una sección de 120 metros del muelle fue destruida. En el Callao los daños fueron ligeros, aunque las corrientes arrastraron tierra adentro gran cantidad de lodo, varando además numerosos peces. Las oscilaciones en el mar se prolongaron por cuatro días.

**9 de Marzo de 1,957.** Terremoto en las Aleutianas, de magnitud 8.2-8.5 Richter. El tsunami generado fue observado por 54 mareógrafos del Pacífico. Sentido en los puertos peruanos de Talara, Callao (con muy pequeñas oscilaciones) y Matarani.

**20 de Enero de 1,958.** Terremoto en el mar frente a las costas de Ecuador y Colombia (Tumaco), con saldo de muchos muertos, edificaciones destruidas, embarcaciones desaparecidas, comunicaciones cortadas y gran pánico de la población. El tsunami generado alcanzó la costa peruana, inundando el Malecón Figueredo de La Punta.

**22 de Mayo de 1,960.** El día 21 a las 10:02:50 GMT ocurrió un terremoto cerca a Lebu, Chile central, el que causó daños en edificaciones y otras estructuras de Concepción y alrededores, y cerca de 150 muertos; produjo además un débil tsunami registrado en Talcahuano, un poco al norte. El sismo tuvo magnitud 7.2-7.5 Richter. Le siguieron numerosas réplicas, 4 de ellas con magnitudes superiores a 7. La última, ocurrida a las 19:10:47 GMT, precedió al gran sismo (main shock) sucedido a las 19:11:20, de magnitud 8.5 Richter, y cuyo epicentro fue en principio localizado en los 38°S y 73.5°O, y posteriormente corregido a los 41°S. Este sismo causó uno de los más destructivos tsunamis, -

afectó duramente las lejanas costas de Hawai y Japón.

Según el registro del mareógrafo de La Punta, la ola del tsunami llegó a este lugar a las 6 y 45 de la tarde del día 22 (hora local). Pero desde las 4 de la mañana una fuerte marejada golpeó el litoral de la Mar Brava y toda la banda sur de La Punta, desde el sitio denominado La Arenilla hasta el (entonces) establecimiento de baños; a consecuencia de ello, un amplio sector del balneario quedó anegado. Media hora más tarde, y luego de una aparente tranquilidad, el mar salió afectando la llamada Punta-Punta, rompiendo vigas de fierro que servían de defensa al establecimiento de baños. El fenómeno o salida del mar se repitió a las 2 de la tarde, y luego cada 4 horas aproximadamente. Las aguas causaron daños en establecimientos y calles por la arena y piedras que arrastraron. El tránsito de tranvías quedó paralizado por varias horas, mientras cuadrillas de obreros cerraban las bocacalles hacia la playa con sacos de arena. Clubes de playa de Miraflores y el camino costanero de "Las Cascadas" entre la Quebrada de Armendáriz y Barranco sufrieron daños. La braveza del mar fue notoria en Paíta, Pacasmayo, Casma, Huarney, Huacho, Pisco y Paracas. El mareógrafo de La Punta registró fuertes oscilaciones durante los cinco días posteriores.

**21 de Noviembre de 1,960.** Sismo a las 5 y 50 de la tarde frente a la costa de Lambayeque, en el norte peruano, con epicentro en las coordenadas  $6.8^{\circ}\text{S}$  y  $80.7^{\circ}\text{O}$ ; magnitud 6.75 según la escala de la Japan Meteorology Agency, y profundidad focal de 93 kms. Generó un tsunami que, según testigos, alcanzó alturas gigantescas en los puertos de Eten y Pimentel; en este lugar el mar avanzó 600 metros tierra adentro. El tsunami fue registrado por los mareógrafos de Talara, Chimbote, Callao y Matarani, con pequeñas oscilaciones.

**28 de Marzo de 1,964.** Terremoto en Prince William Sound, Alaska, de magnitud 8.4 y profundidad focal entre 15 a 20 kms; ocurrido a las 03:36:13 GMT, arribó al Callao la primera ola a las 19:30 GMT. El sismo tuvo 28 réplicas en las 24 horas siguientes, 10 de ellas de magnitud superior a 6. El mareógrafo de La Punta registró fuertes oscilaciones en el mar durante los 4 días siguientes.

**17 de Octubre de 1,966.** El sismo que sacudió Lima a las 4 y 41 de la tarde (hora local) tuvo su epicentro en las coordenadas  $10.7^{\circ}\text{S}$  y  $78.6^{\circ}\text{S}$ , profundidad focal de 38 kms. y magnitud 7.5 Richter. Fue sentido desde Bogotá (Colombia) por el norte, hasta el Departamento peruano de Ica por el sur, y registrado por observatorios tan distantes como el de Toledo (España), Venezuela, Pasadena (California), La Plata (Argentina). Duró unos 50 segundos y causó el derrumbe de edificaciones antiguas (casas e iglesias), cuarteamiento de edificios modernos sin estructura adecuada y rotura de vidrios, así como daños en las instalaciones subterráneas de agua y desagüe. Los muertos fueron cerca de 100. niños en su mayoría, y más de 1,000 heridos.

Durante el sismo el mar embraveció y en algunos sitios salió de su cauce. Pescadores de Ancón que estaban por hacerse a la mar declararon luego que las fuertes corrientadas les impedían avanzar, por lo que se vieron obligados a regresar.

El tsunami causó destrucción en Puerto Casma (ubicado al noreste

del epicentro), alcanzando las olas alturas impresionantes, según testimonios. El mar cubrió los muelles y avanzó hacia las fábricas, destruyendo un muro de concreto armado que defendía la "San Elías". La primera ola llevó a la bolichera "Nikki" por encima del muelle, y la segunda la sacó de esta posición. Otras embarcaciones menores fueron arrastradas y una de ellas depositada en el patio de la "Pesquera Casma". Miles de sacos de harina de pescado fueron desparramados por la playa. No hubo desgracias personales porque la casi totalidad de sus 9,000 habitantes se refugiaron en los cerros vecinos. La salida del mar se repitió los días 18 y 21 con olas de tres metros de altura. A causa de las inundaciones se formaron lagunas de medio metro de profundidad. (Cabe anotar que la configuración batimétrica de Puerto Casma corresponde a una fuerte pendiente, donde la cota de los 20 metros de profundidad está a menos de 1.5 kms. de la costa. Topográficamente, corresponde a una bahía cerrada, estando ubicado el puerto en el extremo sur).

Daños similares a los descritos se registraron en los puertos cercanos de Supe, Caleta Vidal y Tortugas. En Caleta Culebras (Huarmey), el mar destruyó casi todas las viviendas dejando a 2,000 personas en el desamparo.

Varios sectores de la Carretera Panamericana Norte quedaron interrumpidas por las inundaciones, paralizándose el tránsito por varias horas.

El tsunami fue observado desde el Departamento de La Libertad, - por el norte. En Ancón, rebasó el malecón cuya altura promedio es de 2.70 metros sobre el nivel del mar y llegó hasta la calle Dos de Mayo, 95 metros tierra adentro. La violencia de las aguas rompió el cable del "Victoria", barco de 700 toneladas anclado en la bocana del río Rímac; tras 24 horas de estar el gárete, la nave encalló en la playa Cascajal, frente a la Refinería La Pampilla, muchos kilómetros al norte de su anterior posición.

En el Terminal Marítimo del Callao, el mar formó remolinos que liberaron de sus amarras a tres naves acoderadas en el muelle, estrellándose una de ellas contra los espigones (entonces en construcción) de Petróleo y Minerales, causando algunos daños.

En La Punta hubo un retiro inicial de 150 metros; y 50 minutos después de ocurrido el sismo llegó la primera ola. Según el mareograma, fueron 6 olas en total, siendo la última la mayor. Las aguas llegaron a otros 150 metros tierra adentro. Inundáronse también Chucuito, y Agua Dulce en Chorrillos; en este lugar el mar cubrió por dos horas el muelle de Pescadores, desapareciendo 16 chalanas (botes de pesca).

En los balnearios sureños de Punta Hermosa, Punta Negra, San Bartolo y Pucusana, las aguas invadieron las calles obligando a los vecinos a refugiarse en los cerros que las circundan. Más al sur, en la caleta de San Andrés, Pisco, el mar se retiró 500 metros desde su cota habitual.

**26 de Julio de 1,968.** Tsunami de origen desconocido, que se prefiere calificar de maretazo, azotó el litoral peruano entre Talara y Tacna.

El golpe de agua tuvo mayor violencia en los puertos al sur del Callao (Pisco, Matarani, Mollendo e Ilo).

En la costa limeña, el mar atacó Callao, Chucuito y La Punta. La mayor intensidad se produjo a las 5 y 28 de la mañana, siendo la zona más afectada la costa de la Mar Brava, donde el agua ingresó más de trescientos metros debido al declive de la zona. Las defensas de tierra existentes contuvieron en gran parte la furia del mar.

**3 de Octubre de 1,974.** El sismo tuvo lugar a las 9 y 21 de la mañana, con epicentro en los  $12.3^{\circ}\text{S}$  y  $77.8^{\circ}\text{O}$ ; profundidad focal de 13 kms. y magnitud Richter 7.5. Tuvo una duración aproximada de 90 segundos. Los efectos destructivos se extendieron desde Lima y poblaciones alejadas hasta Pisco, causando 78 muertos y 2,500 heridos. Los daños fueron importantes, sobre todo en edificaciones antiguas y en las construcciones sobre terrenos blandos, como en La Molina y Chorrillos, etc. En algunos lugares se observó la formación de agrietamientos en el terreno paralelos a la línea de costa, y algunos perpendiculares; también, asentamientos y licuefacción.

El registro del mareógrafo de La Punta indica que la primera ola llegó a este lugar 20 minutos después del sismo. A Pucusana la ola arribó a los 30 minutos aproximadamente, destruyendo parte del malecón e inundando hasta la altura del Parque Central: 80 metros desde la orilla y cota superior a los 3 metros sobre el nivel del mar. En esta zona el malecón de la ribera tiene una altura promedio de 1.60 metros. Las aguas arrastraron las balanzas del Terminal Pesquero y algunas lanchas de pesca; también arrastraron botes y lanchas hacia la isla Galápagos. La salida del mar fue similar en San Andrés, Pisco, donde las aguas llegaron hasta la Plaza de Armas. El retiro del mar fue notorio en Agua Dulce, Chorrillos, alcanzando unos 120 metros, y volviendo luego a su cauce de manera gradual.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS O FUENTES CONSULTADAS

1. Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1,513 - 1,974).- Enrique Silgado. Instituto de Geología y Minería. Lima. 1,978.
2. "A true and particular Relation of the dreadful Ruin in which Lima (otherways called La Ciudad de los Reyes) Capital of the Kingdom of Peru, involved, by the horrible Earthquake that happened there in the night, the 28th of October, 1,746: And of the total Destruction of the Garrison and Port of Callao from the violent Irruption of the Sea, occasioned by the Earthquake in that Harbour".- Relato anónimo publicado como Capítulo II de un libro sobre sismos, editado en Londres en 1,748.
3. Carta o Diario, que escribe D. Joseph Eusebio de Llano y Zapata, a su más venerado amigo y Doctor correspondiente, el Doctor Don Ignacio Chirivoga y Daza, Canónigo de la Iglesia de Quito ..... Imprenta de Juan de Zúñiga. Madrid. 1,748
4. Historia del Real Felipe del Callao (1,746 - 1,900).- Alberto Regal. Imprenta del Colegio Militar Leoncio Prado. La Perla. Callao. 1,961.
5. La Conquista del Perú.- J. Antonio del Busto D. Librería Studium Editores. Lima. 1,981.
6. Preliminary Catalog of Tsunamis occurring in the Pacific Ocean.- Kumizi Iida, Doak C. Cox. USA Hawaii, Hawaii Institute of Geophysics.
7. US Department of Commerce. Coast and Geodetic Survey. Washington DC. Special Publication Ner 300.
8. Registros del mareógrafo de La Punta, cedidos por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHNM).
9. Archivo periodístico del Diario "El Comercio" de Lima.
10. Biblioteca del Diario "La Prensa" de Lima.
11. Relatos de testigos presenciales de los tsunamis de 1,966 y 1,974 (comunicaciones personales).

Fecha	Magnitud (sismo)	Epicentro (sismo)	Altura de Ola	Area Inundada
9/7/1586	8.1	68 kms. frente a la costa.	3.6 mts. (Callao)	Callao: 250 metros tierra adentro.
24/11/1604	8.4	Lejano (continental)	2.8 mts. (Callao)	Callao: alrededores (bajo cota 3 mts.)
20/10/1687	8.2	95 kms. frente a la costa.	4 mts. (Callao)	Callao: zona baja al norte, y Callao mismo.
28/10/1746	8.4	100 kms. frente a la costa.	7 mts. (Callao)	Callao: 1,000 mts; destrucción total. (Bajo cota 6 mts.)
9/5/1877	-	Lejano (continental)	2.4 mts. (Callao)	Callao: orillas, muelles.
24/5/1940	8.2	10°S, 77.8°O (40 kms. tierra adentro).	Ancón: 3.2 mts; Callao: id.	Ancón: malecón. Callao: La Punta, Chucuito.
24/8/1942	8.4	15°S, 76°O (frente a Nazca)	Pto. Lomas: gigantescas	-
4/11/1952	8.2-8.4	Lejano (transcontinental)	-	La Punta: malecón Figueredo. Callao: orillas
20/1/1958	-	Lejano (continental)	-	La Punta: malecón Figueredo.
22/5/1960	8.5	Lejano (continental)	-	La Punta: playas de Miraflores y Barranco.
21/11/1960	6.75 JMA	6.8°S, 80.7°O (frente a Lambayeque).	Eten y Pimentel: grandes olas	Pimentel: 600 mts.
17/10/1966	7.5	10.7°S, 78.6°O (72 kms. frente a la costa).	Ancón: 3.2 mts. La Punta: 4 mts. Puerto Casma: olas grandes.	Ancón: 95 mts. La Punta: 150 mts. Pto. Casma: total.
26/7/1968	-	-	-	Sur del Callao y La Punta.
3/10/1974	7.5	12.3°S, 77.8°O (75 kms. frente a la costa).	Pucusana: 3 mts. La Punta: 2 mts.	Pucusana: 80 mts.

## A N E X O II

### LA ALTURA DE OLA Y EL TIEMPO DE LLEGADA SEGUN EL ESTUDIO DE HEBENSTREIT Y WHITAKER

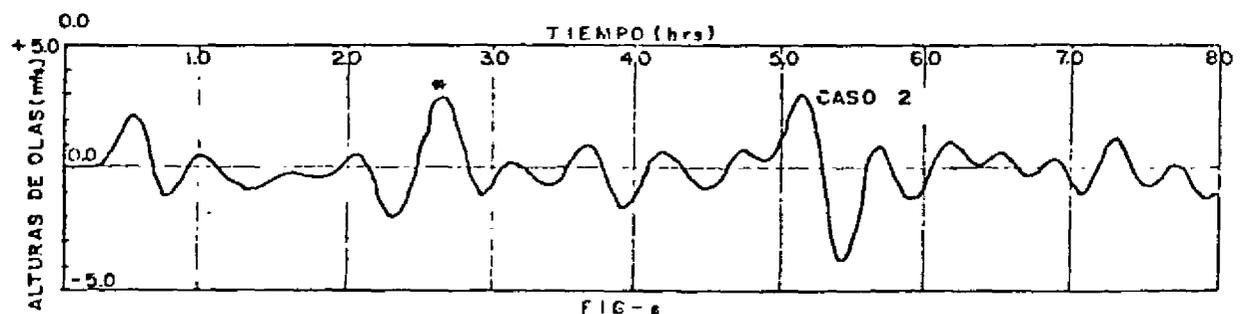
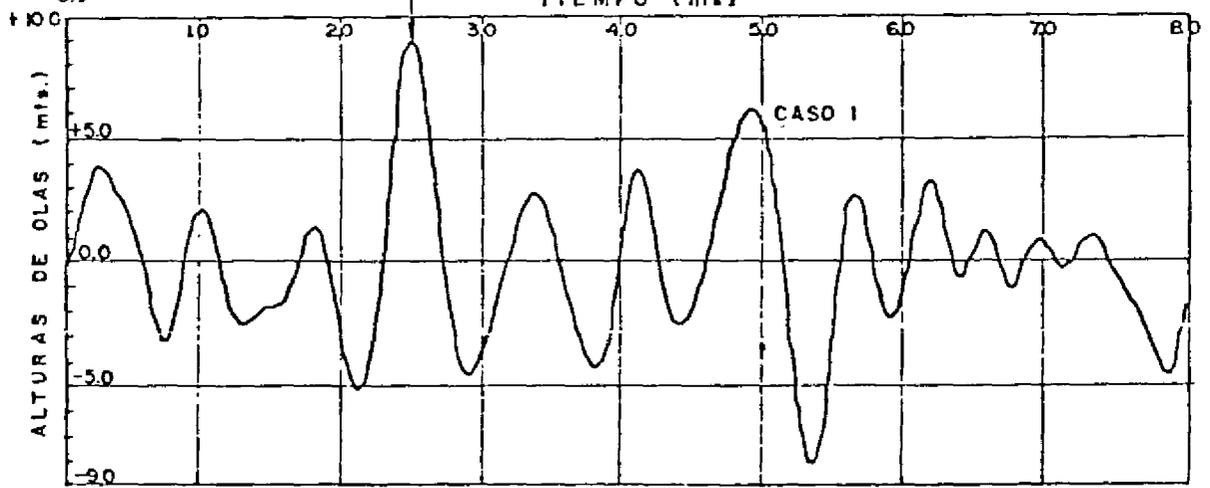
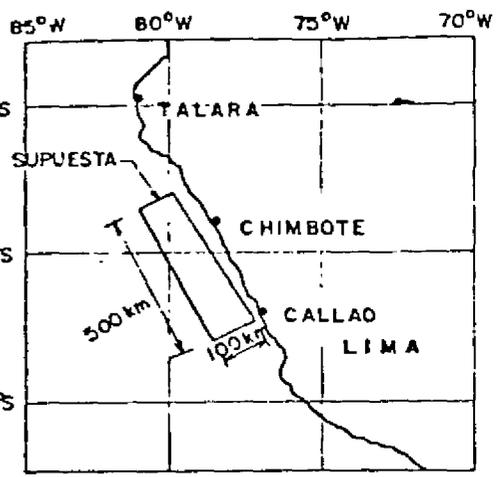
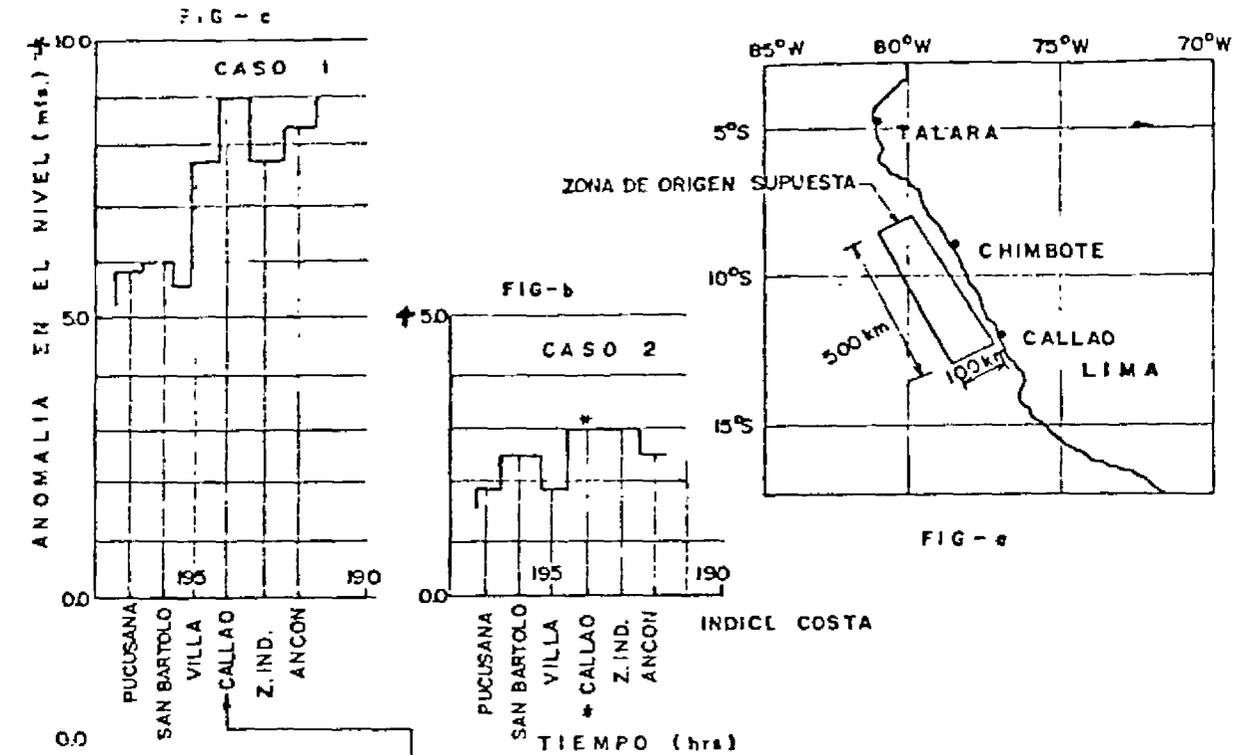
Cuando el presente estudio se estaba concluyendo, a pedido del Dr. John Tomblin de UNDRRO, el Sr. Paul Krumpe de la Oficina para Asistencia de Desastres en el Exterior del Gobierno Norteamericano, tuvo la gentileza de enviarnos el estudio efectuado por G.T. Hebenstreit y R.E. Whitaker que trata sobre posibles orígenes y efectos de tsunamis en la costa Oeste de Sudamérica, usando simulación numérica lineal por computadora. Basándose en informaciones históricas y tectónicas sobre zonas de silencio reportadas por Mc Cann y colaboradores, y comunicaciones personales de Brady y Spence, los autores asumen seis posibles zonas de origen de sismos tsunamigénicos que pueden afectar una extensa área comprendida entre Buenaventura (Colombia) y Concepción (Chile), analizando los efectos sobre 300 localizaciones ubicadas a lo largo de casi 5,000 kms. de costa.

Como la costa de Lima Metropolitana es una porción cubierta por dicho estudio, consideramos era de sumo interés incluir en este volumen un resumen de sus conclusiones más significativas. Cabe aclarar que no incluye suficientes detalles para su inmediata aplicación práctica. El tsunami modelado llega desde alta mar hasta donde la profundidad del agua es de 20 metros. Como en nuestro estudio se determina la altura de la ola en la orilla del mar, en función de la distancia recorrida por la ola desde la isobata 100 metros hasta la orilla, y se da énfasis a su aplicación de acuerdo a la batimetría y topografía local, ambos estudios son complementarios para el tramo de costa limeña.

De las zonas tsunamigónicas que los autores utilizan en su estudio, las que ellos denominan A y E tienen un alto riesgo de ocurrencia de sismos, y son las que producirían las olas de mayor altura en la costa central del Perú. Los tsunamis originados en las otras zonas afectarían más a Chile, y en menor medida la costa Sur Peruana.

Para el caso A, el área de origen del Tsunami es un rectángulo irregular que tiene 500 kms. de largo por 100 de ancho, y se extiende desde el Callao hacia el Norte, hasta la altura de Trujillo (Ver figura a). El evento sísmico asumido es de magnitud Kanamori  $M_w = 8.7$ . El caso E contempla una zona de origen que tiene 1,800 kms. de largo por 130 de ancho, y se extiende desde el Callao hasta Caldera (Chile), asumiéndose un sismo de  $M_w = 9.4$ . Este último caso no se comenta aquí porque estimamos muy remota la generación de un evento semejante. La historia no registra terremotos de tales características.

Para cada zona, los autores consideran dos casos: levantamiento uniforme del fondo oceánico, y levantamiento variable. Para la zona A, en el primer caso el levantamiento supuesto es de 5.8 metros en los 50,000 km<sup>2</sup> que abarca la zona de origen. Para un punto ubicado frente al Callao y donde la profundidad del agua es de 20 metros, la figura grafica la variación de la altura de las olas con el tiempo, y puede observarse que la primera ola llega a dicho punto 15 minutos después de ocurrido el supuesto terremoto (recordar hasta la isobata de 20 m.);



REGISTRO SIMULADO FRENTE A LIMA A 20mts. DE PROFUNDIDAD  
 1-- LEVANTAMIENTO UNIFORME 2-- LEVANTAMIENTO VARIABLE

y que la ola de mayor altura, 9 metros, ocurre 2hs 15m después. En la figura c se muestran las alturas máximas de olas para varios puntos si milares comprendidos entre Ancón y Pucusana.

En el segundo caso, el parámetro para desplazamiento medio fue ajustado para producir un desplazamiento máximo de 5.8 metros. Los desplazamientos menores que 0.05 metros fueron igualados a cero, para limitar la zona del levantamiento.

En la figura e se muestra la variación de la altura de ola con el tiempo para este caso. Puede verse que la primera ola incrementa rápidamente el nivel del mar 20 minutos después de ocurrido el sismo. La máxima altura de ola es de sólo 3 metros (marcada en el gráfico con un asterisco) y ocurre 2hs 35m después del levantamiento.

Con respecto a lo anterior, para el caso de levantamiento uniforme e instantáneo, el tiempo de llegada de la primera ola es de 15 minutos hasta el punto donde el mar tiene profundidad de 20 metros. De ahí hasta la costa, según las curvas de refracción de nuestro estudio tardaría 6 minutos más, de manera que el tiempo total es 21 minutos. Para el caso de levantamiento variable, en el punto antes señalado el nivel del agua empieza a incrementarse a los 20 minutos, a los que habría que agregar los 6 minutos. El tiempo de arribo de la primera ola sería entonces de 26 minutos. Ambos resultados están dentro del orden de magnitud de los nuestros.

Donde hay discrepancias es en la altura máxima de ola. Para la zona A, un sismo de la magnitud asumida tiene una probabilidad de ocurrencia muy baja, pero podría suceder. Pero lo que pensamos que no puede ocurrir realmente es que una área tan extensa como 50,000 km<sup>2</sup> se levante instantánea y uniformemente 5.8 metros. Esto no es posible ya que el fracturamiento de la falla se propaga a una velocidad promedio de 3.5 kms/seg.

La hipótesis simplificada produce valores más altos que si el levantamiento se propagara a velocidad finita y variable en toda el área. Estas condiciones están más cerca de la realidad, pero son difíciles de modelar para su estudio simulado por computadora.

Por las razones expuestas, creemos que la altura de las olas en el primer caso es en general exagerada, incluyendo los 9 metros frente al Callao (frente a Chimbote, casi en el centro del área perturbada, la altura máxima es de 14 metros).

Para el caso de levantamiento variable, la altura máxima frente al Callao es de 3 metros, debido a que esta localidad se ubica en el borde del área perturbada, donde el levantamiento oceánico es muy pequeño. En cambio, frente a Huacho, a 140 kms. al Norte, donde el levantamiento es ya importante (cercano al máximo), la altura de la ola es casi 5 metros (la máxima para este caso).

Comparando los resultados con los de nuestro estudio, donde las alturas máximas calculadas en función de las condiciones locales están entre los 5 a 7 metros, se puede concluir que ambos están dentro del mismo orden de magnitud.