

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL
TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996 EN
LA COSTA NORTE DEL PERU**

TESIS

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO CIVIL

CARLOS ALBERTO CARDENAS GARCIA

LIMA - PERU
1997

CONTENIDO

SUMARIO.....	xiii
CAPITULO 1 INTRODUCCION	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Finalidad.....	4
1.4 Alcances.....	5
1.5 Metodología.....	6
CAPITULO 2 ASPECTOS TEORICOS	
2.1 Definición de Tsunami.....	8
2.2 Como se Generan los Tsunamis.....	9
2.2.1 Sismo de Origen Tectónico.....	9
2.2.2 Por Grandes Erupciones Volcánicas.....	10
2.2.3 Por Derrumbes Submarinos o Superficiales.....	10
2.3 Tipos de Tsunamis.....	12
2.3.1 Origen Cercano.....	13
2.3.2 Origen Lejano o Transoceánico.....	13
2.4 Características de los Tsunamis.....	13
2.4.1 Velocidad de Propagación (v).....	13
2.4.2 Periodo (T).....	14
2.4.3 Longitud de Onda (L).....	15
2.4.4 Altura de Onda (H).....	16
2.5 Magnitud y Energía.....	16
2.5.1 Magnitud.....	18
2.5.2 Energía.....	20
2.6 Daños Producidos por Tsunamis.....	24
2.6.1 Daños producidos por el Momento de Flujo.....	25

2.6.2	Daños producidos por Inundación.....	25
2.6.3	Daños producidos por Socavamiento.....	25
2.7	Fuerzas Generadas.....	26
2.7.1	Fuerzas de Oleaje.....	26
2.7.2	Fuerzas de Arrastre.....	26
2.7.3	Fuerzas de Impacto.....	26
2.7.4	Fuerzas Hidrostáticas.....	26
2.7.5	Fuerzas de Empuje.....	27

CAPITULO 3 REGISTROS DE TSUNAMIS

3.1	Generalidades.....	28
3.2	Registro de Tsunamis en la Costa Norte.....	29
3.3	Probabilidad de Ocurrencia.....	31
3.4	Importancia de las Informaciones Históricas de los Tsunamis.....	34

CAPITULO 4 CRITERIOS PARA EVALUAR EL RIESGO POR TSUNAMIS

4.1	La Relación Sismo-Tsunami.....	36
4.1.1	Magnitud del Sismo.....	36
4.1.2	Profundidad del Hipocentro del Sismo.....	37
4.2	Area de Generación del Tsunami.....	37
4.3	Dirección de Propagación del Tsunami.....	39
4.3.1	Zonas de Aguas Profundas.....	39
4.3.2	Zonas Cercanas a la Costa.....	40
4.4	Estimación del Tiempo de Llegada de la Primera Ola a la Costa.....	40
4.4.1	Métodos Gráficos.....	41
4.4.2	Referencias Mareográficas.....	44
4.4.3	Referencias Históricas.....	45

4.5	Altura de Ola y Run-up.....	45
4.5.1	Altura de Ola (h).....	45
4.5.1.1	Fórmulas Empíricas.....	46
4.5.1.2	Métodos Numéricos.....	47
4.5.1.3	Registros Históricos.....	48
4.5.2	Run-up.....	48
4.6	Influencia de las Mareas en la Altura de Ola.....	51
4.7	Medidas de Protección ante Tsunamis.....	52

CAPITULO 5 LOCALIDADES ESTUDIADAS

5.1	Generalidades.....	55
5.2	Ubicación geográfica.....	56
5.2.1	Provincia Constitucional del Callao.....	56
5.2.2	Departamento de Lima.....	57
5.2.3	Departamento de Ancash.....	57
5.2.4	Departamento de La Libertad.....	58
5.3	Morfología del Litoral.....	61
5.4	Aspectos Oceanográficos.....	68
5.5	El Clima de la Costa.....	70
5.6	Geodinámica Interna de la Zona de Estudio.....	71
5.6.1	Origen y Generación de Sismos.....	71
5.6.2	Características Sísmicas de la Zona en Estudio.....	76

CAPITULO 6 DETERMINACION DE LA CAUSA DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996

6.1	Generalidades.....	80
6.2	Ubicación de la Elipse de Generación del Tsunami del 21 de Febrero de 1996.....	81

6.3	Procedimiento para determinar la Elipse de Generación del Tsunami del 21 de Febrero de 1996.....	83
6.4	Análisis y Discusión de Resultados.....	88
CAPITULO 7	EVALUACION DE DAÑOS Y EFECTOS	
7.1	Generalidades.....	103
7.2	Evaluación de Daños: Departamento de Lima.....	104
7.3	Evaluación de Daños: Departamento de Ancash.....	107
7.4	Evaluación de Daños: Departamento de la Libertad.....	115
7.5	Evaluación Final.....	119
CAPITULO 8	METOLOGIA PARA FORMULAR PLANES DE EVACUACION	
8.1	Generalidades.....	123
8.2	Planes de Evacuación.....	124
8.2.1	Localización y Delimitación de la Zona Crítica.....	125
8.2.2	Estudio de la Realidad Local.....	125
8.2.3	Zonas de Refugio.....	126
8.2.3.1	Refugios Temporales.....	126
8.2.3.2	Refugios de Emergencia.....	127
8.2.4	Determinación de las Rutas de Evacuación.....	129
8.2.4.1	Rutas de Evacuación Principales.....	129
8.2.4.2	Rutas de Evacuación Secundarias.....	130
8.2.5	Conjunto de Acciones Coordinadas a Ejecutarse durante el Proceso de Evacuación.....	130
CAPITULO 9	FORMULACION DEL PLAN DE EVACUACION PARA CHIMBOTE	
9.1	Generalidades.....	133

9.2	Plan de Evacuación de Chimbote.....	134
9.2.1	Formulación del Plan de Evacuación.....	134
9.2.2	Puesta en Funcionamiento del Plan de Evacuación.....	144
9.2.3	Estimación de los Posibles Efectos.....	145
9.3	Otras Localidades.....	147
CAPITULO 10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	160
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	167
	MATERIAL FOTOGRAFICO.....	170
	INDICE DE LAMINAS.....	200
	INDICE DE CUADROS.....	201
	INDICE DE FIGURAS.....	202
	ANEXOS.....	203

SUMARIO

Se estudia el tsunami del 21 de febrero de 1996, el cual ocasionó daños a lo largo de 600 km de costa, desde el Callao, por el sur, hasta Pacasmayo, por el norte. Los mayores daños materiales se produjeron en el trayecto Casma-Chimbote-Coishco-Salaverry, registrándose 21 víctimas entre Coishco y Santa.

Este tsunami es de gran interés científico debido a que fue generado por un sismo de moderada magnitud, cuando al respecto las estadísticas señalan que son aquellos sismos con magnitudes M_s mayores que 7 los que generan tsunamis, teniendo carácter destructivo si la magnitud supera el valor de 7,5. Recientemente, se ha designado con el nombre de sismo-tsunami a aquellos tsunamis destructivos generados por sismos de moderada magnitud. Tal es el caso del tsunami del 21 de febrero de 1996.

Los objetivos del estudio fueron cuatro. El primero fue determinar la causa del tsunami. El segundo objetivo consistió en realizar una evaluación de los daños y efectos ocasionados por el tsunami en estudio. El tercer y cuarto objetivo le dan utilidad práctica al estudio. En ese sentido, el tercer objetivo fue determinar el riesgo de desastres por tsunamis de las localidades ubicadas dentro de la zona de estudio, recomendando luego algunas medidas de prevención y protección de acuerdo a la realidad local. Para lograr este objetivo se aprovechó la lección dejada por el tsunami en estudio, así como de anteriores eventos, razón por la cual fue importante lograr el segundo objetivo. El cuarto objetivo consistió en elaborar el plan de evacuación para Chimbote en caso de tsunamis. Para las otras localidades ubicadas dentro de la zona de estudio se determinó el tiempo de llegada crítico de la primera ola del tsunami y la correspondiente altura que tendría en la costa, las cuales son dos informaciones importantísimas para ponerse a salvo de los tsunamis, y a partir de los cuales puede elaborarse el plan de evacuación.

Las informaciones que se recopilaron sobre las características del sismo y del comportamiento del tsunami en estudio, y los antecedentes que se tienen en nuestra zona de estudio sobre tsunamis generados por sismos tectónicos, nos llevó a plantear las siguientes hipótesis para lograr el primer objetivo:

(a) Que el foco debería estar ubicado cerca a la fosa de Lima, donde el espesor de la placa Sudamericana es menor y por lo tanto, se necesitaría menos energía para causar la ruptura de la superficie oceánica y su eventual desplazamiento vertical, componente que genera tsunamis.

(b) Que para que se generen tsunamis destructivos es necesario un mínimo tirante de agua por encima del "pistón" para que haya una eficiente transmisión de energía de la litósfera al medio líquido.

Para tratar de verificar la hipótesis (a) se utilizó el método gráfico conocido como Diagramas de Refracción. Este método sirve para determinar el tiempo que demora en llegar la primera ola del tsunami a la costa a partir de la fuente de generación, trazando para ello curvas de refracción cada minuto. Como es usual, se considera que la fuente de generación adquiere la forma de una elipse cuyo eje mayor es paralelo a la fosa y a la costa, que el centro de la elipse coincide con el epicentro del sismo generador, y que el tamaño de la elipse depende de la magnitud del sismo.

Según lo expresado líneas arriba, los Diagramas de Refracción suelen elaborarse conociendo previamente el epicentro y la magnitud del sismo. En cambio, nuestro interés fue conocer estos valores usando ese método. La solución fue entonces trazar curvas de refracción regresivas cada minuto, esto es, curvas desde la costa hacia el mar cada minuto con el propósito de ubicar la fuente de generación del tsunami. Estas curvas se trazaron desde los puertos de Chimbote y Salaverry debido a que se conocía en estos puntos el tiempo que tardó en llegar la primera ola del tsunami. El siguiente paso fue encajar una elipse tangente a estas curvas de refracción regresivas. De esta manera fue como se determinó el tamaño y ubicación de la fuente de generación, y en consecuencia, la magnitud y epicentro del sismo.

Se piensa que esta forma de hallar la zona perturbada por el sismo es más efectiva que usando registros del sismo obtenidos de estaciones simológicas ubicadas a miles de kilómetros de distancia.

Para tratar de verificar la hipótesis (b) se analizaron algunos tsunamis ocurridos en el pasado, determinando el tirante de agua por encima de la zona de ruptura de aquellos tsunamis destructivos, y de aquellos que ocasionaron poco daño o fueron prácticamente imperceptibles.

Al aplicar el método propuesto para la hipótesis (a) se encontró que la fuente de generación se ubicó cerca a la fosa de Lima (6308 m, IGN). El epicentro del sismo tuvo por coordenadas $9^{\circ} 29' S$ y $80^{\circ} 12' W$, siendo la distancia horizontal del foco a la fosa de 40 km aproximadamente. El tamaño de la fuente de generación indica que el área perturbada corresponde a un sismo de magnitud $M_s=6,8$. Sin embargo, se puede estimar con mayor certeza la magnitud del sismo si es que tomamos en cuenta la intensidad con que fue sentido en la costa. La mayor intensidad determinada fue de IV MM (Chimbote y Huarney), siendo menores en el resto de la costa. En consecuencia, es razonable pensar que la magnitud del sismo no pudo ser mayor que 6,8, sino menor, posiblemente entre 6,6 y 6,7; en otras palabras, un sismo de moderada magnitud. Estos resultados verifican la hipótesis (a).

Al llevar el centro de la elipse, o epicentro del sismo, a un plano batimétrico se determina que el tirante de agua sobre la zona de ruptura fue de 3 800 metros

aprox. El otro sismo tsunami ocurrido en años recientes es el de Nicaragua de 1992 de moderada magnitud, y epicentro ubicado en aguas profundas cerca a la fosa. El sismo prácticamente no se sintió en la costa. Sin embargo, el tsunami generado fue muy destructivo. La altura del tsunami fue de 9,7 metros y causó 168 víctimas. Frente a estos 2 ejemplos, se tienen otros 2 sismos de gran magnitud que generaron tsunamis muy pequeños: El sismo de Ancash de mayo de 1970, con $M_s=7,8$ y profundidad de agua 100 metros aproximadamente, y el sismo de Chile de marzo de 1985 con $M_s=8,2$, con la mitad de la zona perturbada en tierra y la otra mitad en el mar. Este sismo generó un tsunami casi imperceptible que llegó a tierra 5 minutos después de la ocurrencia del sismo. Estos casos de tsunamis nos indican que el tirante de agua por encima de la zona de ruptura jugaron un papel muy importante en la generación de tsunamis destructivos, con lo que se estaría demostrando la validez de la hipótesis (b).

A partir de los resultados obtenidos se pueden explicar algunas características del comportamiento del tsunami tales como número de olas, efectos de fricción de la masa de agua con el lecho marino, etc. Así, las tres olas registradas permiten deducir una instantánea dislocación del fondo oceánico, la cual puede darse por un sismo de moderada magnitud y epicentro cercano a la fosa. Por otro lado, la evaluación de daños indica que la mayoría de muertes se produjeron en las peñas, mientras que la penetración en tierra fue de pocos metros para lugares habitados, siendo mayor para zonas no habitadas o poco habitadas. Esta característica del tsunami puede deberse a los efectos de fricción entre la masa de agua y el lecho marino. En esta parte del Perú, las aguas son poco profundas. Prueba de ello es que la isóbata de los 200 metros se encuentra, en promedio, a 100 km de la costa. Cuando hay aguas profundas cerca a la costa el tsunami adquiere grandes alturas debido a que no hay mucha fricción, tal como sucede en Japón. Por eso, se piensa que el tsunami perdió parte importante de su energía debido a los efectos de fricción que le causó la plataforma continental, lo que impidió que el tsunami fuera más destructivo, cosa que no ocurrió, por ejemplo, en el sismo tsunami de Nicaragua, evento similar al estudiado, donde las olas alcanzaron 9,7 metros de altura causando 168 víctimas.

El Centro Internacional de Alerta contra Tsunamis informó que la magnitud del sismo fue $M_s=6,9$, siendo las coordenadas del epicentro 8° S y 81° W. Si trazamos curvas de refracción con estos datos obtenemos que la primera ola estaría llegando 4,5 minutos después que el tiempo registrado en el mareograma de Salaverry, y 15 minutos en el caso de Chimbote. En consecuencia, no se podría considerar esta ubicación del epicentro del sismo como la más probable. Por lo tanto, este es otro punto que refuerza los resultados que hemos obtenido.

Debemos decir que las hipótesis planteadas son ciertas para los casos anteriormente citados. Para que tengan validez científica es necesario verificarlo con

otros sismo-tsunamis que puedan ocurrir en el futuro o que ocurrieron pero no fueron estudiados bajo la óptica indicada. Este estudio es un paso a esa dirección.

La evaluación que se hizo para determinar el riesgo de desastre por tsunamis determina un alto riesgo en muchas de ellas. Mencionemos algunos ejemplos: La forma en V de Coishco favorece el aumento de la altura de ola. Chimbote se desarrolla en el borde de la bahía Ferrol, frente al mar, aunque se ve favorecida por la presencia de la Isla Blanca, una defensa natural contra tsunamis. Huacho tiene dos zonas bajas a nivel del mar lo que las hacen potencialmente inundables. En igual situación se encuentran los balnearios de Barranco, Miraflores y Puerto Chico, todos ellos en Barranca. Puerto Supe sufrió daños durante el tsunami del 21 de febrero de 1996. Las Delicias y Salaverry se encuentran prácticamente a nivel del mar, sufriendo el primero mayores daños debido al tsunami estudiado. Además, existen numeras caletas de pescadores, las cuales presentan un alto riesgo de desastre debido a los tsunamis. La situación descrita obliga pues a tomar las medidas preventivas del caso. Intensificar la educación de las autoridades y de la población sobre cuándo ocurren estos fenómenos y qué se debe hacer para protegerse, es el primer paso. Por otro lado, la evaluación del riesgo de desastre que efectuamos nos lleva a recomendar a las autoridades locales emprender una política de planificación de las zonas costeras, lo que también será favorable para el desarrollo de esos lugares. Es evidente que debe existir la voluntad política para hacer esto, lo cual puede conseguirse educando a las autoridades sobre estos fenómenos.

Una de las localidades estudiadas con categoría de ciudad es Chimbote, la cual ejerce una influencia importante en toda el área vecina. El Puerto de Chimbote es uno de los principales del Perú. Chimbote es la capital del acero y la pesca del Perú, dando trabajo y generando divisas para el país. La población de Chimbote es de 284 500 habitantes según proyecciones del INEI. La ciudad se encuentra frente al mar y prácticamente a nivel del mismo.

La mencionado anteriormente nos dice la importancia que tiene Chimbote, y la necesidad de que cuente con un Plan de Evacuación en caso de Tsunamis. Parte importante del plan consiste en determinar la altura de ola, con lo cual se estima la zona inundable; el tiempo de llegada de la primera ola, que es el tiempo disponible para evacuar la zona inundable; las vías de evacuación y los refugios temporales. En ese sentido, y de acuerdo al cuarto objetivo, se formuló el Plan de Evacuación para Chimbote en caso de tsunamis.

El Plan de Evacuación para Chimbote se formuló en base a la metodología utilizada en el CISMID. Dicha metodología consiste en abordar, de manera secuencial, los siguientes puntos: localización y delimitación de la zona crítica,

estudio de la realidad local, zonas de refugio, rutas de evacuación y finalmente, la formulación del conjunto de acciones coordinadas a ejecutarse durante la evacuación. El Plan de Evacuación así formulado tendrá por objetivo permitir a la población acceder rápidamente hacia lugares de mayor cota topográfica, lejos del área inundable.

Para determinar el tiempo de llegada de la primera ola a la costa se empleó nuevamente el método gráfico de los Diagramas de Refracción, en el que también se indica la dirección de ataque del tsunami, así como una concentración o dispersión de la energía a medida que se aproxime a la costa. Para determinar la altura de la ola en el momento de la inundación se utilizó la fórmula empírica de Yamaguchi, considerando además el efecto que produce el nivel de la marea y la braveza del mar.

Los cálculos determinaron que la altura de ola más probable que se presentaría en la costa de Chimbote sería de 3,80 m, considerando el efecto de la marea y la braveza del mar. Pero el análisis del comportamiento de ésta altura dentro de la bahía determinó, finalmente, una altura de 5,0 m para el vértice de la misma y alrededores, siendo de 4,0 m para el resto de la costa. Por otro lado, se calculó que el tiempo crítico de llegada de la primera ola a la costa sería de 25 minutos.

De acuerdo a los resultados anteriores, se determinó la zona potencialmente inundable en Chimbote. Dada la cercanía del límite inundable y el máximo límite de inundación con avenidas muy conocidas, se vió conveniente elegir a éstas avenidas como aquellos límites, debido a que son muy conocidas en Chimbote, lo cual favorecería a la divulgación del Plan de Evacuación. La zona inundable así delimitada permite ver que muchas actividades públicas y privadas se desarrollan dentro ella. Por ejemplo, son numerosos los colegios que se han ubicado dentro de esa zona. También, se ha observado que allí se encuentran, aparte de las compañías pesqueras existentes, diversas instalaciones como la del SIMA. Por otro lado, en base al censo de 1993 se ha estimado que la población afectada sería de 18 400 habitantes, pero será mucho mayor si el tsunami ocurre en horas puntas de cualquier día laborable.

Se ha determinado también que los tsunamis ocasionarían diversos grados de daños a lo largo de la ciudad, pudiendo ser la zona menos afectada la comprendida desde la urbanización La Caleta hasta la altura del Hotel de Turistas de Chimbote. Por el contrario, la zona expuesta a mayores daños se ubica a lo largo del vértice de la bahía y alrededores. Es en esta zona donde se encuentran precisamente la mayoría de los colegios y las diversas fábricas e instalaciones, así como numerosos pueblos jóvenes y asentamientos humanos, siendo ésta última la población con menor capacidad económica de recuperación en caso de desastre, por lo que se recomienda que la ayuda se oriente preferentemente hacia ese lugar. El número de postas y carpas puede determinarse en función de la población mencionada líneas arriba.

Se ha propuesto que la alerta natural contra tsunamis lo constituya un sismo cuya intensidad MM sea superior o igual a VIII y cuya duración sea de 45 segundos o más, pero teniendo presente que un aumento o descenso del nivel del mar fuera de lo normal, precedido por un sismo de baja intensidad en la costa, puede ser la señal de que se está acercando un tsunami cuyo origen se encuentre a cientos de kilómetros de la costa. Esto último de acuerdo a la lección que nos dejó el tsunami estudiado.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta tesis permiten decir lo siguiente:

Que el tsunami registrado el 21 de febrero de 1996 fue generado por un sismo cuya magnitud Ms se estima entre 6,6 y 6,7. Las coordenadas del epicentro del sismo fueron 9,5° S y 80,2° W, distante 185 km de la ciudad de Chimbote y a 40 km de la fosa, teniendo como profundidad focal 21 km. La altura de agua por encima de la zona de ruptura fue de 3 800 m. Estos resultados nos dicen que fué un sismo de moderada magnitud y epicentro cercano a la fosa el agente perturbador que generó el tsunami destructivo.

Que de acuerdo a lo anterior, se concluye que la magnitud y profundidad focal de los sismos pueden ser datos insuficientes para determinar la presencia de tsunamis destructivos en la costa. Los resultados obtenidos luego de analizar anteriores tsunamis en nuestra zona de estudio indican que el tirante de agua por encima de la zona de ruptura influyó de manera importante en la generación de tsunamis destructivos. Por esta razón, se piensa que los futuros eventos que ocurran tendrán mayores posibilidades de ser destructivos si es que el sismo generador se ubica en aguas profundas. Si tomamos en cuenta que en nuestra zona de estudio la profundidad de 200 m se encuentra, en promedio, a 120 km de la costa, se deduce entonces que lo anterior puede darse para aquellos sismos que ocurran entre la isóbata de los 200 m y la fosa.

Que la principal alerta contra tsunamis lo constituye un sismo cuya intensidad en la costa sea mayor o igual a VIII MM y larga duración. Sin embargo, debe tenerse presente que los tsunamis suelen ser precedidos por un aumento o disminución del nivel de la marea fuera de lo normal, razón por la cual, ésta característica debe ser la principal alerta contra tsunamis cuando la intensidad del sismo no sea considerable en la costa.

Que el material empleado en la construcción de las viviendas de muchas de las localidades estudiadas, así como la posición de éstas localidades respecto al mar, determinan un alto riesgo de desastre ante la ocurrencia de sismos y tsunamis. Esta

situación obliga, pues, a intensificar las campañas de prevención. En ese sentido, los cálculos efectuados en esta tesis del tiempo crítico de llegada de la primera ola del tsunami y la altura que tendría en la costa son un aporte para tal fin.

Que gran parte de las actividades comerciales públicas y privadas se desarrollan dentro de la zona inundable determinada para Chimbote en caso de tsunamis. Así mismo, son numerosos los colegios que se ubican en esta zona. Se ha estimado en 18 400 habitantes la población que se vería en peligro. Por lo tanto, se recomienda efectuar, simultáneamente, simulacros de evacuación en caso de sismos y tsunamis. El plan de evacuación para Chimbote, formulado en esta tesis, también es un aporte para tal fin.

Se recomienda a las autoridades locales la planificación de las zonas costeras. Como esto sólo puede realizarse si existe la voluntad política de hacerlo, es necesario entonces intensificar las campañas de educación entre las autoridades locales sobre qué son los tsunamis y los efectos que pueden ocasionar en la costa.

Finalmente, esta tesis propone una metodología que permitirá reproducir gráficamente la propagación de cualquier tsunami ocurrido en el pasado si tenemos como datos los mareógrafos de dos o más estaciones mareográficas dentro de la zona de interés. Reproducir la propagación del tsunami significará obtener información respecto del sismo previo al tsunami, tales como epicentro, magnitud, etc.; y de esta manera identificar cuáles son las zonas del fondo oceánico donde es muy posible esperar que ocurran futuros eventos.

Se espera que los resultados de esta tesis contribuyan al conocimiento de los sismo-tsunamis, y sean de utilidad a las medidas de prevención que se efectúen contra los desastres que ocasionan los tsunamis.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

Debido a su posición geográfica, el Perú se encuentra ubicado en una de las zonas sísmicas más activas del mundo conocida como Círculo Circumpacífico. Por tal motivo, muchos sismos han afectado nuestro país desde épocas remotas, y muchos lo harán en el futuro. De todos los sismos que han afectado el Perú, algunos han sido tan severos que han originado fenómenos secundarios conocidos como tsunamis.

Los tsunamis son fenómenos que se originan en las profundidades de los océanos y muchas veces de consecuencias más funestas que el sismo previo que la generó. Los siguientes ejemplos nos dan una idea de los daños que provocan los tsunamis:

a) La cifra de 27 000 víctimas fue el saldo trágico que dejó en el Japón el tsunami de 1896; otras 1 000 personas perecieron en el de 1933. El 22 de Mayo de 1960 ocurrió, frente a la costa sur de Chile, un terremoto que ocasionó olas gigantescas que produjeron 61 muertes; registrándose además daños por valor de US\$ 22 millones en las islas Hawaii, donde 199 personas perecieron, y la destrucción de casi 5 000 estructuras en el Japón.

b) El Callao, principal puerto del Perú, fue destruido en 1668 y 1746 por tsunamis, siendo este último el que más daño causó, muriendo el 97% de los 5 000 habitantes.

Estos ejemplos, y otros que sería largo enumerar, nos dicen claramente que debemos prepararnos para tales eventos.

Se estima que un sismo de magnitud M_s mayor que 7 y profundidad focal menor que 50 kilómetros (sismos superficiales) generan tsunamis destructivos, conociéndose a aquellos sismos como sismos tsunamigénicos. Sin embargo, el 21 de febrero de 1996 se produjo un sismo con epicentro frente a la costa de Chimbote, que según el IGP fue de magnitud $M_s=5,7$; el cual fue sentido en Chimbote y Huarney con intensidad IV en la escala de Mercalli Modificada, siendo de intensidades menores en el resto de la costa. Por su parte, el Centro Internacional de Alerta contra Tsunamis, con sede en Honolulu (Hawaii), dió como magnitud del sismo $M_s=6,9$, comunicando que no se había generado tsunami como consecuencia del sismo, por lo que las autoridades nacionales no activaron la alerta entre la población. Aproximadamente una hora y ocho minutos después de ocurrido el sismo, hacia su aparición en

la costa de Chimbote la primera de las tres olas registradas, causando muchas víctimas así como numerosos daños materiales.

La situación descrita anteriormente se debió a que el tsunami del 21 de febrero de 1996 correspondió a un fenómeno sobre el cual se ha investigado poco, debido a que sólo han ocurrido algunos casos, como el tsunami del 2 de setiembre de 1992 en Nicaragua. A éstos fenómenos se les denomina sismos tsunamis.

Estudiar como se generan y propagan los tsunamis en nuestra zona de estudio permitirá, pues, lograr una mejor prevención y mitigación de los desastres que ocasionan este tipo de eventos.

En Julio de 1992 se inició el "*Programa Nacional para la Prevención y Mitigación de Desastres en el Perú - PNPMD*", que está siendo conducido por el Departamento de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas con sede en Ginebra (DHA-Geneva) y el Instituto Nacional de Defensa Civil del Perú (INDECI), contando con el apoyo técnico del CISMID a través del Departamento de Planeamiento y Mitigación de Desastres. Los objetivos del PNPMD para el año 2000 son:

1. Que todos los peruanos, por remoto que sea el lugar de su residencia, conozcan qué situaciones de desastre se pueden producir en su comunidad y qué deben hacer para protegerse.

2. Que todas las construcciones públicas y privadas que se efectúen en el país estén adecuadamente protegidas contra los desastres.

Como contribución al PNPMD, la presente tesis trata del estudio del tsunami del 21 de Febrero de 1996 y la evaluación de los efectos que ocasionó, realizando ésta evaluación en las zonas que sufrieron los mayores daños. Como medida de protección se formula el Plan de Evacuación para Chimbote, la misma que deberá ser aprovechada para llevar a cabo simulacros de evacuación. En esta tesis se propone también el crecimiento de las localidades pequeñas hacia zonas seguras, lejos de la zona potencialmente inundable.

1.2 Objetivos

De acuerdo a lo anterior, los objetivos que persigue esta tesis son:

- a) Determinar la causa que dió origen al tsunami y estudiar su propagación hacia la costa.

- b) Evaluar los efectos ocasionados.

- c) Realizar una evaluación del riesgo por desastre ante un futuro evento para aquellas ciudades y localidades comprendidas en este estudio, y en base a esto, recomendar medidas de protección; y

- d) Elaborar el Plan de Evacuación para Chimbote.

1.3 Finalidad

Como puede deducirse, la finalidad principal es evitar las pérdidas de vidas humanas y conseguir mitigar los daños materiales.

1.4 Alcances

Las localidades tomadas en cuenta para la elaboración de esta tesis están comprendidas desde el Callao, por el sur, hasta Pacasmayo, por el norte. Se tuvo referencias que en ésta zona se presentaron los mayores daños, principalmente el tramo Salaverry-Coishco-Chimbote-Casma. En total, el tramo de costa estudiado abarca una extensión de 600 kilómetros aproximadamente.

Para determinar la causa que dió origen al tsunami haremos uso del método gráfico conocido como Curvas o Diagramas de Refracción, el cual permite reproducir el avance del tsunami desde la fuente de generación hasta su arribo a la costa.

La formulación del Plan de Evacuación estará cimentado por dos resultados previos fundamentales: tiempo de llegada de la primera ola y la altura de ésta en la costa (área inundable). El Plan de Evacuación así formulado tendrá por objetivo permitir a la población acceder rápidamente hacia lugares de mayor cota topográfica, dirigiéndose hacia zonas seguras donde previamente se estableció los denominados refugios temporales, los que darán cobijo a la población afectada. La formulación del Plan de Evacuación para Chimbote obedeció a las siguientes razones:

1. El alto riesgo de desastre debido a la ubicación desfavorable de esta ciudad respecto al mar.
2. El registro de los efectos destructivos ocasionados por anteriores tsunamis en Chimbote, incluyendo éste último evento.
3. La falta de Planes de Evacuación; y

4. La facilidad de disponer de información básica como son: planos básicos de la ciudad, planos topográficos, etc.

Para determinar el tiempo de llegada de la primera ola emplearemos nuevamente el método gráfico del Diagrama de Refracción, en el que también se indica la dirección de ataque del tsunami, así como una concentración o dispersión de la energía del tsunami a medida que se aproxime a la costa. La altura de ola quedará determinada haciendo uso de la fórmula de Yamaguchi, teniendo presente el nivel de la marea y la braveza del mar.

1.5 Metodología

La metodología empleada responde a la utilizada en el CISMID para formular Planes de Evacuación. Dicha metodología consiste en abordar, de manera secuencial, los siguientes puntos: localización y delimitación de la zona crítica, estudio de la realidad local, zonas de refugio, rutas de evacuación y finalmente, la formulación del conjunto de acciones coordinadas a ejecutarse durante la evacuación.

La metodología empleada para estudiar la causa del tsunami consiste en elaborar un Diagrama de Refracción en el que el *tiempo calculado* de arribo de la primera ola concuerde con el *tiempo registrado* de la misma en los mareogramas de los puertos de Salaverry y Chimbote; y en base al diagrama anterior, analizar el tamaño y ubicación de la fuente de generación del tsunami. De esta manera se puede conocer las características del sismo previo al tsunami.

La presente tesis titulada "**Estudio de las Causas y Efectos del Tsunami del 21 de Febrero de 1996**", fue elaborada en el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) a través del Departamento de Planeamiento y Mitigación de Desastres (DPMD) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería; contando con el apoyo técnico de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (HIDRONAV), a través del Departamento de Medio Ambiente.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2.1 Definición de Tsunami

Tsunami es una palabra de origen japonés. Tsu significa puerto y nami se traduce como ola. Los tsunamis consisten en el movimiento de las aguas profundas de los océanos, originados por un agente perturbador que actúa en las profundidades del mar. Al acercarse a la costa en forma de ondas, parte de la energía que poseen durante la propagación se pierde por efectos de fricción con el lecho marino y la otra parte se transforma en potencial; pudiendo luego, debido a diversos factores, originar grandes olas cuando llegan a la costa.

El agente perturbador es generalmente un sismo o una erupción volcánica submarina.

En alta mar pasan desapercibidas, pero cuando llegan a la costa pueden ser catastróficos. Los tsunamis son más peligrosos cuando se originan cerca de tierra firme, aunque no siempre sucede esto.

El de Sanriku, Japón, del 15 de Junio de 1896 destruyó 10 000 casas y ocasionó la muerte a 27 000 personas. El Callao, Perú, fue arrasado por un tsunami en octubre de 1746, que causó la muerte de 4 600 personas de un total de 4 800.

A veces recorren largas distancias; el formado en el terremoto de Lisboa (1775) llegó a Noruega, Islandia, Isla Antigua y Agadir.

Es importante distinguir entre lo que es un tsunami, que son movimientos de aguas profundas, y los maretaos, que son movimientos de aguas superficiales. Lo que equivale a diferenciar lo que es una onda y una ola. Las ondas son el resultado de movimientos vibratorios, mientras que la ola es un movimiento complejo que tiene por origen diversas causas y muy en particular el viento.

2.2 Como se Generan los Tsunamis

Los tsunamis pueden ser generados por cualesquiera de los siguientes fenómenos:

2.2.1 Sismo de Origen Tectónico. En nuestro país es la causa más común de generación de tsunamis. Cuando el tsunami es generado por un sismo, a dicho sismo se le conoce como *sismo*

tsunamigénico, es decir, no todos los sismos generan tsunamis. Para que un sismo sea considerado como sismo tsunamigénico deberá presentar ciertas características que las detallaremos más adelante.

La forma como los sismos generan tsunamis podría explicarse así: *al producirse el sismo se originan fallas en el fondo del océano. Estas fallas consisten en grandes rupturas que ocasionan un desplazamiento horizontal y/o vertical de dos superficies. Levantamientos y/o desplazamientos se diría. Una falla vertical actúa como un émbolo que levanta la masa de agua encima de ella, lo que produce un intercambio de energía de la litósfera a la masa de agua, provocando que ésta última se irradie en varias direcciones.* En la Figura 2.1 se muestra este proceso.

Se asume que en los fondos oceánicos las superficies perturbadas tienen la forma de elipses alargadas, en donde el eje mayor coincide con el eje de falla.

2.2.2 Por Grandes Erupciones Volcánicas. Esta forma de generación de tsunamis se presenta en porcentaje mucho menor. Se conocen muy pocos casos de tsunamis originados por esta causa. Como ejemplo tenemos el caso de Cracatoa, Indonesia, en 1833.

2.2.3 Por Derrumbes Submarinos o Superficiales. A los tsunamis generados de esta forma se les conoce como de origen local. Es un ejemplo el ocurrido durante el terremoto de Alaska en 1964. El sismo provocó un derrumbe que causó un gran deslizamiento en una bahía, originándose luego el tsunami.



Figura 2.1 Diversas causas de generación de los tsunamis

Sin embargo, no se puede considerar este mecanismo como el principal generador de los tsunamis, ya que se sabe que todos los tsunamis importantes han estado precedidos por sismos o erupciones volcánicas submarinas.

Las avalanchas submarinas, que ocurren en las pendientes de las grandes fosas marinas del Pacífico, es otra forma de generación de tsunamis.

Estas tres formas de generación presentadas son las más comunes. Existen otras causas menores, como las provocadas por el hombre. Es así que las explosiones nucleares o atómicas en el mar pueden originar tsunamis. La prueba realizada en 1954 por los Estados Unidos en el atolón de las Islas Bikini, produjo un pequeño tsunami que fue registrado en la costa del Japón.

2.3 Tipos de Tsunamis

El tipo de tsunami es determinado por la distancia de la costa al punto donde se origina el tsunami. Mencionamos que un tipo de tsunami es de Origen Local. Pero la mayoría de ellos son de Origen Cercano y de Origen Lejano o Transoceánicos.

2.3.1 Origen Cercano. Se consideran de origen cercano cuando el tsunami se genera a una distancia cercana a la costa. De ahí su nombre. Podemos cuantificar esta distancia diciendo que va de unos pocos kilómetros hasta unos cientos de kilómetros. Son los más peligrosos ya que el tiempo de llegada a la costa es corto (la primera ola llega entre 7 a 30 minutos después del sismo).

Parte de la costa peruana se ha visto afectada por estos tipos de tsunamis, los cuales han sido generados por sismos cuyos epicentros se localizaron a lo largo de la fosa que se extiende entre el Callao (Perú) y Valdivia (Chile), causando mucho daño como lo señalan los diferentes registros que se tienen al respecto.

2.3.2 Origen Lejano o Transoceánico. En este caso el tsunami se genera a cientos de kilómetros de distancia. Muchas veces al otro lado de los océanos. Los tsunamis de origen lejano afectan a la costa de manera diferente que los tsunamis de origen cercano. Mientras que los tsunamis de origen lejano llegan con periodos muy grandes, de 40 a 70 minutos, los tsunamis de origen cercano llegan con periodos de 7 a 30 minutos.

2.4 Características de los Tsunamis

Al hablar de los tsunamis debemos recordar que son ondas grandes, teniendo estas ondas como principales características o parámetros la Altura de la Ola (H), la Amplitud de la Ola (A), la Longitud de la Ola (L), el Periodo de la Ola (T), la Velocidad de Fase (C_w) y la Velocidad de Grupo de la Ola (C_g), la Velocidad de la Partícula (v), la Pendiente de la Ola (S), el Perfil de la Ola (n), etc. Sin embargo, podemos estudiar los tsunamis con los parámetros más importantes de las ondas, las cuales son: Velocidad de Propagación, Periodo, Longitud de Onda y Altura de Onda.

2.4.1 Velocidad de Propagación (v). La velocidad de propagación del tsunami en agua profunda viene expresada por la fórmula siguiente:

$$v = \sqrt{g d}$$

v = velocidad en m/s

g = 9,8 m/s²

d = profundidad de la masa de agua en metros

La fórmula anterior nos dice claramente que la velocidad es función de la altura d , que es la profundidad del océano o profundidad de la masa de agua.

Si asumimos como profundidad promedio del Océano Pacífico la mitad de la profundidad máxima, que es de 11 022 m, el tsunami tendría una velocidad de 837 km/h, velocidad similar a la de un avión jet.

Al viajar el tsunami en un mar de profundidad variable, la dirección de propagación se realiza desde las zonas más profundas hacia las menos profundas. Este es el mismo fenómeno que se observa en el caso de las olas de viento y es llamado *Refracción de Ondas*.

A medida que la onda se acerque a la costa, la velocidad va disminuyendo hasta hacerse mínima, según la relación $v = \sqrt{g d}$. Pero la onda adquiere energía potencial, que se manifiesta luego en la altura de ola en la costa y que es la que provoca los daños.

2.4.2 Periodo (T) . Se define como el intervalo de tiempo determinado por el paso de dos crestas sucesivas por un punto fijo. Se ha establecido, en forma teórica, que en la zona de origen del

tsunami se generan ondas que se propagan en varias direcciones con un amplio espectro de periodos.

El periodo se ve modificado durante la propagación de la onda, debido a los accidentes de fondo y causas oceanográficas. Al aproximarse la onda hacia la costa, el periodo se ve influenciado también por las condiciones batimétricas locales. Recordemos que el periodo depende si el tsunami es de origen lejano o cercano, siendo de 40 a 70 minutos para el primero y de 7 a 30 minutos para el segundo.

Desde un punto de vista práctico, el periodo viene a ser el intervalo de ataque de las sucesivas olas que conforman el tsunami.

TAKAHASHI propone para calcular el periodo

$$\log T = 0,57 M_s - 2,85$$

T = periodo en minutos

M_s = magnitud del sismo en la escala de Richter

2.4.3 Longitud de Onda (L). Es la distancia que separa a dos crestas sucesivas. Se estima que la longitud de onda inicial es aproximadamente igual a la dimensión mayor (eje) del área dislocada del fondo oceánico. Inicialmente los valores de las longitudes de ondas son grandes, pudiendo ser desde unas decenas de kilómetros hasta unos 240 km aproximadamente, lo que explicaría que su paso por altamar es difícilmente percibido por los navegantes.

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

$$L = v T$$

L = longitud de onda en m

v = velocidad de propagación en m/s

T = periodo en segundos

Por ejemplo, un tsunami que en un instante tiene un periodo de 20 minutos y que viaja con una velocidad de 200 m/s, tendrá una longitud de onda de 240 km.

2.4.4 Altura de Onda (H) . Es la distancia entre la cresta y el valle de la respectiva longitud de onda. En alta mar este valor también pasa desapercibido porque llega a ser de apenas unos decímetros y la longitud de onda varias decenas de kilómetros (hasta 240 kilómetros), pero en el litoral pueden alcanzar grandes alturas que se conocen como Altura de Ola. Las mayores alturas de ola han excedido los 30 m al llegar a la costa, como el ocurrido en Sanriku ,Japón, en 1933. La Figura 2.2 muestra las cuatro características de los tsunamis descritas.

2.5 Magnitud y Energía

Para poder clasificar a los tsunamis de acuerdo a su magnitud y energía, se necesitarían registros instrumentales regulares de las ondas en las proximidades de la fuente, lo que no se ha logrado todavía. Es por esto que la clasificación se basa principalmente en sus manifestaciones cerca de la costa.

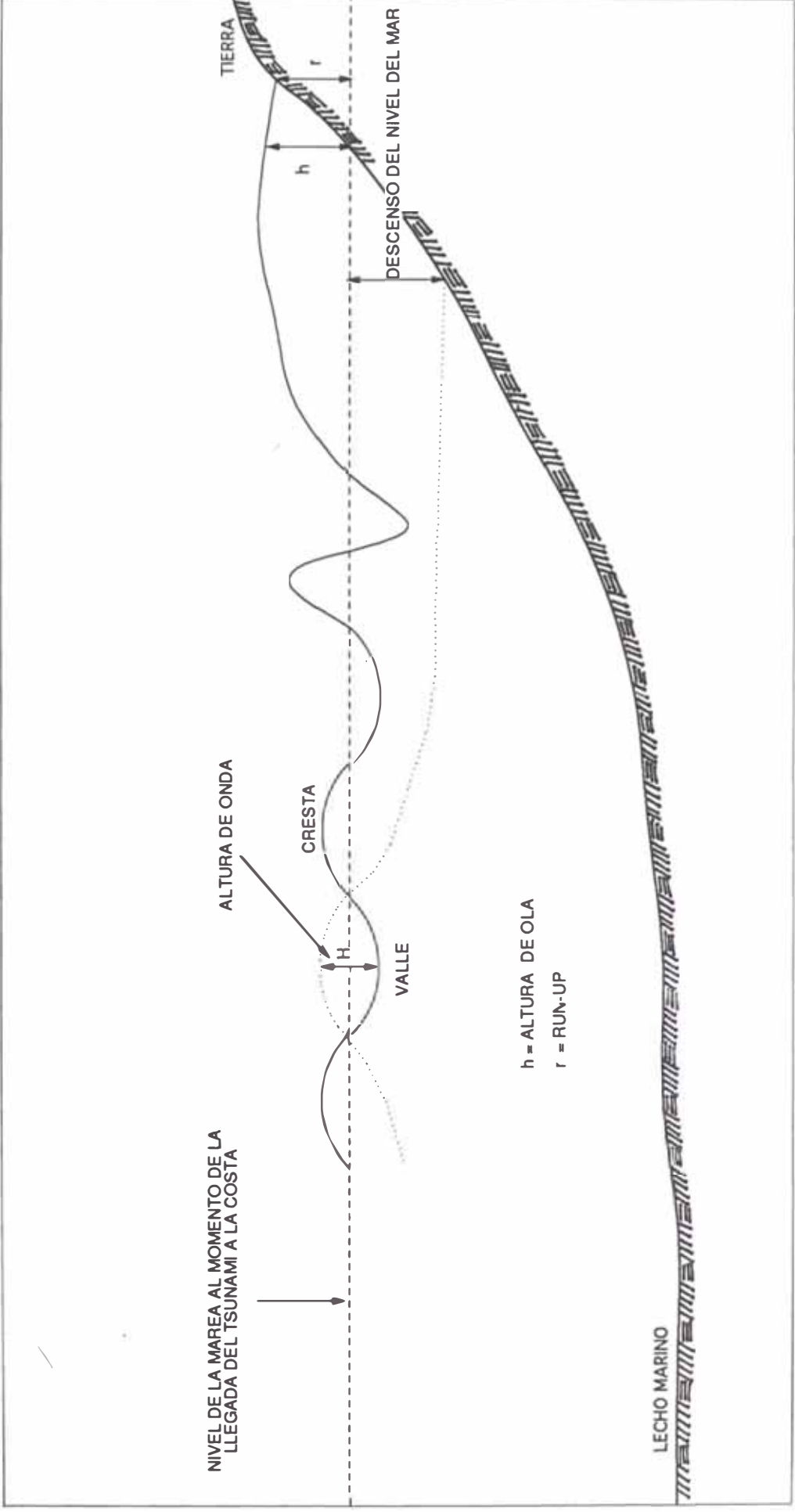


Figura 2.2 Parámetros característicos de los tsunamis

2.5.1 Magnitud. En la actualidad, diferentes autores nos dan diferentes criterios de como medir la magnitud de un tsunami. Las escalas más conocidas son las de IMAMURA, la cual está basada en la máxima altura que alcanza la ola y la destrucción que causa en la costa; y la de IIDA, que está basada en la energía del tsunami y considera que cada vez que la energía se duplica corresponde a un incremento de 0,5 en la magnitud del tsunami. IMAMURA dedujo su escala observando los efectos de los tsunamis en las costas japonesas, sobre todo en Sanriku, donde sabemos que 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 en cuenta las condiciones locales.

Se ha determinado que la magnitud del tsunami, y por lo tanto su poder destructivo, dependen de varios factores:

1. Magnitud del sismo y su profundidad focal.
2. El área de dislocación de la corteza terrestre, que depende de la velocidad y de la manera en que se deforma el fondo oceánico.
3. Rutas de propagación del tsunami, que depende de la topografía submarina (batimetría).
4. Influencia de la orientación del eje de la bahía con respecto al epicentro.

5. Configuración de la bahía, que tiende a modificar la altura del tsunami; y

6. Topografía de la zona inundada.

Otros autores como WATANABE, ABE, SOLOVIEV y ADAMS sostienen que la escala de magnitud del tsunami no debe ser solamente un índice de la intensidad del tsunami en una localidad específica, sino que debe estar relacionado con la energía total del tsunami.

CUADRO 2.1

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 arrasados y/o destruidos.
2	4 a 6	Edificaciones, embarcaciones y personas son arrastradas.
3	10 a 20*	Graves daños a lo largo de 400 km de costa.
4	Más de 30*	Graves daños a lo largo de más de 500 km de costa.

* Nota del Autor: Estas alturas se alcanzarían si se tienen aguas profundas cerca de la costa, y los vértices de bahías en forma de U,V,W.

CUADRO 2.2

MAGNITUD DEL TSUNAMI SEGUN IIDA

Grado del Tsunami	Energía (Ergios)	Máxima Altura del Run-up (m)
5,0	25,6 x 10 ²³	32
4,5	12,8	24 - 32
4,0	6,4	16 - 24
3,5	3,2	12 - 16
3,0	1,6	8 - 12
2,5	0,8	6 - 8
2,0	0,4	4 - 6
1,5	0,2	3 - 4
1,0	0,1	2 - 3
0,5	0,05	1,5 - 2
0,0	0,025	1 - 1,5
-0,5	0,0125	0,75 - 1
-1,0	0,006	0,50 - 0,75
-1,5	0,003	0,30 - 0,50
-2,0	0,0015	0,30

En esta escala se indica el valor de la máxima altura del run-up. El run-up es la máxima altura que la ola alcanza en tierra firme.

2.5.2 Energía. Para medir la energía de un tsunami existen también diversos criterios. WILSON, WEBB Y HENDRICKSON consideran que la energía E_T de un tsunami esta dada por la fórmula siguiente:

$$E_T = \frac{1}{8} \rho g H^2 L$$

E_T = energía hidrodinámica del tsunami (ergios)

ρ = densidad del agua de mar (gr/cm^3)

g = gravedad (m/s^2)

H = altura de onda (m)

L = longitud de onda (m)

IIDA considera que un 10% de la energía sísmica de los terremotos tsunamigénicos es transformada en energía hidrodinámica E_T ; y según GUTEMBERG Y RICHTER la energía sísmica se puede obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$\log E = 1,5 M_s + 11,8$$

E = energía de un sismo (ergios)

M_s = magnitud del sismo en la escala de RICHTER

En 1981 KAJIURA propone una nueva relación para medir la energía total del tsunami. Esta relación toma en cuenta el problema de la saturación de las amplitudes de las ondas sísmicas que sufren la escala de RICHTER en el caso de grandes sismos ($M_s > 7,5$)

$$\log E_T = 2 M_\omega + \log F + 5,5$$

E_T = energía total del tsunami (ergios)

M_ω = magnitud de KANAMORI

F = constante que toma en cuenta los parámetros de falla.

$$F_{MAX} = 0,1$$

Durante la propagación la mayor parte de la energía tiende a

concentrarse en el frente de onda, la cual es liberada con un gran poder destructivo cuando llega a las líneas costeras. Recordemos, cuando el tsunami se propaga por aguas profundas la pérdida por fricción con el fondo marino no es muy significativa; es por esto que el tsunami mantiene casi toda su energía hasta el momento en que llega a encontrarse con la plataforma continental, que le provoca una gran pérdida de su energía debido a efectos de fricción. La plataforma continental se extiende a lo largo de nuestra costa de modo variable, tal como se verá en el Capítulo 3.

Para poder entender mejor el concepto de energía de un tsunami, debemos tener presente la ley de GREEN. El conocimiento de la ley de GREEN es importante también para entender el método de las *Curvas o Diagramas de Refracción* .

Según esta ley, se puede considerar que la energía de un tsunami se mantiene constante a través de un canal formado por 2 líneas imaginarias ortogonales, a pesar que la fricción a lo largo del lecho marino y otras causas disipen la energía ondular. La variación del ancho de este canal imaginario, originado por la variación de la profundidad del agua, indicará ya sea una concentración o bien una dispersión de la energía del tsunami.

En la Figura 2.3 se muestra un esquema que representa el avance del tsunami en un instante dado. Si en ella llamamos B el ancho del canal, la energía que fluye por este es

$$E_T = \frac{1}{8} B \rho g H^2 L$$

Suponiendo que el periodo se mantiene constante en ese instante y haciendo uso de la expresión básica de la velocidad de ondas tenemos que

$$C = L/T = \sqrt{gd} \quad \text{entonces} \quad L = T \sqrt{gd}$$

y obtenemos
$$E_T = \frac{1}{8} B \rho g H^2 T \sqrt{gd}$$

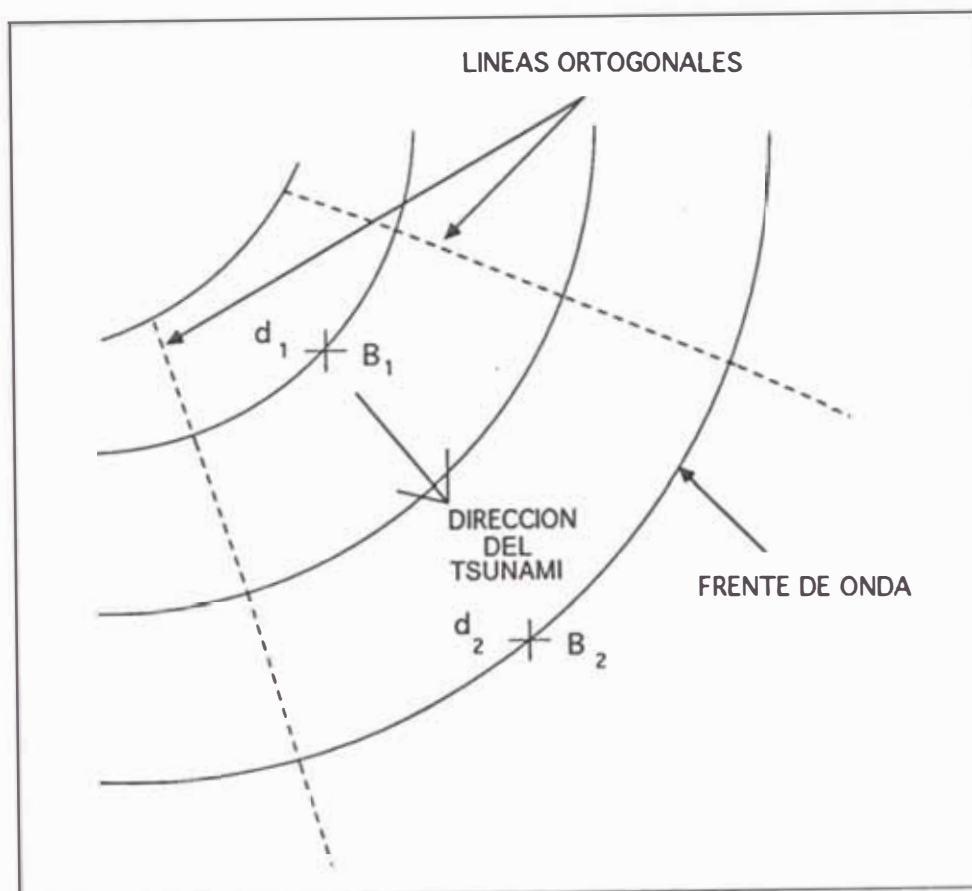


Figura 2.3 Representación esquemática del avance del tsunami en un instante dado.

En la figura anterior aplicamos el principio de la conservación de la energía entre los puntos 1 y 2

$$\text{Energía en la posición 1: } E_T = \frac{1}{8} B_1 \rho g H_1^2 T \sqrt{g d_1}$$

$$\text{Energía en la posición 2: } E_T = \frac{1}{8} B_2 \rho g H_2^2 T \sqrt{g d_2}$$

Como la energía se mantiene constante, se tiene $E_1 = E_2$, reemplazando obtenemos la ley de GREEN

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{1/4} \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1/2}$$

H = altura de onda

d = profundidad del mar

B = ancho del frente de onda

siendo esta relación útil para poder determinar los coeficientes de concentración o dispersión de energía y que se aplica en los *Curvas de Refracción*.

Finalmente diremos que existen actualmente numerosas investigaciones acerca de los tsunamis, su modo de generación, su propagación en aguas profundas, su comportamiento cuando llega a tierra y los daños que ocasiona sobre la población y las obras de ingeniería civil.

2.6 Daños Producidos por Tsunamis

Se ha observado que los tipos de daños producidos por los tsunamis son principalmente los siguientes: daños producidos por el Momento

del Flujo, daños producidos por Inundación, daños producidos por Socavamiento

2.6.1 Daños producidos por el Momento de Flujo. La masa de agua impacta contra las construcciones, muros, árboles, etc. Provoca que colapsen las estructuras no muy resistentes. El impacto es incrementado por los objetos que arrastra la corriente. Cuando el agua retorna ocasiona mayores daños debido a que arrastra mayor cantidad de objetos.

Se ha observado que los daños producidos por el momento del flujo son más graves en bahías en forma de V, que son azotados por tsunamis de periodos cortos.

2.6.2 Daños producidos por Inundación. Si la velocidad del flujo al momento de ingresar el tsunami no es muy grande, la inundación puede originar que las casas de madera que no estén fuertemente ligadas a la cimentación floten, y que las otras obras y edificaciones únicamente tengan daños producidos por el agua al irrumpir en ellos.

2.6.3 Daños producidos por Socavamiento. Se ha observado que cuando el tsunami se aproxima a la costa mueve el fango y arena del fondo del mar, socavando las cimentaciones de las estructuras portuarias. En este caso, las estructuras colapsan por falla en la cimentación. Este ha sido el caso de falla de algunos muelles sobre pilotes.

Este problema de socavamiento también se produce cuando

el reflujo socava las cimentaciones. Esta socavación también puede alcanzar la cimentación de las líneas de ferrocarril, carreteras, líneas de transmisión de energía eléctrica, etc. Como una manera de prevenir tales socavaciones, la cimentación debe ser protegida con rocas o bloques de concreto.

2.7 Fuerzas Generadas

De la observación de estos tipos de daños se llega a la conclusión de que el tsunami, al actuar sobre las estructuras, genera principalmente los siguientes tipos de fuerzas: de Oleaje, de Arrastre, de Impacto, Hidrostáticas y de Empuje.

2.7.1 Fuerzas de Oleaje. Causadas por el borde de ataque de la ola chocando contra la estructura.

2.7.2 Fuerzas de Arrastre. Causadas por la alta velocidad del tsunami.. Estas fuerzas desplazarán edificios u otras estructuras en la dirección de la corriente y la alta velocidad de flujo causará una gran erosión en la cimentación.

2.7.3 Fuerzas de Impacto. Causadas por edificaciones, botes u otros materiales arrastrados por la corriente. Estas fuerzas podrían destruir otras edificaciones por impacto, los cuales sumados a otras fuerzas moverán las estructuras con dirección del flujo o producirán su colapso total.

2.7.4 Fuerzas Hidrostáticas. Causadas cuando las estructuras se encuentran total o parcialmente sumergidas. Estas

fuerzas son relativamente pequeñas comparadas con las fuerzas de arrastre.

2.7.5 Fuerzas de Empuje. La estructura se encuentra parcial o totalmente sumergida. Cuando el agua se introduce bajo una estructura, las fuerzas de empuje tienden a elevar la estructura y arrancarla de su cimentación.

Capítulo 3

Registros de Tsunamis

3.1 Generalidades

Recordemos que la causa más frecuente de generación de tsunamis es un sismo submarino asociado con deformaciones del fondo oceánico. A su vez, los factores que determinan el potencial tsunamigénico del sismo son la magnitud, la profundidad focal, la ubicación del epicentro y el mecanismo de falla: modo de ruptura, magnitud y dirección del desplazamiento.

La ocurrencia de los sismos en general y los terremotos en particular, es un fenómeno inherente al proceso evolutivo del planeta, esto significa que los movimientos sísmicos estuvieron presentes desde el momento en que nuestro planeta empezó su desarrollo y que aun hoy continúan modelando la superficie

terrestre.

El Perú se encuentra ubicado en una zona de subducción donde la generación de sismos es frecuente. Una revisión de la información macrotectónica y sismológica del territorio peruano nos dice que toda la actividad sísmica del territorio peruano es de tipo tectónico, sólo en el sur y muy esporádicamente ocurren sismos pequeños de tipo volcánico. De todos los sismos tectónicos, los mayores y más destructivos ocurren en el área oceánica-costanera, que son los que han generado tsunamis. Los tsunamis así generados son de diferente intensidad. Como es natural, los más destructivos son los menos frecuentes. En nuestro país se han presentado con mayor frecuencia tsunamis en la costa central y sur. La costa norte no presenta una mayor historia respecto a la ocurrencia de tsunamis que las zonas central y sur, pero cuando han ocurrido ocasionaron mucho daño.

El Capítulo 3 será dedicado a estudiar la posibilidad de ocurrencia de tsunamis en la costa norte del Perú, zona que mencionamos, no presenta una mayor historia respecto a la ocurrencia de tsunamis. Analizaremos para ello, en forma secuencial, los siguientes puntos: registro de tsunamis en la costa norte, probabilidad de ocurrencia, y finalmente la importancia de las informaciones históricas.

3.2 Registro de Tsunamis en la Costa Norte

La historia nos dice que se han presentado tsunamis en el Perú. Desde hace cerca de 400 años este tipo de olas se han presentado

en nuestras costas unas 24 veces, generados por terremotos submarinos cercanos o lejanos, siendo los primeros los que han ocasionado mayores daños a la población costera.

En el transcurso de toda la historia escrita de la humanidad sólo ha quedado registrada la ocurrencia de unos mil tsunamis. En realidad, frecuentemente ocurren tsunamis, pero debido a su pequeña amplitud es que no tienen importancia desde el punto de vista de proteger a la población y son a menudo confundidos con mareas u otros fenómenos marinos.

Una revisión de la ocurrencia de sismos y tsunamis que afectaron al Perú nos muestra que el sur presenta un mayor registro de estos fenómenos que la zona norte. La sustentación de esta afirmación se basa en el hecho de que la fosa que extiende entre el Callao (Perú) y Valdivia (Chile) es la que a través de los años ha generado la mayoría de los sismos, muchos de los cuales han sido tsunamigénicos. En el Cuadro 3.1 presentamos una estadística de los grandes sismos y tsunamis que afectaron tanto a la costa norte y sur de nuestro país.

CUADRO 3.1
SISMOS Y TSUNAMIS EN LA COSTA PERUANA

Costa	Sismos y Tsunamis
	Periodo 1555-1974
Norte	53
Centro	61
Sur	96

Tomado de SILGADO

El tsunami del 21 de febrero, que afectó gran parte de la costa peruana, fue la señal que nos hizo recordar que también se producen tsunamis en la costa norte y que debemos estar preparados para futuros eventos. Tarde o temprano los tsunamis visitan todas las costas del Océano Pacífico. Es importante entonces empezar a formular Planes de Evacuación que permitan mitigar los efectos ocasionados por tsunamis para todas las localidades asentadas en el litoral

3.3 Probabilidad de Ocurrencia

En todo el Océano Pacífico, los tsunamis de intensidad máxima $I=4$ se repiten por término medio una vez cada diez años; los de intensidad mayores o iguales a 3, una vez cada tres años; los de intensidad mayores o iguales a 2, una vez cada año; los de intensidad mayores o iguales a 1, una vez cada 8 meses; y los de una intensidad mayores o iguales a cero, una vez cada cuatro meses. En el Océano Pacífico se producen aproximadamente tres veces por mes tsunamis de una altura de 10 cm o más. Estas estimaciones promedias son correctas sólo para largos periodos de tiempo (100 años). Para periodos más cortos, la frecuencia de tsunamis (especialmente los grandes) se puede desviar de la simple ley de Poisson que describe la frecuencia de eventos raros.

En particular, durante los últimos 50 años en la región noroeste del pacífico ha habido una marcada tendencia a la agrupación de los grandes tsunamis (intensidades mayores que cero) en grupos de periodos de cinco o seis años de promedio.

SOLOVIEV (1972) ha estimado la probabilidad de generación de tsunamis por un sismo de magnitud M que ocurre en una zona que tiene un factor T de tsunamicidad, donde T es la razón de la frecuencia de tsunamis n a la frecuencia de terremotos N

$$T = \frac{n}{N}$$

El factor T es menor que 1 en las zonas de las Aleutianas-Alaska, Japón, etc; es mayor que 1 para el mar del Japón, el archipiélago de las Filipinas, etc; y es cercano a 1 para las otras zonas. En otras palabras, cuanto más superficial es la fuente sísmica y cuanto más cercana está de la costa, mayor es la probabilidad de generación de tsunamis.

SILGADO efectuó un estudio sobre la recurrencia de tsunamis en la costa occidental de Sudamérica. Determinó una relación intensidad frecuencia para tsunamis originados cerca a la costa sudamericana (costa de Perú-Chile). Para obtener esto analizó los datos de sismos tsunamigénicos ocurridos en el periodo 1746-1974, del Catálogo de Tsunamis de SOLOVIEV.

En el Cuadro 3.2 se muestra los periodos de retorno que obtuvo. Por ejemplo para un sismo tsunamigénico de grado 8,0 se predice un periodo de retorno de casi 50 años. A su vez el Cuadro 3.3 muestra la probabilidad de ocurrencia de un sismo tsunamigénico. Así por ejemplo, un sismo de magnitud 8,5 o más tiene una probabilidad de ocurrencia del 44 % en un periodo de 50 años. En cambio, un sismo de magnitud 8,0 tiene una probabilidad de ocurrencia de 62% para el mismo periodo de retorno.

CUADRO 3.2
PERIODO DE RETORNO DE UN SISMO TSUNAMIGENICO

MAGNITUD RICHTER	PERIODO DE RETORNO
7,0	28,0
7,5	32,5
7,75	37,5
8,0	47,3
8,2	64,7
8,4	125,0
8,5	250,0

Tomado de SILGADO (1978)

CUADRO 3.3
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE UN SISMO
TSUNAMIGENICO

MAGNITUD RICHTER	AÑOS	PROBABILIDAD %
8,0 o mayores	50	62
	100	85
	150	94
8,5 o mayores	50	44
	100	59
	150	73

Tomado de SILGADO (1978)

Como se observa en los resultados anteriores, las costas de Perú y Chile tiene un alto riesgo de ocurrencia de sismos tsunamigénicos. Específicamente la costa del Perú ha sufrido los estragos de estos fenómenos desde mucho tiempo atrás.

Los terremotos tsunamigénicos tienden a ser en su mayoría de desplazamiento vertical, este mecanismo de falla es el que ocurre en la costa del Perú. De acuerdo a los resultados de STANDER (1975) la línea de falla se encontraría paralela a nuestra costa.

3.4 Importancia de las Informaciones Históricas de los Tsunamis

En muchos lugares de la costa no se cuenta con instrumentos que nos puedan proporcionar valiosos datos como el tiempo de llegada de la primera ola, la altura que alcanzó, el periodo de ataque de las mismas, etc; es por esto razón que se recurre a informaciones históricas que nos puedan brindar un estimado de estos valores.

El registro histórico nos proporciona, algunas veces, el tiempo de llegada de la primera ola a la costa; la altura de ola; los límites de inundación y los tipos de edificaciones que fueron arrasadas y destruidas en algunas localidades. También nos proporciona la magnitud, epicentro y profundidad focal de los sismos tsunamigénicos ocurridos en la zona. Estos valores estimados ayudan mucho al momento de delimitar el plano de inundación y las rutas de evacuación. Cuanto más registros se tengan de los tsunamis que han afectado a la localidad, mayores serán las posibilidades de adoptar buenas medidas de mitigación Es posible

estimar entonces: la zona potencialmente tsunamigénica, las características de los sismos tsunamigénicos que ocurren en ella, el tiempo de llegada de la primera ola y la máxima altura que alcanzó la ola. También nos proporcionan que tipos de edificaciones fueron afectadas y las que no sufrieron daño alguno.

A través de toda la información de que se dispone y que cubre un periodo de más de cuatrocientos años, los sismos han dejado en el Perú un saldo trágico aproximado de ochenta mil muertos, decenas de millares de heridos y una destrucción material evaluada en el orden de decenas de millones de soles. En el futuro es de esperar que los efectos de los sismos se reduzcan a un mínimo. Las construcciones de concreto armado y ladrillo están paulatinamente reemplazando a las de adobe en casi todas las principales ciudades del Perú, dejando de lado las ornamentaciones.

Capítulo 4

Criterios para Evaluar el Riesgo por Tsunamis

4.1 La Relación Sismo - Tsunami

Según lo explicado en el Capítulo 2, los tsunamis pueden ser generados por sismos. Para que un sismo sea capaz de generar tsunami debe reunir ciertas condiciones, siendo las principales la magnitud y profundidad del hipocentro de dicho sismo. Estas condiciones se explican a continuación.

4.1.1 Magnitud del Sismo. Una expresión general que nos indica el límite más bajo de la magnitud M_s de un sismo tsunamigénico esta dada por la siguiente relación

$$M_s = 6,3 + 0,005 D_f \quad (\text{IIDA})$$

siendo D_f la profundidad focal en kilómetros.

Magnitudes menores obtenidas por esta relación no generan tsunamis. La magnitud del sismo es un indicador de la cantidad de energía que será transmitida de la litósfera a la masa de agua; esta energía transmitida será la suma, esencialmente, de energía potencial más energía cinética del tsunami. Cuanto mayor sea la energía transmitida, mayores serán las energías potencial y cinética y esto se pondrá de manifiesto cuando el tsunami se propague por el mar y llegue luego a las costas. La cantidad de energía transmitida la podemos estimar con las fórmulas dadas en el Capítulo 2.

IIDA concluye que para terremotos con focos pocos profundos y magnitudes menores que 6,4 es improbable el desarrollo de tsunamis, mientras que magnitudes superiores a 7,15 pueden desarrollar tsunamis extremadamente peligrosos.

4.1.2 Profundidad del Hipocentro del Sismo. Los sismos de foco poco profundo generan un desplazamiento vertical rápido del fondo marino, lo que a su vez provoca un levantamiento de la masa de agua por encima de ella, debido al efecto de émbolo o efecto de pistón que se origina. Aquellos sismos con desplazamientos horizontales de la falla generalmente producen tsunamis menores.

4.2 Area de Generación del Tsunami

Es la zona donde comienza la propagación del tsunami. Se asume que tiene forma elíptica, con el eje de falla coincidente con el eje mayor de esta elipse. 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

ondas 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 falla dominante.

Para determinar el tamaño de la elipse se emplearán las siguientes fórmulas:

a) Relación entre el eje mayor (a) con la magnitud Ms del sismo

$$\log a = \frac{2}{3} Ms - 2,93 \quad (\text{IIDA})$$

donde:

a = eje mayor de la elipse en kilómetros

Ms = magnitud del sismo en la escala de Richter

b) Relación entre el eje mayor (a) y el eje menor (b)

$$\frac{b}{a} = 3,77 - 0,42 Ms \quad (\text{HOTARI})$$

donde:

a = eje mayor de la elipse en kilómetros

b = eje menor de la elipse en kilómetros

Ms = magnitud del sismo en la escala de Richter

c) Relación entre la longitud de la falla y la magnitud del sismo

$$Ms = 6,27 + 0,63 \log L$$

donde:

L = longitud de la falla (km)

Ms = magnitud del sismo (Richter)

Esta expresión fue propuesta por WILSON, WEBB Y HENDRICKSON.

La determinación del área de generación es muy importante para graficar las Curvas de Refracción .

4.3 Dirección de Propagación del Tsunami

El tsunami al atravesar el océano va modificando sus características. En efecto, cuando el tsunami viaja en un mar de profundidad variable la dirección de propagación gira gradualmente hacia aguas someras. Este es el mismo fenómeno que se observa en el caso de olas de viento y es llamado Refracción de Ondas.

Debido a lo anterior, la altura del tsunami se ve modificado en cada una de sus etapas de propagación, ya sea en zonas de aguas profundas o en zonas cercanas a la costa.

A continuación se enumeran los factores que modifican la altura del tsunami en cada una de estas etapas.

4.3.1 Zonas de Aguas Profundas. Estudios teóricos demuestran que al producirse un desplazamiento vertical instantáneo de una superficie respecto a la otra, se produce una amplitud inicial del tsunami (altura de onda) igual al desplazamiento vertical. Caso contrario, cuando se produce un desplazamiento vertical gradual, la amplitud inicial del tsunami es igual a la mitad del

desplazamiento vertical. Dado que en alta mar el valor de la altura de onda pasa desapercibido, porque llega a ser de apenas 1 a 2 metros, concluimos que los desplazamientos verticales de los fondos marinos son de este mismo orden de magnitud.

4.3.2 Zonas Cercanas a la Costa. Son varios los factores que se conjugan de diferentes modos para modificar la altura de ola. Estos factores son, entre otros, la batimetría, forma de las islas, formas de las bahías, puntas, penínsulas y demás accidentes costeros. Estos accidentes pueden causar resonancia de ondas, refracción, reflejar la energía de onda; provocan además que la ola desarrolle grandes alturas, con el consiguiente aumento de su poder destructivo. En el punto 4.5 mencionamos fórmulas para estimar la altura de ola.

Respecto a la energía, mencionamos que la mayor parte tiende a concentrarse en el frente de onda, la cual es liberada con un poder destructivo tremendo cuando llega a las líneas costeras. Los accidentes marinos pueden constituir obstáculos o causar la convergencia de la energía de las ondas.

4.4 Estimación del Tiempo de Llegada de la Primera Ola a la Costa

El tiempo de llegada de la primera ola es el lapso de tiempo computado desde que se genera el tsunami hasta su arribo a la costa. El tiempo de llegada depende de la zona - topografía submarina - por la cual se propaga el tsunami y de los accidentes presentes en el litoral. Es por esto que para el mismo tsunami

existen diferentes tiempos de llegada a los diferentes puntos de la costa. El tiempo de llegada depende también si se trata de tsunamis de origen local, cercano o lejano. En general, puede ser desde unos minutos hasta muchas horas.

Para poder cuantificar el tiempo de llegada existen principalmente tres procedimientos: Métodos Gráficos, Referencias Mareográficas y Referencias Históricas

4.4.1 Métodos Gráficos. Podemos estimar el tiempo de llegada en forma gráfica. Para ello debemos de tener en cuenta si estamos frente a un tsunami de origen lejano o de origen cercano. En ambos casos estamos considerando que la causa que dió origen al tsunami fue un sismo con epicentro ubicado en el fondo oceánico.

a) Determinación del Tiempo de Llegada para Tsunamis de Origen Lejano.

El tiempo de llegada se determina de unas cartas proporcionadas por el Sistema Internacional de Alarma con sede en Honolulu (Hawaii), las cuales son elaboradas teniendo en cuenta la esfericidad de la tierra. Estas cartas nos proporcionan el tiempo que demora la primera ola del tsunami en llegar a una localidad costera elegida en el Océano Pacífico.

b) Determinación del Tiempo de Llegada para Tsunamis de Origen Cercano: Curvas de Refracción.

En este caso se utiliza el modelo de propagación que consiste en el trazado de Curvas de Refracción. 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 aplicables a grandes áreas por la curvatura terrestre; en este caso, el viaje se calcula por las cartas de proyección mencionadas anteriormente. El mínimo tiempo, es decir, la condición más crítica, se obtiene si se ubica el centro de la elipse justo frente al punto de interés de la costa.

En estos diagramas también se observa el avance del tsunami y las posibles zonas de convergencia o divergencia de la energía del tsunami.

La metodología para el trazo de las Curvas 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. Este comportamiento en términos hidráulicos se puede explicar de la siguiente manera: *un flujo a través de un canal de ancho y profundidad constantes y donde no se consideren pérdidas de fricción con el fondo y las paredes, constituye un flujo invariable en el tiempo y en el espacio; pero, si se modifican estas condiciones, si el ancho del canal disminuye, el tirante de agua aumentará; si el ancho aumenta, el tirante disminuirá.*

La metodología que se sigue en esta tesis para trazar las Curvas de Refracción es la siguiente:

1. Determinar la superficie elíptica. Las longitudes de los ejes

mayor y menor de la elipse pueden calcularse, según IIDA y HOTARI respectivamente, en función de la magnitud del sismo M_s , con las siguientes expresiones:

$$\log a = \frac{2}{3} M_s - 2,93 \quad \text{IIDA}$$

$$\frac{b}{L} = 3,77 - 0,42 M_s \quad \text{HOTARI}$$

Se supone que la onda parte de los bordes de la elipse, considerándose este borde como el primer frente de onda.

2. El valor de a estará limitado por el valor de la longitud máxima de la falla local, y el valor de b por el ancho de la interfaz de contacto de las placas.

3. De acuerdo con informaciones históricas de dirección dominante de falla y de posición relativa respecto a la costa en estudio, se ubica la elipse sobre un plano batimétrico, donde las coordenadas del centro de la elipse coincidirá con las coordenadas del epicentro del sismo generador.

4. El perímetro de la superficie de generación se dividirá en partes iguales. Esto porque se supone que en el instante inicial, la propagación del tsunami se inicia por canales de igual energía debido, según lo explicado anteriormente, a que no existe pérdidas por fricción.

5. Sobre cada punto de división se levantarán líneas ortogonales, y sobre cada línea se marcará la distancia horizontal

que recorre el tsunami en un tiempo dado. Este tiempo lo fijamos nosotros, pudiendo ser de cada 10", 5" ó 1". Hemos visto que $v = \sqrt{gd}$, suponiendo la velocidad constante para cada tramo recorrido tenemos que la distancia horizontal es $e = \sqrt{gd} t$.

6. Los nuevos puntos obtenidos se unen formando otra superficie o frente de onda

7. El proceso de trazo de nuevos frentes de ondas se continúa hasta llegar a la costa. El tiempo de llegada del primer frente de onda a la costa será el tiempo de llegada de la primera ola a la misma.

En el diagrama de refracción se observará la concentración o dispersión de la energía del tsunami. Un ensanchamiento del canal indicará una dispersión de energía, mientras que un angostamiento significará concentración de energía.

4.4.2 Referencias Mareográficas. Los mareógrafos son instrumentos que registran las variaciones del mar las 24 horas. En el mareograma que se obtiene quedan registrados la hora de ocurrencia del sismo, así como la hora en que el nivel del mar comienza a elevarse o descender de manera continúa. Por simple diferencia obtenemos el tiempo de llegada de la primera ola. Muchas veces con este tiempo de llegada se formulan los planes de evacuación para las localidades costeras.

En nuestro país existen mareógrafos instalados en Talara, Salaverry, Chimbote, La Punta, San Juan, Matarani y Eten.

4.4.3 Referencias Históricas. Las referencias históricas son importantes en lugares donde no se cuente con mareógrafos u otros registros instrumentales que nos puedan indicar valores confiables del tiempo de llegada de la primera ola. Por ejemplo, el sismo del 28 de octubre de 1746 ocurrió a las 10:30 p.m., y la primera ola llegó al Callao a las 11:00 p.m., es decir que el tiempo fue de 30 minutos.

Recordemos que el tiempo de llegada de la primera ola es el tiempo que se dispone para evacuar a la población de la zona inundable.

4.5 Altura de Ola y Run-up

Los conceptos de Altura de Ola y Run-up son importantes al momento de delimitar nuestra zona de inundación. Tales conceptos se explican a continuación.

4.5.1 Altura de Ola (h). La altura de ola se define como la distancia vertical entre la parte superior de la ola y el nivel medio del mar en el momento que el tsunami llega a la costa. Cuando el tsunami llega a la línea costera debemos hablar de altura de ola, pero cuando se propaga en altamar debemos hablar de altura de onda.

En Japón se ha podido observar que influye de manera importante en la altura de ola, en tsunamis de origen cercano, el ángulo que forma el eje de una bahía con respecto a la dirección del origen del tsunami. Los efectos son aun mayores en las bahías que se abren directamente hacia el origen del tsunami.

Así, se ha determinado que los siguientes factores influyen en la Altura de Ola:

1. Configuración de la bahía.
2. Pendiente de la bahía; y
3. Periodo natural de oscilación de la bahía.

Para calcular la Altura de Ola se utilizan generalmente tres procedimientos: Fórmulas Empíricas, Métodos Numéricos y Estudio de Registros Históricos.

4.5.1.1 Fórmulas Empíricas. Existen muchas fórmulas para calcular la Altura de Ola, siendo las siguientes las más conocidas

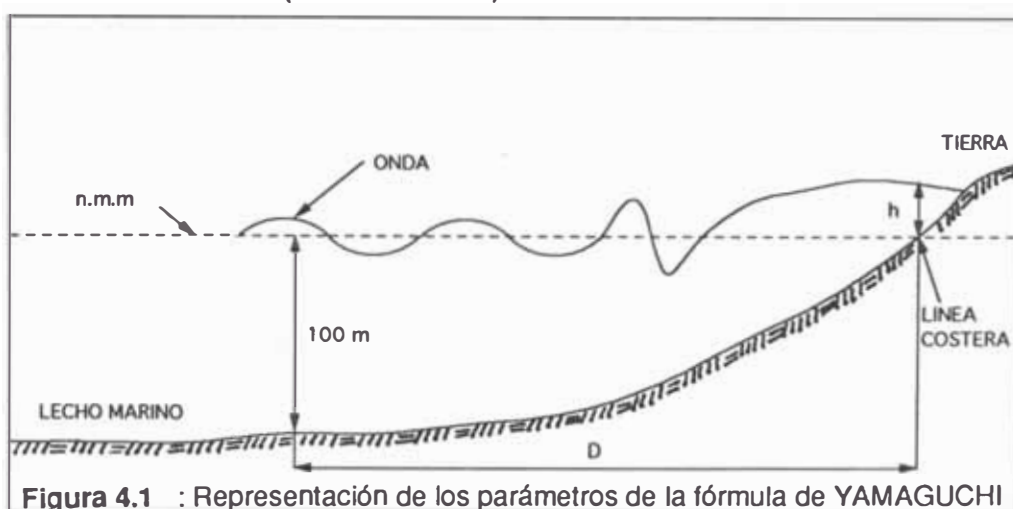
a) *Fórmula de YAMAGUCHI.* Esta relación toma en cuenta la distancia que hay desde la costa hasta la isóbata de 100 m.

$$h = 12,3 e^{-0,067 D}$$

donde :

h = altura de ola en la línea costera (m)

D = distancia desde la costa hasta la isóbata de los 100 m (en kilómetros).



b) *Fórmula de SILGADO*. Esta relación toma en cuenta la magnitud del sismo generador del tsunami. Proporciona un estimado inicial de la altura de ola máxima, la que nos puede servir para establecer un orden de magnitud de las alturas de ola que se puedan presentar en la zona de estudio.

$$\log h = 0,79 M_s - 5,7$$

donde :

h = altura de ola (m)

M_s = magnitud del sismo (Richter)

c) *Fórmula de KATSUYUKI ABE*. Nos proporciona la altura de ola de un tsunami teniendo en cuenta el sismo que lo genera y las características locales y regionales de la zona en estudio.

Esta relación es la mejor aproximación que se ha conseguido hasta el momento para el cálculo de altura de ola de un tsunami y es la más reciente (1983).

$$\log H_r = 0,5 M_w - 3,3 + C$$

donde :

2H_r = Máximo run-up (m).

M_w = Magnitud de KANAMORI

C = 0,0 para tsunamis en el Océano Pacífico
0,2 para tsunamis en el mar Japonés

4.5.1.2 Métodos Numéricos. En los últimos años se han logrado métodos numéricos para la solución de las ecuaciones

hidrodinámicas de propagación de ondas. Esto permite predecir o reproducir la distribución de olas- se considera que el tsunami fue generado por un sismo- en las costas y sus respectivos tiempos de llegada con una aproximación muy confiable.

Muy recientemente se está haciendo análisis de modelos por computadoras con paquetes gráficos, tal es el caso del profesor HIROYOSHI TOGASHI (1991) quién reprodujo el tsunami que afectó a Ariake-Kai en 1792. Los profesores TETSUO SAKAI, YOSHITO TSUCAIYA, TOMIO SHIMADA reprodujeron el tsunami de Osaka de 1854.

4.5.1.3 Registros Históricos. La existencia de datos históricos de tsunamis ocurridos en la región de estudio permite estimar alturas de olas máximas, mediante métodos estadísticos y probabilísticos. Los registros históricos pueden obtenerse de catálogos especializados, reportes de diarios y revistas o por relatos de la población afectada. Tales registros pueden ser comprobados y complementados por los registros instrumentales.

4.5.2 Run-up. Llamada también máxima altura de subida de la ola en tierra. Es la distancia vertical desde el nivel de la marea en el instante en que llega el tsunami, hasta el punto donde penetra el agua en tierra. También podemos definir al run-up como la máxima cota topográfica que el tsunami logra alcanzar en tierra en el momento de la inundación.

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.

Las observaciones efectuadas en Japón, Hawaii, Alaska y California, sobre zonas inundadas por tsunamis, determinaron que muchas veces ha coincidido la altura de ola del tsunami en la costa con la curva topográfica cuya cota es aproximadamente igual a esta altura de ola.

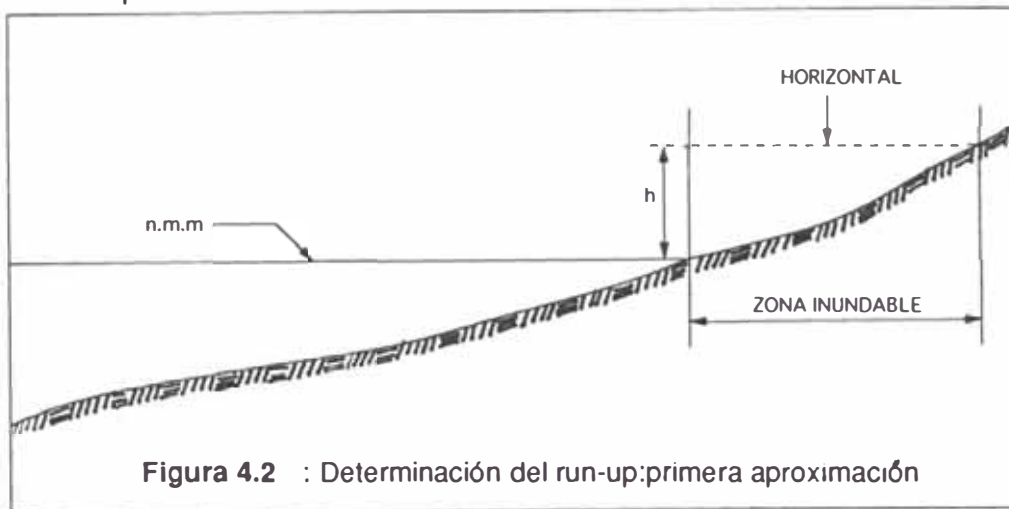
De lo anterior puede concluirse que un estimado inicial de la zona inundable por el tsunami abarca hasta la cota del terreno cuyo valor es igual a la altura de la ola en la costa, pero debiendo corregirse por efectos de pendiente del terreno y la posible convergencia o divergencia del frente de onda causada por la topografía.

La pendiente influye de manera importante en la penetración del tsunami en tierra. Cuando la franja del terreno es angosta y la pendiente es relativamente fuerte, la extensión de la zona inundada no es muy grande, pero el 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 cientos de metros, 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.

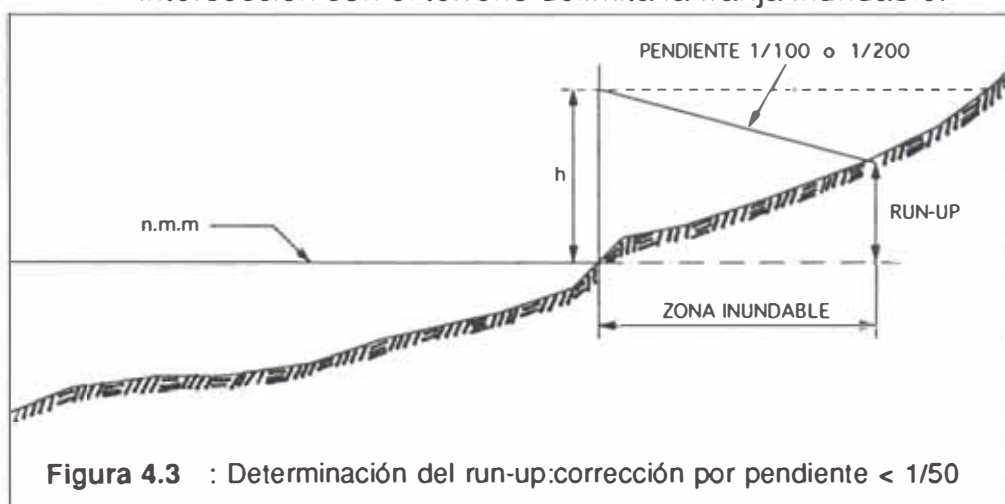
El método que se propone a continuación puede aplicarse en aquellos lugares donde la topografía del terreno no canaliza la

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 :

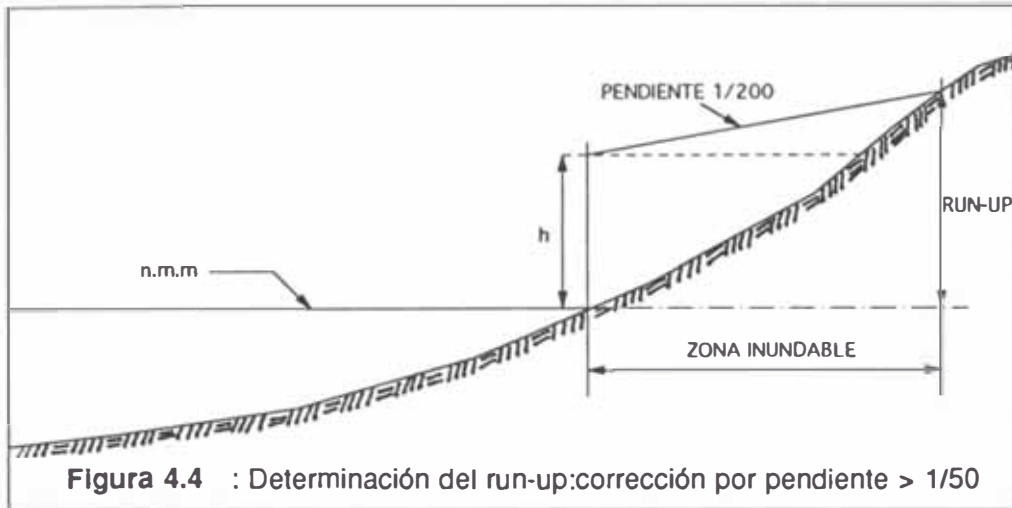
1. Se ubica la altura de ola sobre la línea costera y se traza una recta horizontal a partir de la misma, la intersección de esta línea con el perfil del terreno nos da una primera aproximación de la zona inundable.



2. La pendiente del terreno corrige la primera aproximación :
 - a) Si el terreno tiene una pendiente menor que $1/50$, se trazaría 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.



b) Si el terreno tiene una pendiente mayor de $1/50$, la recta que parte, desde la altura de ola ascenderá con pendiente $1/200$. 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.



4.6 Influencia de las Mareas en la Altura de 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 luna principalmente; también por la aceleración y rotación de éstos.

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; las mareas altas se inician en el norte,

Talara, y se propaga hacia el Sur, llegando a Ilo en unas 4 horas.

El nivel del mar al momento del tsunami influye en la altura de ola, por lo tanto en la extensión de la zona de inundación y daños provocados. Por ejemplo, el registro del mareógrafo de La Punta correspondiente al tsunami del 17 de octubre de 1966, muestra que al llegar éste a la costa y durante las 4 horas siguientes la marea era alta. Durante este tiempo arribaron la quinta y sexta ola que fueron las de mayor altura, la sexta saturó el límite de registro, superando los 4 m.

En cambio, el tsunami del 03 de octubre de 1974 arribó a la costa cuando 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 la ola de este tsunami fue de sólo 2 m.s.n.m.m. Si la marea hubiera tenido signo contrario (+1), la ola hubiera sido de 4 m.s.n.m.m.

4.7 Medidas de Protección ante Tsunamis

Se pueden enumerar las siguientes acciones, algunas de las cuales, aunque no se han aplicado en nuestro país, ilustran acerca de las medidas que se emplean en otros países.

1. Plan de Evacuación de la Población. Un Plan de Evacuación deberá contemplar la delimitación del área inundable, las rutas más fáciles y directas para salir de la zona de peligro, la ubicación de las zonas de refugio o de seguridad y la organización del proceso de evacuación.

2. Funcionamiento de un Adecuado Sistema de Alarma. Tiene como finalidad advertir a la población costera de la existencia de un tsunami. El buen funcionamiento del sistema permite que el plan de evacuación sea puesto en marcha y tenga buenos resultados.

3. Planificación de las Zonas Costeras. Las futuras ciudades o aquellas actualmente en desarrollo, ubicadas en la costa, deberían ser planificadas teniendo en cuenta el peligro de una inundación por tsunamis. Unas medidas similares deberán ser asumidas al planificarse el desarrollo de los sistemas de transporte, telecomunicaciones, agua, etc.

4. Protección de Edificaciones. De las observaciones de los daños causados por tsunamis se han extraído valiosas experiencias, las cuales se pueden aplicar para minimizar los daños estructurales.

Se recomienda que las casas de madera se fijen a cimentaciones continuas de concreto y se refuerzen sus entramados con diagonales. Esto les proporciona un relativo refuerzo ante los tsunamis medianos.

También se ha observado que las construcciones de concreto armado, que en su primer piso tienen una mínima área de muros expuestos al ataque frontal del tsunami, resisten adecuadamente al impacto del tsunami.

5. Prevención de la Erosión en los Cimientos de las Estructuras. Cuando un muro de defensa puede frenar o debilitar las fuerzas del flujo de un tsunami, está expuesto a sufrir daños por

socavación de su base, especialmente cerca de los extremos, provocando su colapso. Esto se puede prevenir protegiendo la cimentación con rocas o bloques de concreto. También se debe proteger ambos lados de la cimentación del muro, ya que el agua que cae desde la parte superior, en el momento de retroceso del tsunami, tiene un efecto socavador en la cimentación.

6. Reubicación de la Población en Zonas Altas. Es una buena medida para proteger a la población del ataque de los tsunamis. Naturalmente, esta medida está fuertemente condicionada a las posibilidades económicas y por esta razón encuentra fuertes opositores.

7. Construcciones de Obras de Defensa contra Tsunamis. Estas obras pueden ser muros de defensa alrededor de las ciudades o rompeolas ubicadas en las bahías. Son obras costosas, cuya construcción se hace necesaria únicamente en poblados con muy alto riesgo de ser afectados por tsunamis y con una frecuencia de ocurrencia grande. Esta protección es relativa ya que siempre existe la posibilidad de ocurrencia de un tsunami con una altura de ola superior a la del muro proyectado. Sin embargo, estos muros o rompeolas siempre reducen apreciablemente el efecto destructivo de los tsunamis.

8. Otras Medidas. Es también recomendable que existan arboledas de protección ubicadas a lo largo de la costa ya que estas reducen la velocidad del flujo del tsunami y disminuyen la energía del mismo. Para que estas arboledas sean realmente efectivas, se recomienda que no deben tener espesores menores de 30 metros.

Capítulo 5

Localidades Estudiadas

5.1 Generalidades

El presente estudio abarca las localidades comprendidas entre la Provincia Constitucional del Callao hasta el puerto de Pacasmayo en La Libertad. Se tuvo referencias que en esta zona el tsunami del 21 de Febrero de 1996 provocó los mayores daños, principalmente el tramo ubicado entre Salaverry-Coishco-Chimbote-Casma.

El estudio geográfico nos ayudará a conocer la realidad regional. Por ejemplo, la climatología del lugar es importante porque se sabe que previo a la ocurrencia de un sismo se han notado muchas veces cambios climáticos, y en el caso de tsunamis se ha notado un retiro o elevación de las aguas del mar.

Para el estudio de estas localidades hemos considerado los siguientes puntos: Ubicación Geográfica, Rasgos Morfológicos del Litoral, Aspectos Oceanográficos, Clima de la Costa y por último, la Geodinámica Interna de la Zona de Estudio..

5.2 Ubicación Geográfica

Presentamos a continuación una breve descripción de los departamentos involucrados en el estudio, siguiendo la trayectoria de sur a norte.

5.2.1 Provincia Constitucional del Callao. La Provincia Constitucional del Callao está delimitada por el departamento de Lima y más propiamente por la ciudad de Lima, exceptuando sus costas las cuales están bañadas por el Océano Pacífico (en su parte oeste y un sector meridional). Forman parte de la Provincia Constitucional del Callao las islas San Lorenzo y el Frontón, además de los pequeños islotes que se encuentran en las proximidades de estas últimas.

La Provincia Constitucional del Callao tiene una morfología de llanuras constituidas por terrazas que han formado los ríos Rímac y Chillón, que desembocan en el mar. Exceptuando la pequeña bahía del Callao, el litoral es casi rectilíneo en todas sus provincias. Sus costas presentan acantilados en el sur - zona de La Perla- siendo bajas en el resto del litoral.

En su sector norte, el litoral del Callao tiene costas bajas que alternan con algunos relieves que delimitan las playas. Los

cambios climáticos son originados por la presencia de la Corriente Peruana o Corriente de Humboldt, al igual que en toda la zona central y sur del Perú.

5.2.2 Departamento de Lima. El departamento de Lima está localizado en la parte central y occidental del territorio peruano. Comprende una franja costanera al oeste, y al este los andes con sus vertientes occidentales.

Sus límites son por el norte con el departamento de Ancash; al noreste con el departamento de Huánuco; al este con los departamentos de Pasco y Junín; al sur con el departamento de Ica y al oeste con el Océano Pacífico y la Provincia Constitucional del Callao.

La topografía de su territorio es poco accidentada en la costa y muy accidentada en la región andina. En la costa predominan las pampas desérticas delimitadas por colinas, contrafuertes andinos y el mar.

El litoral presenta costas bajas con extensas playas y acantilados que han sido entallados en terrazas como ocurre en la Costa Verde; en roca como sucede en el salto del Fraile o en depósitos desérticos como puede verse en Punta Negra.

5.2.3 Departamento de Ancash. Se localiza al norte de Lima y abarca territorios de la costa y andes. Su territorio limita al norte y noreste con el departamento de La Libertad, al este con el departamento de Huánuco, al sur con el departamento de Lima y al

oeste con el Océano Pacífico.

Su territorio es poco accidentado en la costa. El clima de Ancash es muy variado. En la costa y piso inferior andino, el clima es desértico con lluvias muy escasas. La pesca es una actividad trascendental en esta parte del Océano Pacífico. Chimbote es el principal puerto pesquero del departamento y uno de los más importantes de nuestro país. Harina de pescado y conservas, son dos industrias que han desarrollado gracias a la pesca marina. La industria siderúrgica del país está en Chimbote, donde existen también instalaciones industriales que utilizan el hierro que produce la siderúrgica.

5.2.4 Departamento de La Libertad. Territorialmente comprende un dominio marítimo y un dominio continental . El primero tiene un área de masa marítima de 87 044 km² y el segundo una extensión de 23 241,32 km² , que hacen un total de 110 285,32 km², que es la superficie total del territorio del departamento.

Presenta un clima desértico semicálido que cubre toda la costa y asciende profundamente por los valles interandinos de los ríos Chicama y Moche. La precipitación varía entre 0 y 50 mm y la temperatura media entre 20° y 18°C (promedio anual).

En el territorio liberteño se pueden observar cuatro espacios geográficos o geosistemas que se diferencian por su mayor o menor grado de desarrollo dentro de nuestra realidad económica.

El espacio geográfico de 0 a 1 000 m es el más desarrollado. Aquí funciona el llamado centralismo regional en la metrópoli de Trujillo; la agricultura y ganadería son tecnificadas y de alta producción y productividad; concentra casi toda la industria liberteña y los servicios, pues el sector 500 a 1 000 es despensa del más bajo.

Tiene el 67% de la población departamental, el 88% de la urbana y el 12% de la rural. Los espacios de 2 000- 3 000 - 4 000 m de altitud son eminentemente agrícolas de secano y el más alto ganadero extensivo. Los factores naturales influyen más que los sociales y económicos y la distancia de desarrollo, en comparación con el sector espacial de 0 a 500 m, es muy grande.

Tiene el 30% de la población departamental y la rural es predominante. El espacio de 4 000 m hacia arriba tiene el 2,4% de la población liberteña.

Las localidades costeras estudiadas por departamento, siguiendo una trayectoria de sur a norte, son las que a continuación se muestran. Algunos nombres corresponden a playas, caletas, puertos, distritos, etc.

DEPARTAMENTO DE LIMA

CAPITAL: Lima

PROVINCIA DE HUAURA

CAPITAL: Huacho

Lugares estudiados

Huacho

Caleta de Carquín

PROVINCIA DE BARRANCA

CAPITAL: Barranca

Lugares estudiados :

Barranca

Supe Puerto

DEPARTAMENTO DE ANCASH CAPITAL: Huaraz

PROVINCIA DE HUARMEY

CAPITAL : Huarmey

Lugares estudiados :

Huarmey

Caleta Huarmey

Punta Culebras

PROVINCIA DE CASMA

CAPITAL Casma

Lugares estudiados :

Caleta Casma

Playa Tortuga

Playa Chimus

Playa Mar Brava

PROVINCIA DE SANTA

CAPITAL Chimbote

Lugares estudiados :

Playa Alconsillo

Bahía Ferrol (Chimbote)

Puerto de Chimbote

Coishco

Caleta Santa

Río Santa

Campo Santa

DEPARTAMENTO DE LA LIBERTAD CAPITAL: Trujillo

PROVINCIA DE TRUJILLO CAPITAL : Trujillo

Lugares estudiados :

El Carmelo
Las Delicias
La Posa Huanchaco
Huanchaco
Huaca Prieta
Salaverry
Puerto de Salaverry

PROVINCIA DE PACASMAYO CAPITAL : San Pedro de Lloc

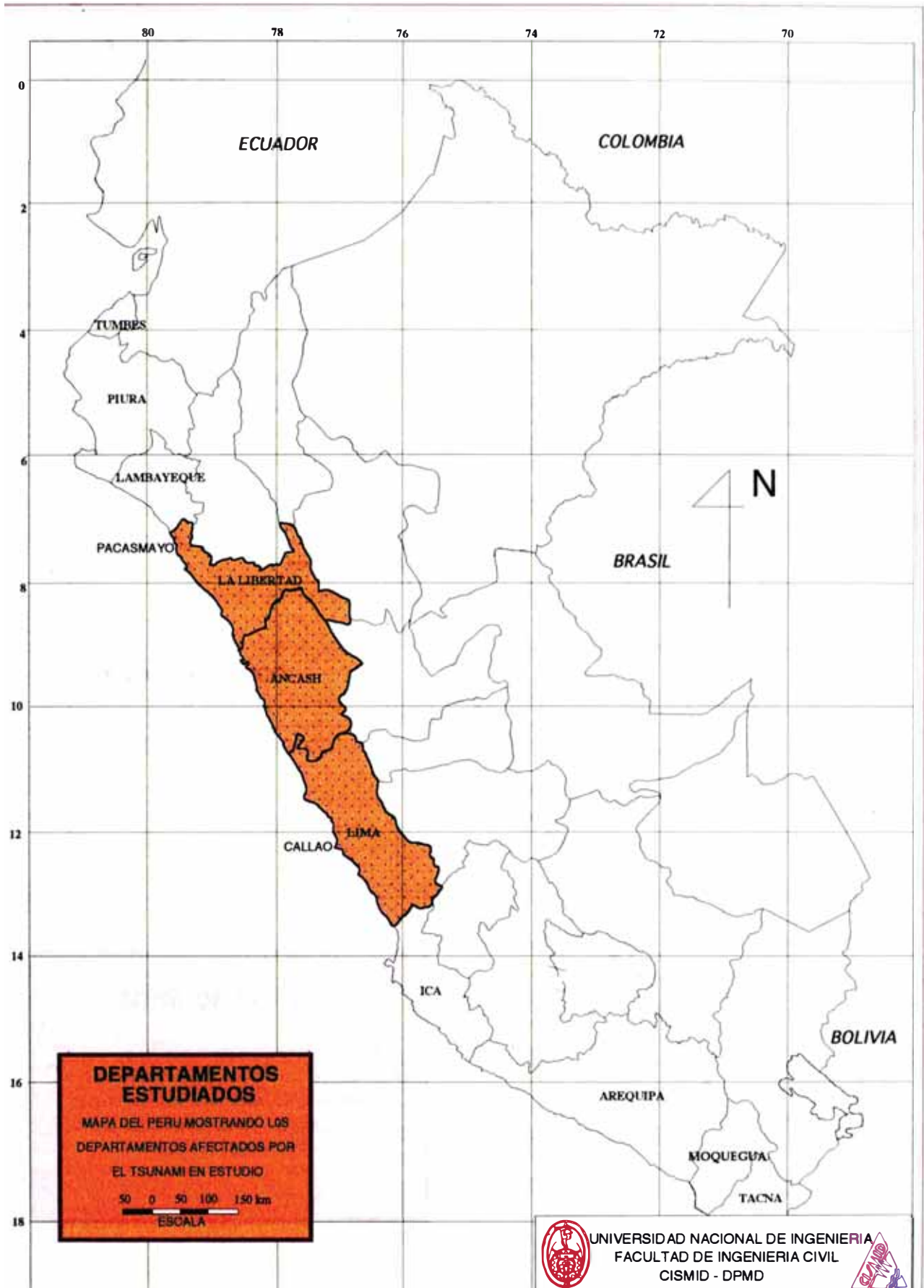
Lugares estudiados :

Pacasmayo
Puerto de Pacasmayo

La ubicación geográfica de los departamentos estudiados se presenta en la Lámina 5.1 y de las respectivas localidades y puertos en la Lámina 5.2.

5.3 Morfología del Litoral

Nuestro país tiene un litoral cuya definición está constituida por una línea ligeramente sinuosa con notorias irregularidades que constituyen los accidentes geográficos característicos de nuestro litoral. La forma que tiene el litoral del país está determinada por las formaciones y configuraciones que presenta el terreno en el zócalo continental, así como por la estructura morfológica que posee la parte física que emerge y que está definida por la



DEPARTAMENTOS ESTUDIADOS
 MAPA DEL PERU MOSTRANDO LOS DEPARTAMENTOS AFECTADOS POR EL TSUNAMI EN ESTUDIO

50 0 50 100 150 km
 ESCALA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
 CISMID - DPMD



TESIS : ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996

AJUSPICA: HIDRONAV

PLANO : DEPARTAMENTOS ESTUDIADOS

LAMINA: **5.1**

TESISTA : Bach. Carlos Cárdenas G.

ASESOR : Ing. Julio Kuroiwa H.

FECHA Ene. 1997

80

78

76

7

9

11

13

PTO PACASMAYO

PTO CHICAMA

HUANCHACO

TRUJILLO

PTO SALAVERRY

CALETA SANTA

PUERTO CHIMBOTE

COISHCO

CHIMBOTE

CALETA CASMA

PUNTA CULEBRAS

CALETA HUARMEY

OCEANO PACIFICO

BARRANCA

PUERTO SUPE

HUACHO



CARRETERA PANAMERICANA

CALLAO



ZONA DE ESTUDIO

LA ZONA DE ESTUDIO COMPRENDE UNA EXTENSION DE 600 KILOMETROS APROXIMADAMENTE, DESDE EL CALLAO POR EL SUR HASTA PACASMAYO POR EL NORTE. LOS NOMBRES CORRESPONDEN A DISTRITOS, PUERTOS, CALETAS Y BALNEARIOS

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
TESIS : ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996		ALFABETA INDECI HIDRONAV
PLANO : LOCALIDADES ESTUDIADAS		LAMINA: 5.2
TESISTA : Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR Ing. Julio Kuroiwa H.	FECHA Ene. 1997

Cordillera de los Andes, cuyos contrafuertes tienen notoria influencia en la forma que tiene el litoral en algunas zonas de la costa.

El litoral peruano sigue una orientación de Sur a Noroeste, con una extensión de 2 845 km desde la frontera sur, en el departamento de Tacna, hasta la frontera norte, en el departamento de Tumbes. Tiene un aspecto desértico con predominio de amplias playas en muchos lugares, y en otros existen numerosos acantilados o barrancos. Desde la línea fronteriza del sur (departamento de Tacna) hasta el litoral frente a la isla de San Gallán (frente a la Península de Paracas, en el departamento de Ica) se observa un zona de *levantamiento*. Desde Punta Aguja (departamento de Piura) hasta la línea fronteriza del norte (departamento de Tumbes) se aprecia otra zona de *levantamiento*. Asimismo, entre San Gallán y Punta Aguja, se aprecia una zona de *hundimiento*. Las zonas de hundimiento y de levantamiento nos dan una referencia de la forma cómo la Cordillera de los Andes influye en la formación del litoral peruano, por cuanto son las islas las partes más altas de las elevaciones del zócalo y del talud continental, formado por la prolongación de las estribaciones andinas.

El litoral peruano presenta notorios accidentes a lo largo de ella, tales como penínsulas, puntas, bahías e islas.

Penínsulas

Los accidentes de mayor notoriedad e importancia en el norte del litoral peruano son las penínsulas de Illescas y El Ferrol.

Estas penínsulas están constituidas por apreciables porciones de terreno continental que penetra en el mar, cada una presenta una forma muy particular dando lugar a la formación de bahías. Las principales penínsulas que se observan en el litoral norte son las siguientes:

- Piura* : La Península de Illescas, que esta ubicada cerca al desierto de Sechura.
- Ancash* : La Península de El Ferrol, al sur del puerto de Chimbote. Al norte de esta península se encuentra la Bahía Ferrol (sur del puerto de Chimbote). Al sur de la península de El Ferrol se encuentra la bahía de Samanco.

Puntas

En nuestro litoral notamos la presencia de puntas, es decir, de pequeñas porciones de terreno que penetran en el mar. Mencionamos a continuación las principales puntas que se observan en el litoral norte peruano:

- Piura* : La Punta Pariñas y la Punta Balcones
- La Libertad* : La Punta Malabrigo y la Punta Cerro Prieto
- Lima:* : La Punta Lachay
- Callao:* : La denominada Punta Callao

Bahías

En el litoral se aprecia la presencia de bahías, cuyas aguas tranquilas favorecen la construcción de puertos de suma importancia para el desarrollo de las ciudades.

Las principales bahías que se observan en el litoral norte peruano son las siguientes:

Piura : La Bahía de Paita y la Bahía de Sechura

Ancash : La Bahía de Ferrol, la Bahía Samanco,
la Bahía Casma y la Bahía Huarney.

Islas

Las islas son porciones del zócalo continental que emergen por encima de la superficie marina; constituyen restos de una primitiva faja de costa que se hundió hace millones de años. Las principales islas ubicadas en la zona de estudio son:

Piura : La Isla Foca

Lambayeque : Las Islas Lobos de Tierra y Lobos de Afuera

La Libertad : La Isla Guañape y la Isla Chao

Ancash : La Isla Santa, la Isla Blanca y la Isla La Viuda

Lima : La Isla don Martín, la Isla San Lorenzo y la
Isla El Frontón

Los accidentes geográficos arriba mencionados, si bien son los más notorios, junto con otros accidentes ubicados a lo largo de nuestro litoral caracterizan al litoral peruano.

Las zonas morfológicas de primer orden del territorio peruano correspondientes al dominio marítimo son los siguientes:

Plataforma Continental. Es la superficie del lecho oceánico que se extiende desde la ribera marina hasta la profundidad de

200 m, con un declive de 1 a 2° y ancho variable entre 5 y 130 km. Morfológicamente presenta suaves ondulaciones y en ciertos sectores, frente a La Libertad y Ancash, se han detectado superficies que semejan terrazas sumergidas.

Talud Continental. Esta unidad frente al litoral del Perú, consiste de un pronunciado declive que se desarrolla desde el borde de la plataforma continental (isóbata de 200 m) hasta profundidades de 4 000 a 5 000 m, niveles donde comienzan aproximadamente las abruptas paredes que caen al fondo de las fosas marinas. Según los mapas batimétricos y perfiles de ecosondas se aprecian tramos con pendiente más o menos uniformes desde el borde de la plataforma hasta las zonas profundas. Otra característica es la presencia de cañones submarinos relativamente largos y profundos.

Fosas Marinas. Morfológicamente es un surco en el fondo oceánico. Una hendidura angosta, profunda, y de paredes abruptas, que se extiende al pie del talud continental, quedando su eje a distancias de 70 a 240 km del litoral. Según la Teoría de la Tectónica de Placas, a lo largo de las fosas marinas de Perú y Chile tiene lugar la subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa Sudamericana.

Fondo Abisal del Pacífico. Más allá de las fosas marinas se extiende el lecho del Pacífico Oriental, a profundidades de 4 000 a 5 000 m, constituido por la superficie de la placa de Nazca. Está caracterizado, según los mapas de los fondos oceanográficos, por extensas áreas deprimidas, relieves montañosos, etc.

La Lámina 5.3 muestra la ubicación de la fosa que se extiende desde Lima hasta Valdivia, Chile. También muestra la variación del ancho de la plataforma continental.

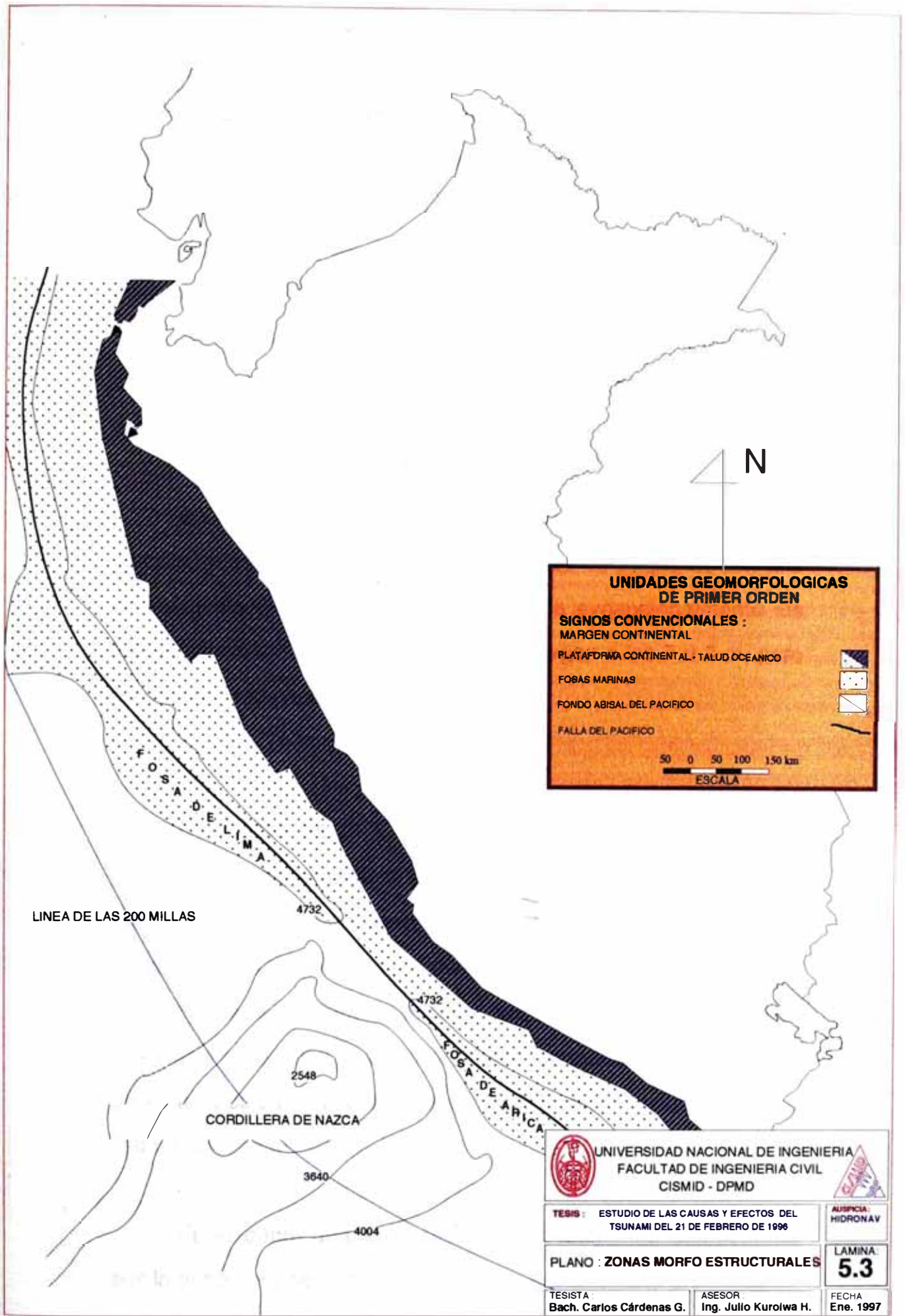
5.4 Aspectos Oceanográficos

En el mar peruano notamos la presencia de 2 corrientes marinas. La Corriente Peruana o de Humboldt y la Corriente del Niño.

La primera es una corriente superficial proveniente del sur que fluye hacia el norte y noroeste, desviándose en Huarmey (Ancash) . Es una corriente fría. Es más lenta en los meses de verano (enero-marzo) y más rápida en los meses de invierno (julio-setiembre), con un rango de velocidad entre 5-10 cm/s.

La segunda es una corriente caliente que viene del norte y fluye hacia el sur, desviándose cerca de la costa de Piura hacia el oeste.

Ambas corrientes recorren paralelas el litoral peruano. Su influencia es principalmente la de modificar la temperatura del mar y en consecuencia el clima de las ciudades. Es por esto que el norte presenta un clima cálido y lluvioso, mientras que la zona central y sur del Perú un clima frío con escasas lluvias. Pero en general, el Mar Peruano presenta una temperatura media anual de 19°C a pesar de hallarse en la zona tropical de la Tierra, influenciado principalmente por las ya mencionadas Corriente Peruana o Corriente de Humboldt.



En los últimos años se ha apreciado que la Corriente del Niño ha variado su curso ocasionalmente extendiéndose hasta la costa del departamento de Ica, generando una marcada influencia en el clima de gran parte de la costa peruana (desde Tumbes hasta Ica). Esta ocasional cobertura marina de la Corriente del Niño ha significado la presencia de lluvias muy copiosas que han afectado no sólo las actividades agrícolas, sino también las condiciones de vida de los habitantes de los poblados norteños, pues los desbordes de los ríos e inundaciones han causado múltiples destrozos.

En resumen diremos que el Mar Peruano es tranquilo, poco agitado, pues el tamaño que tienen sus olas es pequeño, con una altura media de 2 a 3 metros aun cuando excepcionalmente los fuertes vientos pueden generar olas que llegan a los 7 ú 8 m, pero esto ocurre muy esporádicamente.

5.5 El Clima de la Costa

La costa del Perú en toda su extensión no tiene un clima uniforme y único, pues se puede apreciar que en la costa norte existen características climáticas que difieren notablemente de las que se dan en la costa central y en la costa sur. En la Costa Norte, que es el espacio geográfico de nuestro estudio, se manifiesta, en general, un clima tropical con una elevada temperatura media anual que llega a los 24°C.

Es evidente una elevada humedad ambiental determinada por la atmósfera húmeda, así como una considerable precipitación

o lluvia durante la estación de verano. Esta realidad climática se presenta particularmente en los departamentos de Tumbes y Piura debido, según lo mencionamos, a la proximidad de estos departamentos a la línea ecuatorial por la influencia de la Corriente del Niño.

En la Costa Central y en la Costa Meridional se manifiesta un clima subtropical estable con una temperatura media anual que alcanza los 18°C, una considerable humedad ambiental que llega al máximo durante los meses de invierno (100% de humedad relativa) con total ausencia de lluvias y la presencia esporádica de finas garúas . Durante el invierno el cielo se torna brumoso y con neblinas. Esta realidad climática se observa desde el departamento de Lambayeque por el norte hasta el departamento de Tacna por el sur.

5.6 Geodinámica Interna de la Zona en Estudio

5.6.1 Origen y Generación de Sismos. Se entiende por sismo, prescindiendo de la naturaleza de su origen, una sacudida violenta de la tierra. En forma más precisa, es la ruptura del equilibrio elástico de una región del interior de la Tierra, propagando las vibraciones elásticas que produce en varias direcciones. Cuando ocurre un desplazamiento relativo a lo largo de una falla activa, se generan ondas que se propagan en todas direcciones, y cuando el frente de onda cruza un punto determinado de la superficie terrestre ésta es obligada a vibrar.

De acuerdo a su origen, los sismos se dividen en volcánicos y tectónicos. Los sismos volcánicos son, en general, de poca

intensidad, y están directamente relacionados con la actividad de los volcanes. Los sismos tectónicos están relacionados con los procesos de deformación que dan origen a la formación de continentes y montañas; a este tipo pertenecen los sismos fuertes. La Teoría Tectónica de Placas explica el origen de estos sismos. Según esta teoría, la superficie de la Tierra está compuesta por placas que se mueven en direcciones diferentes y chocan entre sí. Por ejemplo, la placa Sudamericana limita al occidente con la placa de Nazca; la primera se mueve de oriente a occidente y la segunda en sentido contrario. El choque de las placas, lento pero continuo desde hace millones de años, ha producido cambios en la superficie terrestre, dejando como resultado las cordilleras y los volcanes. El rozamiento entre las placas tectónicas ocasiona una enorme acumulación de energía. Este proceso lento provoca fuertes deformaciones en las rocas del interior de la Tierra, las cuales, al romperse, hacen que la energía acumulada se libere de repente en forma de ondas y sacuda la superficie terrestre. A este fenómeno se le llama Terremoto. En la Figura 5.1 se muestra una representación de este proceso.

Si un resorte se comprime y luego se suelta, saltará brusca y repentinamente. Así también, el choque entre placas y el desplazamiento en las fallas geológicas producen fuerzas en el interior de la Tierra causando una sucesiva acumulación de energía. Esta energía elástica acumulada a lo largo del tiempo en las zonas de convergencia, o de movimientos relativos entre diferentes bloques de la corteza, se libera súbitamente cuando se producen desequilibrios. La energía liberada se debe disipar para que el medio pueda retornar a su condición de equilibrio. La

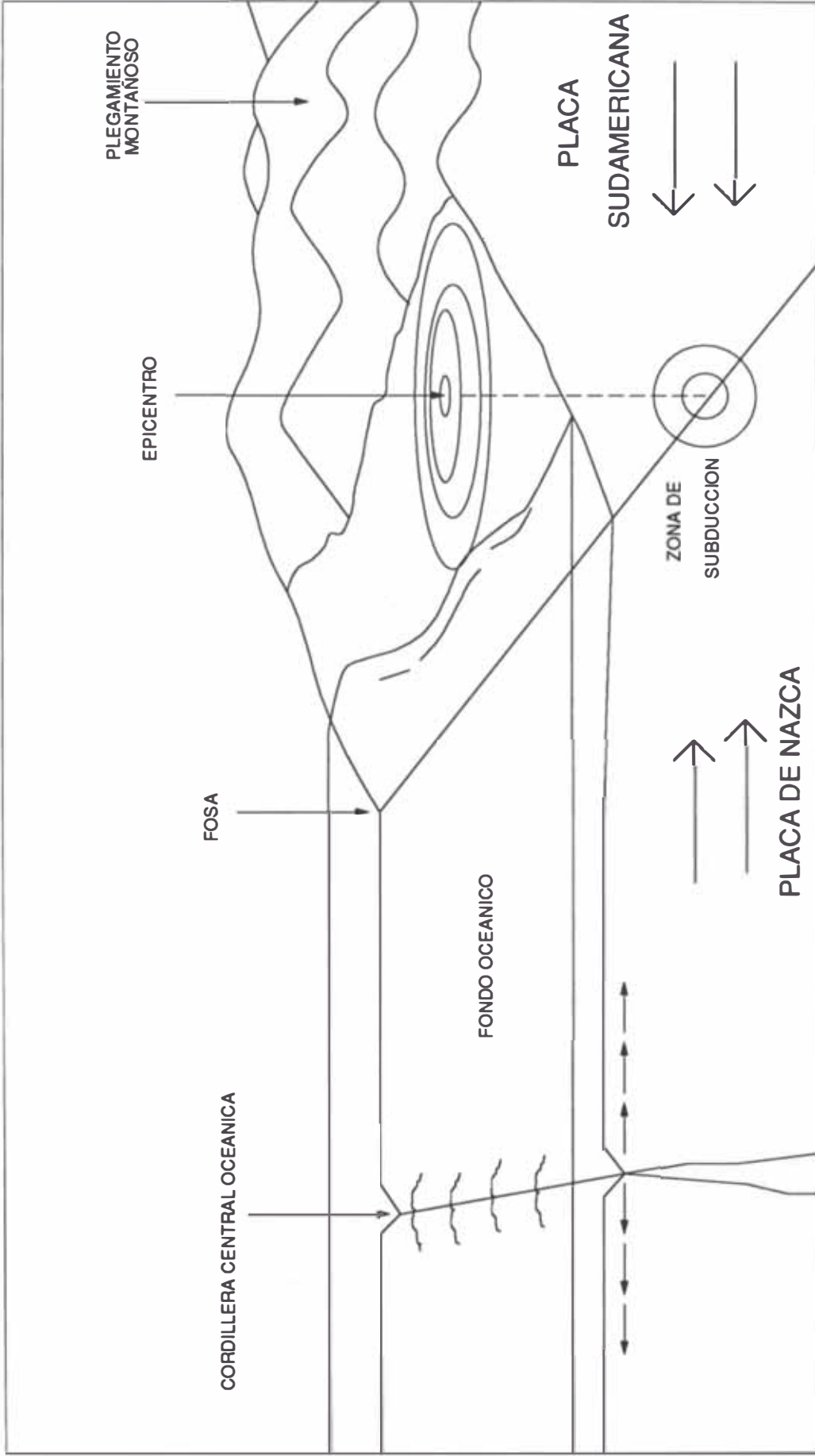


Figura 5.1 Generación de los sismos tectónicos

disipación se produce por el desplazamiento del estado de esfuerzos liberados. Según SARRIA, la disipación obedece a los fenómenos de fricción y debilitamiento de la intensidad energética a medida que las ondas se alejan de la fuente que las originó.

En términos generales, podemos decir que un sismo es una consecuencia del proceso de formación del suelo marino y de la colisión de placas.

El estudio de los diferentes sismos ocurridos indican que estos pueden originarse hasta profundidades de 600 km bajo la superficie de la Tierra; pero los movimientos que producen intensidades suficientes para ser de significación en ingeniería, se producen a profundidades menores de 100 km de la superficie, siendo especialmente destructivos los originados a 15 ó 25 km de profundidad.

Evidentemente, el concepto que se tiene sobre las causas que dan origen a los sismos superficiales no pueden ser aplicados a los sismos profundos. Mientras los superficiales, en su gran mayoría, tienen el mecanismo de plano de falla, es decir, deben su origen a causas tectónicas, los sismos profundos, según BENIOFF , parecen originarse por cambios que se producen en el estado de la materia.

Hoy en día se sabe que el mayor porcentaje de los fenómenos sísmicos es producido por fracturas o fallamiento dentro de las partes superiores del manto y la corteza, sin descartar del todo a las erupciones volcánicas, cambios de fase,

explosiones nucleares y otros fenómenos menores, que más bien son causantes de sismos débiles.

Los conceptos de Magnitud e Intensidad de un sismo son términos que se emplean en la sismología para comparar un sismo con otro, por eso es importante que los conceptos sean definidos en el presente capítulo.

El concepto de Magnitud lo introdujo C.F. RICHTER hacia el año 1935 con el propósito fundamental de poder comparar la energía liberada entre diferentes sismos. Según RICHTER, físicamente es la medida de la intensidad sísmica del terreno en un punto localizado a 100 km del epicentro.

Intensidad es el grado de afectación en los lugares donde se siente el sismo. Más claramente, es el efecto local que sobre diferentes lugares produce un mismo sismo. La intensidad depende de la distancia al epicentro y de las características del suelo.

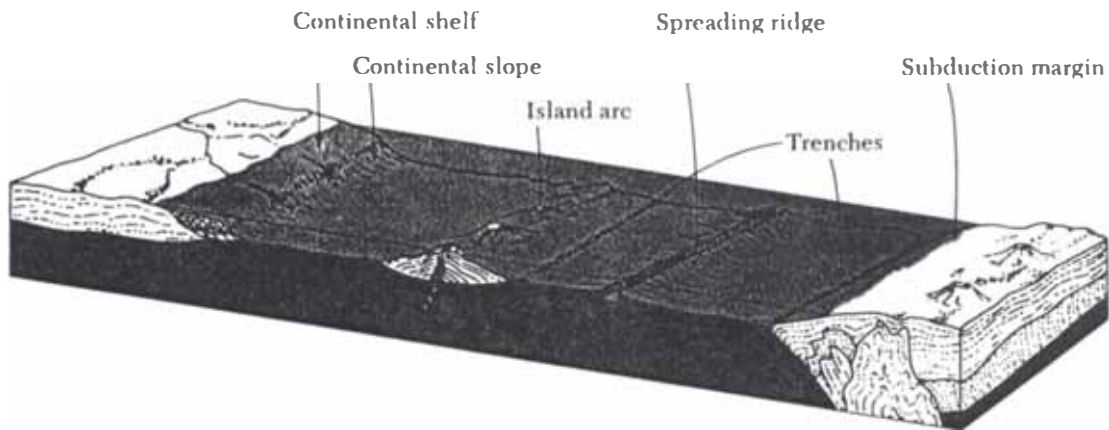
Es necesario, pues, observar la diferencia entre Magnitud e Intensidad. Magnitud es energía liberada mientras que Intensidad es efecto. Para un sismo determinado habrá una magnitud, mientras que intensidades habrían diferentes de acuerdo con la posición donde se evalúa y de la estimación de quien evalúa el efecto.

Escala para la evaluación de la intensidad existen posiblemente desde comienzos del siglo diecisiete. En la

actualidad la escala de intensidades más empleada es la de MERCALLI - CANCANI, modificada por WOOD-NEWMAN, razón por la cual se le llama escala de Mercalli Modificada, escala MM. Lamentablemente la escala de Mercalli adolece de la subjetividad de los evaluadores, siendo probable que diferentes personas asignen diferente grado a un movimiento sísmico en la misma zona.

5.6.2 Características Sísmicas de la Zona en Estudio. Según análisis sismo-tectónicos, existen en el globo terráqueo dos zonas bien marcadas de actividad sísmica. Ellas son el Círculo Alpino Himalayo y el Círculo Circum Pacífico. En ambas zonas la actividad sísmica es muy intensa, especialmente en esta última donde han ocurrido el 80% de los eventos sísmicos, quedando el 15% para el Círculo Alpino-Himalayo, y el 5% restante se reparte en el resto del mundo. El Perú, según su ubicación geográfica, pertenece al Círculo Sísmico Circum Pacífico.

El proceso de subducción de la placa de Nazca es parte de los movimientos de convección que suceden en el interior del planeta una de cuyas manifestaciones es la ocurrencia de sismos. En el territorio peruano y áreas vecinas el proceso de subducción no es uniforme; espacialmente la sismicidad de la zona de subducción muestra un patrón segmentado a lo largo del borde de colisión, esta colisión se inicia en la fosa marina de la frontera Perú-Chile y se extiende a profundidades intermedias hasta los 350 km en el sur del Perú. Las Figuras 5.2 y 5.3 ilustra lo que venimos diciendo.



Generalized cross section through the ocean crust showing the uppermost layers of rocks under the ocean spreading out from the midoceanic ridge and sliding down under the volcanic island arc and active continental margin along the deep trench. Earthquake foci are concentrated at the tops of the descending layers and along the ridge. Magma rises upward above the subduction zones, and the erupting lava builds spectacular volcanic cones.

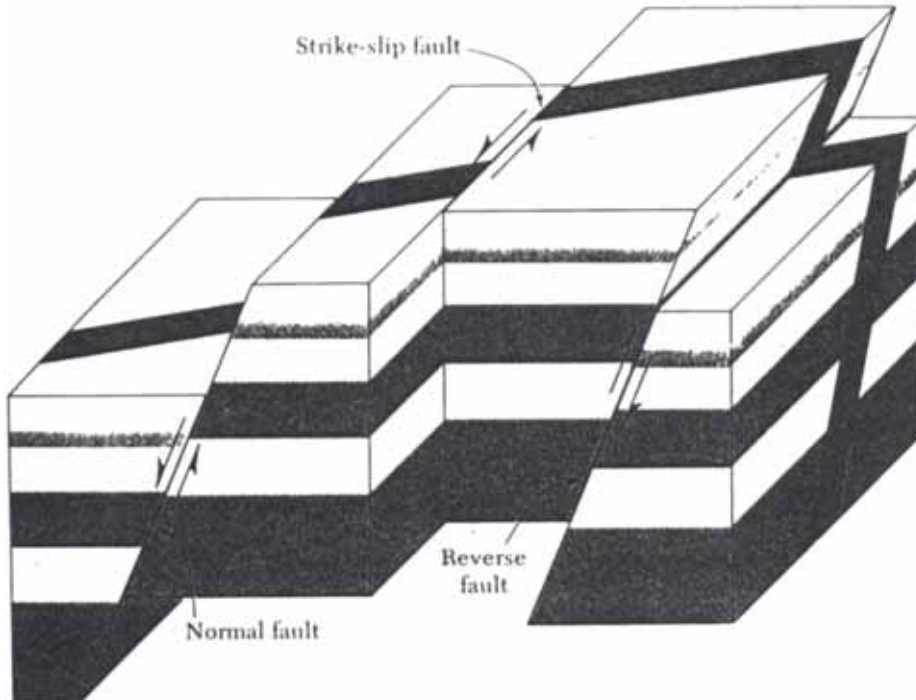
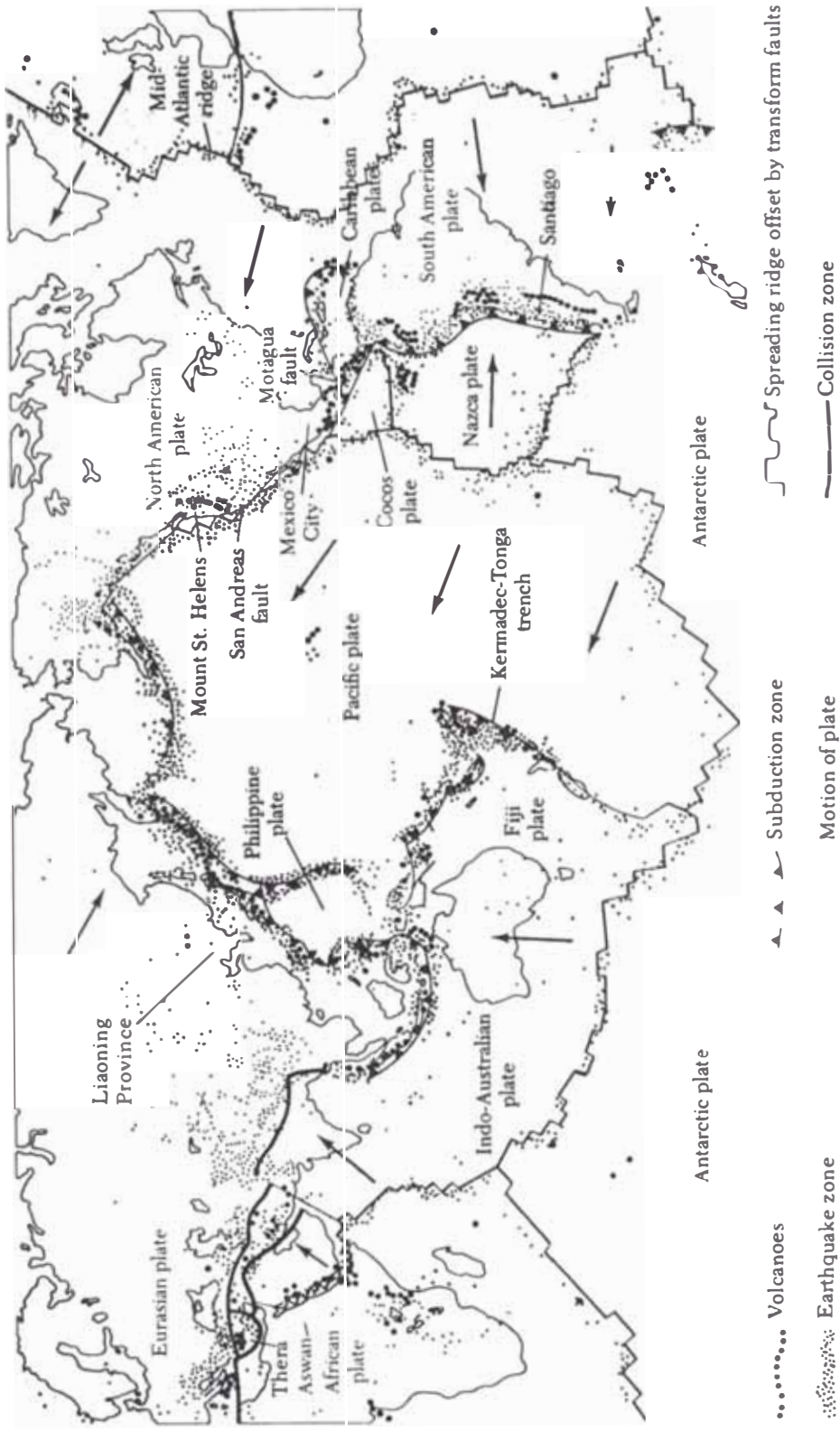


Diagram showing the three main types of fault motion.

Figura 5.2 Mecanismo del Movimiento de Placas

FUENTE: BRUCE A. BOLT; "EARTHQUAKES"



World map showing relation between the major tectonic plates and recent earthquakes and volcanoes. Earthquake epicenters are denoted by the small dots, and the volcanoes by large dots.

Figura 5.3 Ubicación sísmica del Perú en la cuenca del Pacífico

FUENTE: BRUCE A. BOLT; "EARTHQUAKES"

Según DEZA, el cambio más importante de inclinación de la placa de Nazca ocurre en la zona de transición sismotectónica identificada en la superficie por un sistema de lineamientos E-O, o sea de la región sismotectónica del Norte y centro peruanos donde el ángulo es de 10° próxima a la fosa y casi plana a 150 - 200 km de la fosa; cambia bruscamente para adquirir un ángulo de 25° - 30° cercano a la fosa y conseguir ser casi horizontal a 150 km aproximadamente de la fosa hacia el continente y a 100 km de profundidad aproximadamente.

Según CASTILLO, la placa de Nazca subduce a la Sudamericana en la zona norte y centro del Perú con una pendiente aproximada de 20° en los primeros 70 km para luego cambiar a un valor aproximado de 10° . En la zona sur del Perú y Norte de Chile la pendiente es más pronunciada con un valor aproximado de 25° y 30° .

La historia sísmica del Perú indica que el sur del país es una zona eminentemente sísmica donde han ocurrido un 30% de sismos destructores, además, los movimientos sísmicos de poca intensidad se suceden continuamente, en gran número, en esta región. Sin embargo, en la zona que va desde el centro al norte del país, los sismos destructores son más numerosos (42%), pero la actividad sísmica es menor. A pesar de que se dispone de información instrumental desde comienzos de siglo, la ubicación de los epicentros adolece de grandes errores (hasta de 1° geográfico, equivalente a 110 km), debido al pequeño número de estaciones a nivel mundial que fué lentamente incrementándose hasta 1962.

Capítulo 6

Determinación de la Causa del Tsunami del 21 de Febrero de 1996

6.1 Generalidades

El 21 de febrero de 1996 se produjo un sismo, que según el IGP, tuvo las siguientes características:

HORA ORIGEN	:	12h 50m 50,59s GMT
FECHA	:	21 - 02 - 96
LATITUD SUR	:	-9,98°
LONGITUD OESTE	:	-80,79°
MAGNITUD	:	6,0 Md
PROFUNDIDAD	:	21,0 km

Para la localización del evento sísmico se utilizó la información de 10 estaciones sísmicas: Camacho, Sucho, Santa Fé,

Quilmaná, Paracas, Guadalupe, Naña, La Montañita, Malpaso y Maichili.

La evaluación de intensidades determinó lo siguiente: en Chimbote y Huarney se sintió con intensidad IV en la escala de Mercalli Modificada, no reportándose daños. La intensidad III se dió en Casma; mientras en Huaraz y Huacho se sintió con intensidad II en la misma escala.

Por las características del sismo, y conforme a la teoría, no era un sismo tsunamigénico. El Centro Internacional de Alerta contra Tsunamis, emitió un comunicado (Número de Mensaje 211353 UTC) en el que se mencionaba que no se había activado la alarma contra tsunamis. Señalaba asimismo que la magnitud del sismo fue de $M_s=6,9$. Aproximadamente una hora y 8 minutos después hacia su arribo a la costa de Chimbote la primera de las tres olas registradas.

Debido a los antecedentes mencionados, el siguiente capítulo trata del estudio de la causa que dió origen al tsunami. Para lograr este objetivo, es fundamental determinar y ubicar la elipse de generación del tsunami que venimos estudiando, con lo que obtendríamos la ubicación más probable del epicentro del sismo generador, así como la magnitud del mismo.

6.2 Ubicación de la Elipse de Generación del Tsunami del 21 de Febrero de 1996

Según el Capítulo 4, la fuente de generación del tsunami adopta la forma de una elipse, donde el eje mayor coincide con el eje de falla. A partir de esta elipse podemos trazar los frentes de ondas del

tsunami, obteniendo así el tiempo que demora la primera ola en llegar a la costa, siendo este un tiempo calculado. Cuando ocurre un tsunami, el tiempo que demora en llegar la primera ola a la costa es determinado de los mareogramas de cada puerto, siendo este un tiempo registrado. Sin embargo, es poco probable que ambos tiempos coincidan, debido a que el tiempo calculado depende de las características del sismo, y sucede que muchas veces los datos sísmicos contienen errores. Esto nos sugiere la idea de que si tratamos de hacer coincidir ambos tiempos lograríamos ubicar la elipse de generación a partir de la cual empezó la propagación del tsunami, obteniendo así la verdadera posición del epicentro del sismo.

El conjunto de ideas descrito líneas arriba es la forma como se llevará a cabo la ubicación de la elipse de generación. Sin embargo, el problema consiste en desarrollar un procedimiento para lograr tal fin. Después de analizar varias alternativas, surgieron dos posibilidades. La primera que consiste en tomar como base las características del sismo dadas por el IGP. De esta manera se puede hallar, usando la magnitud del sismo, el tamaño de la elipse. Con el tamaño de la elipse y las coordenadas del epicentro se fija la posición de la elipse y se empieza a trazar los frentes de ondas. El procedimiento consiste luego en mover la elipse hasta que el nuevo tiempo calculado coincida con el registrado en los mareogramas. Pero el problema se complica debido a que las fórmulas de IIDA y HOTARI, usadas para hallar el tamaño de la elipse, nos indican que cuando el sismo es mayor que 6,6 la elipse adopta una forma que tiende a ser alargada, y esta se irá alargando más a medida que la magnitud sea mayor. Caso contrario, cuando la magnitud del sismo

es igual a 6,6 esta elipse se degenera en una circunferencia, y si la magnitud es menor que 6,6 se da el caso en que el eje mayor de la elipse se coloca en forma perpendicular a la línea de falla. El último de los casos fue el que se presentó para hallar el tamaño de la elipse del tsunami en estudio.

Aun cuando hubiera sido posible aplicar el procedimiento anterior, los resultados obtenidos no hubieran sido del todo correcto, debido a que se partió de las características del sismo, las cuales muchas veces son errados, determinándose entonces un tamaño y ubicación errados de la elipse.

Sin embargo, existe otro procedimiento, una segunda posibilidad, que nos permite hallar la posición y el tamaño de la elipse, y en consecuencia determinar el epicentro del sismo. En el punto 6.3 se describe este procedimiento.

6.3 Procedimiento para determinar la Elipse de Generación del Tsunami del 21 de Febrero de 1996

Para determinar la elipse de generación seguiremos trabajando con las dos informaciones reales obtenidas del tsunami, las cuales son los tiempos de llegada de la primera ola a los puertos de Chimbote y Salaverry. Los respectivos mareogramas se muestran en las Figuras 6.1 y 6.2.

Según los mareogramas, aquellos tiempos fueron de 69 minutos para Chimbote (9:00 a.m) y 89 minutos para Salaverry (9:20 a.m). El problema de saturación que sufren los mareógrafos, debido

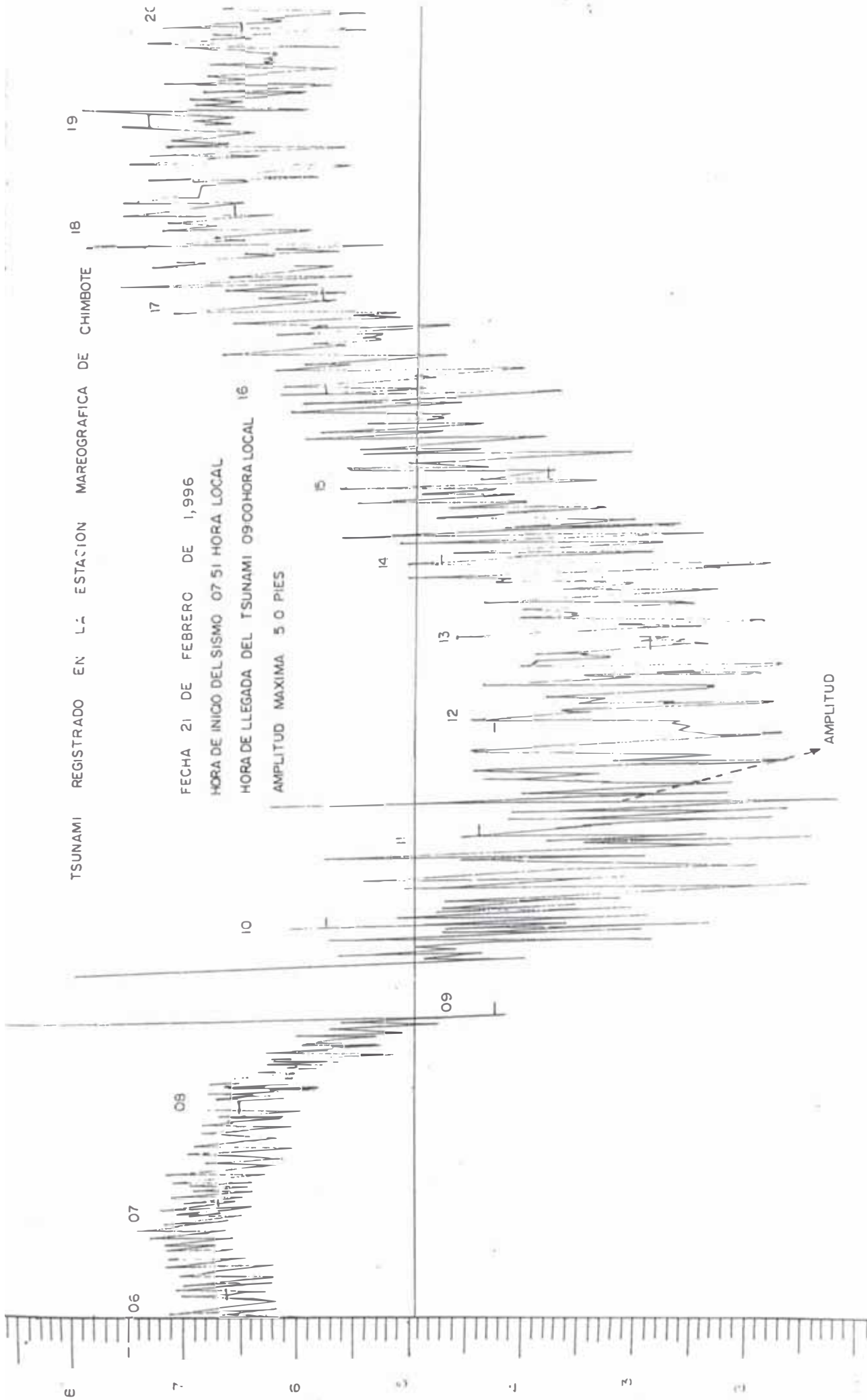
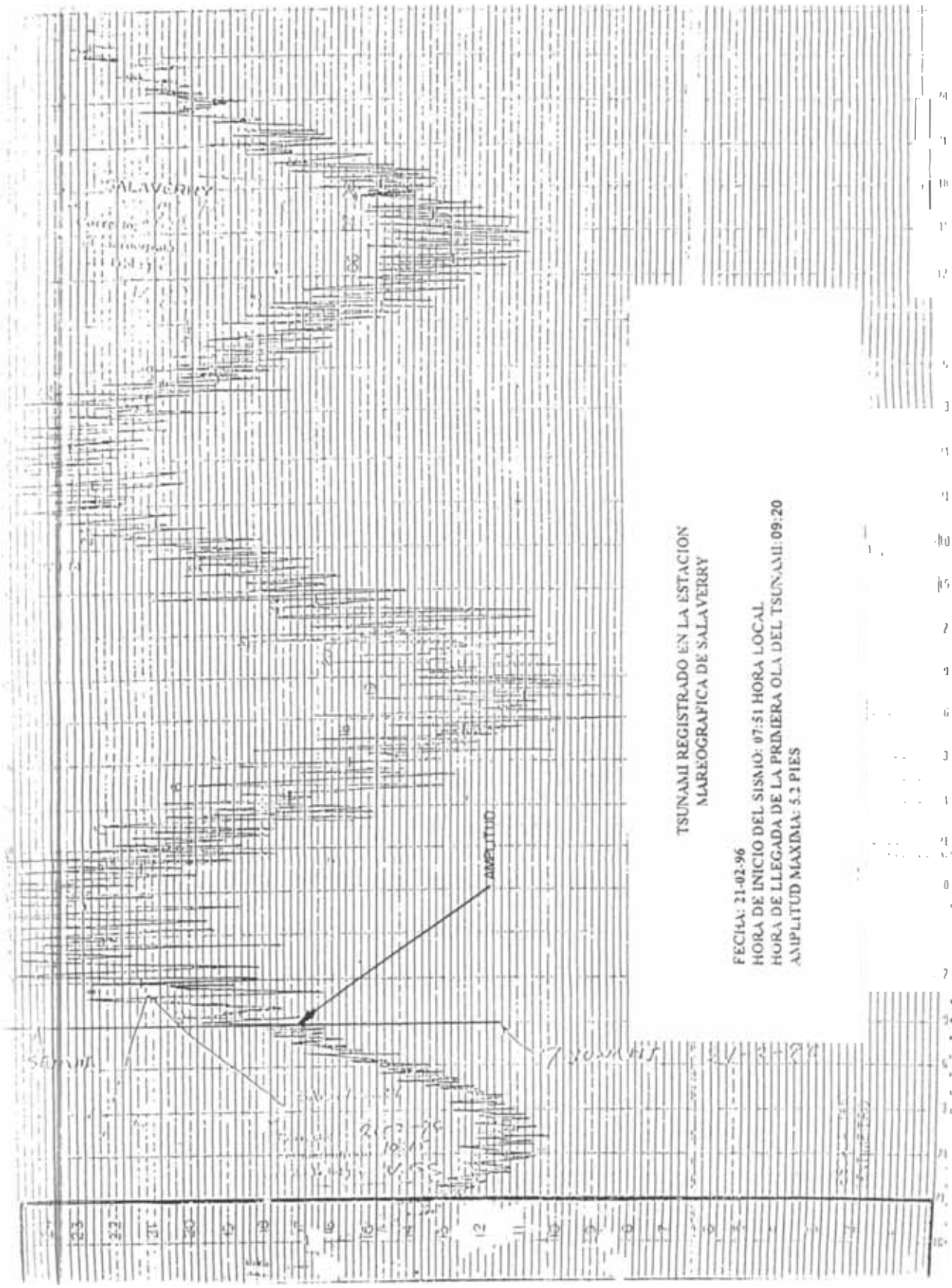


Figura 6.1 Registro mareográfico en el Puerto de Chimbote el 21 de Febrero de 1996
FUENTE: HIDRONAV



Registro mareográfico en e Puerto de Sa averry e 21 de Febrero de 1996

Figura 6.2

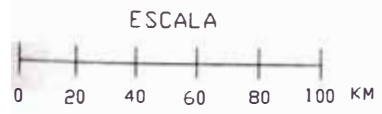
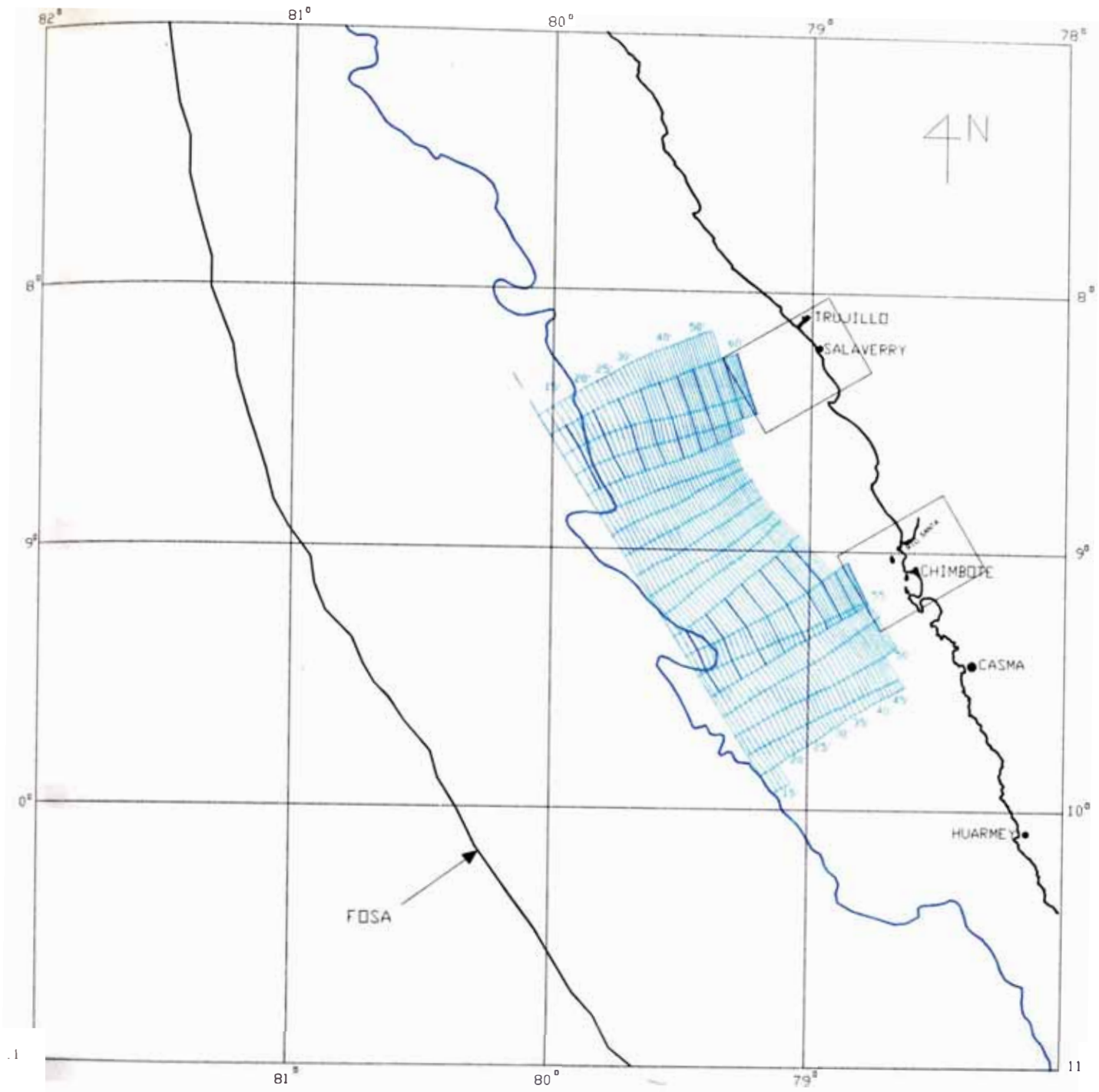
FUENTE H DRONAV



a un súbito y brusco incremento del nivel de las aguas, nos lleva a pensar que el tiempo de arribo de la primera ola fue realmente un instante después de la hora señalada. Según informaciones del personal técnico de HIDRONAV, esta variación es a lo más de un minuto. A su vez, el error máximo que se puede cometer en el método gráfico de las Curvas de Refracción es mínimo, por lo que también vamos a considerar un minuto adicional de error. En consecuencia el tiempo total empleado para el ajuste será de 71 y 91 minutos. Para el método gráfico de las Curvas de Refracción usaremos planos batimétricos a escala 1:1 000 000, cambiando luego la escala a 1:100 000 cuando nos aproximemos a la costa.

El procedimiento seguido consiste en los siguientes pasos:

1) La dirección de propagación del tsunami gira de aguas profundas hacia menos profundas, siguiendo una tendencia de colocarse paralelas a la costa cuando se aproximan a ella. Este criterio nos sugiere la idea de que podemos trazar frentes de ondas a partir de un eje auxiliar paralelo cercano a la costa, con el objetivo de simplificar el trabajo. Para nuestro estudio, este eje auxiliar quedó determinado después de analizar la batimetría de la costa. Su posición referido a un eje de coordenadas, así como el trazo de los frentes de ondas, se muestra en la Lámina 6.1.

2) La velocidad de los tsunamis en aguas profundas es mucho mayor que cerca a la costa; en consecuencia, el espacio recorrido para un mismo tiempo será mayor en el primer caso. En la Lámina 6.1 observamos que cuando el frente de onda se acerca a la costa, el espacio recorrido por unidad de tiempo se irá reduciendo. Si



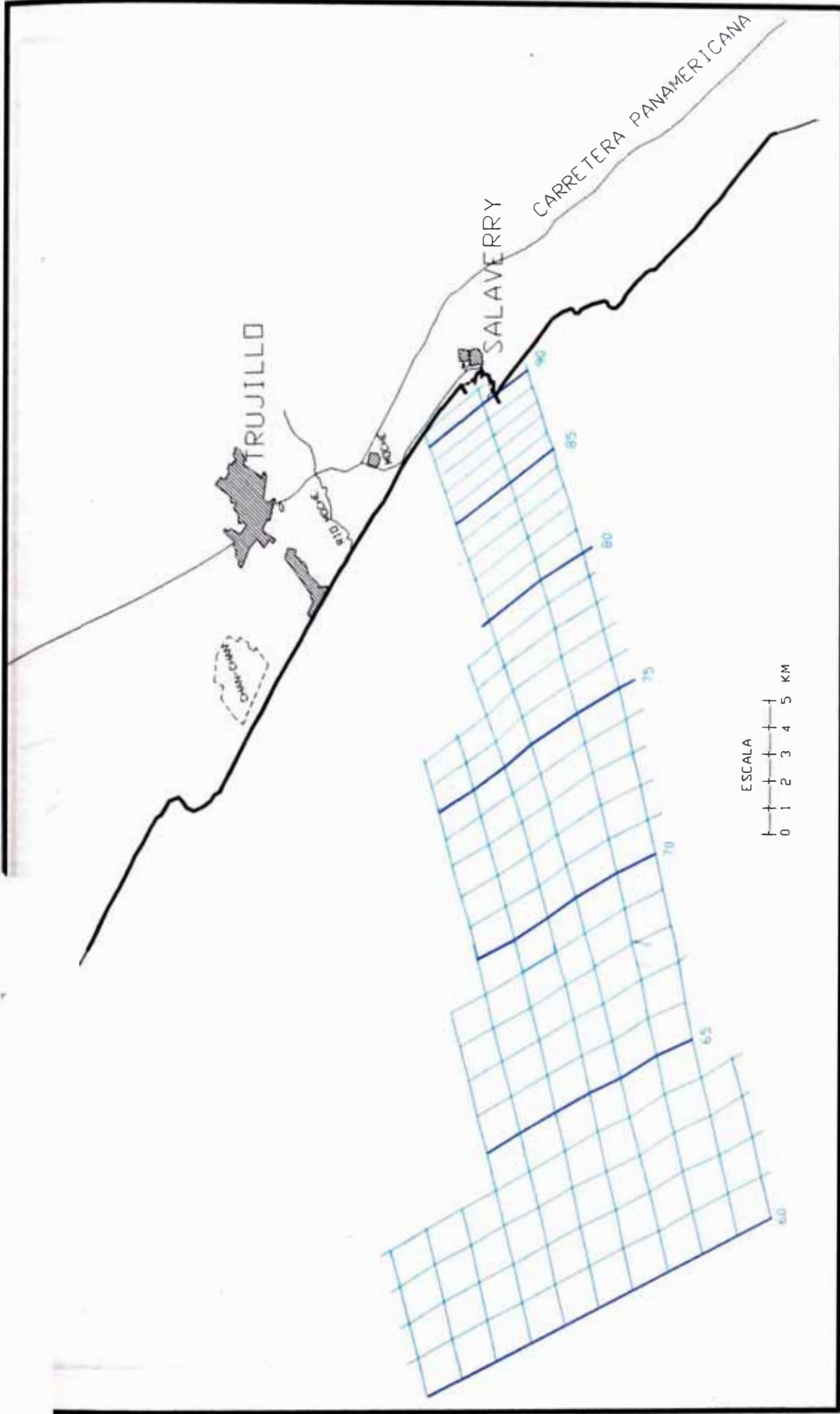
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		 AUSAHA HIDRONAV
TESIS : ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996		LAMINA: 6.1
PLANO : TRAZO DE LOS FRENTE DE ONDAS A PARTIR DE UN EJE AUXILIAR PARALELO A LA COSTA		FECHA Marz. 1997
TESISTA : Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR Ing. Julio Kuroiwa H.	

continuamos con el trazo de los frentes de onda en la misma escala, 1:1 000 000, se puede cometer errores ya sea aumentando o disminuyendo el espacio total recorrido y como consecuencia el tiempo de llegada de la ola a la costa, lo que a su vez obligaría a un aumento o disminución en el tamaño de la elipse de generación. Una manera de controlar este problema es cambiando a una escala mayor cuando nos aproximemos a la costa. De esta forma lograremos evitar errores, procurando la mayor precisión posible. En las Láminas 6.2 y 6.3 se observa el cambio de escala a 1:100 000 para los puertos de Salaverry y Chimbote.

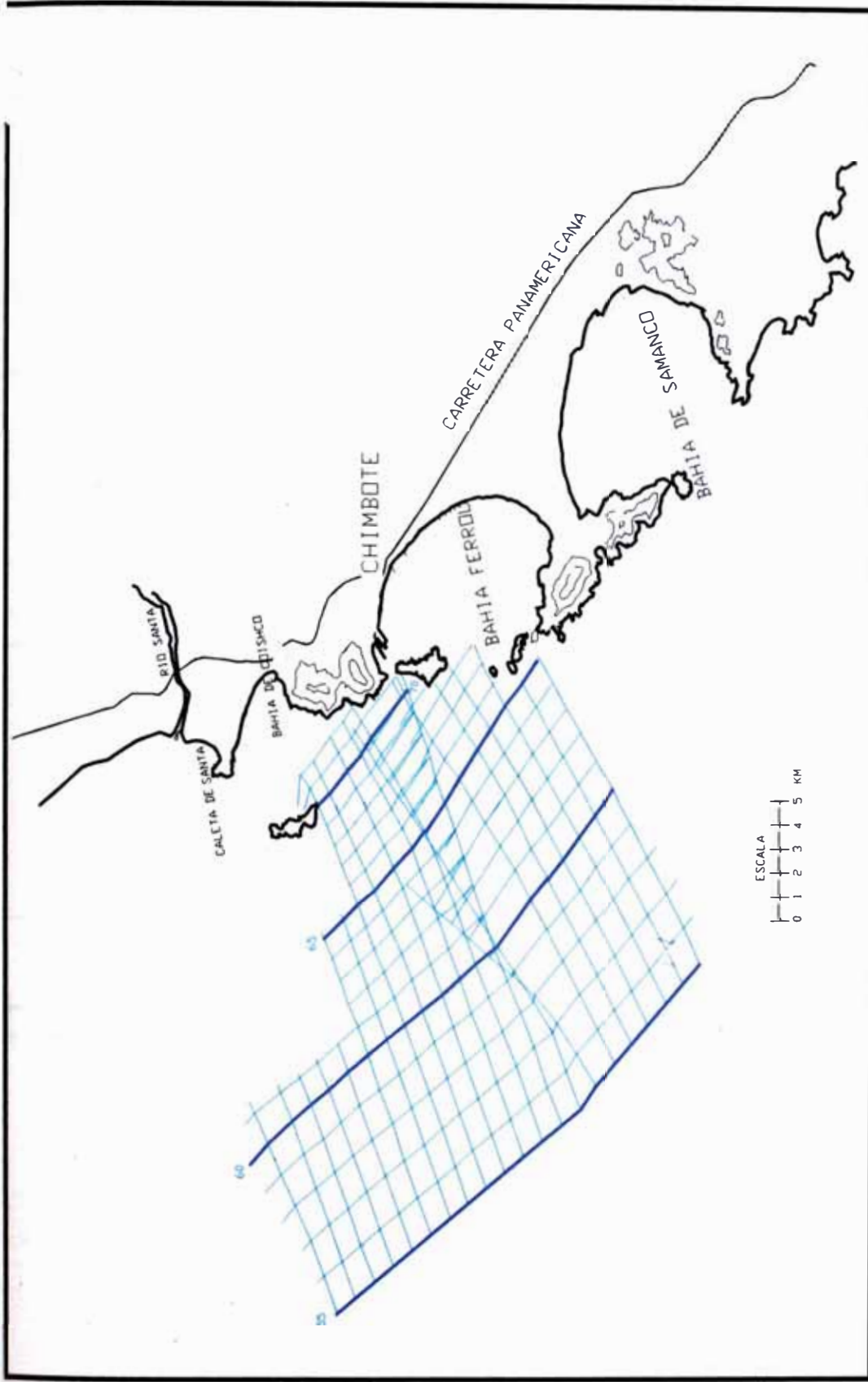
3) La línea de falla es paralela a la fosa. Con esta idea se puede orientar la elipse de tal forma que su eje mayor se encuentre paralelo a la fosa. Pero, para determinar finalmente la ubicación de la elipse, deberemos hallar el tamaño de la misma. Esto se consigue trazando los frentes de onda a partir del eje auxiliar anterior hacia aguas profundas, buscando completar los minutos restantes. Lo que sigue será encajar una elipse al diagrama de refracción trazado, con el eje mayor paralelo a la fosa. De esta manera se logra determinar la ubicación y el tamaño de la elipse de generación del tsunami. Con estos resultados se puede obtener información respecto al sismo tales como magnitud, epicentro, dirección a partir de un punto de la costa, etc. En la Lámina 6.4 se muestra la ubicación y el tamaño de esta elipse. Esta información es analizada y discutida en el punto siguiente.



6.4 Análisis y Discusión de Resultados

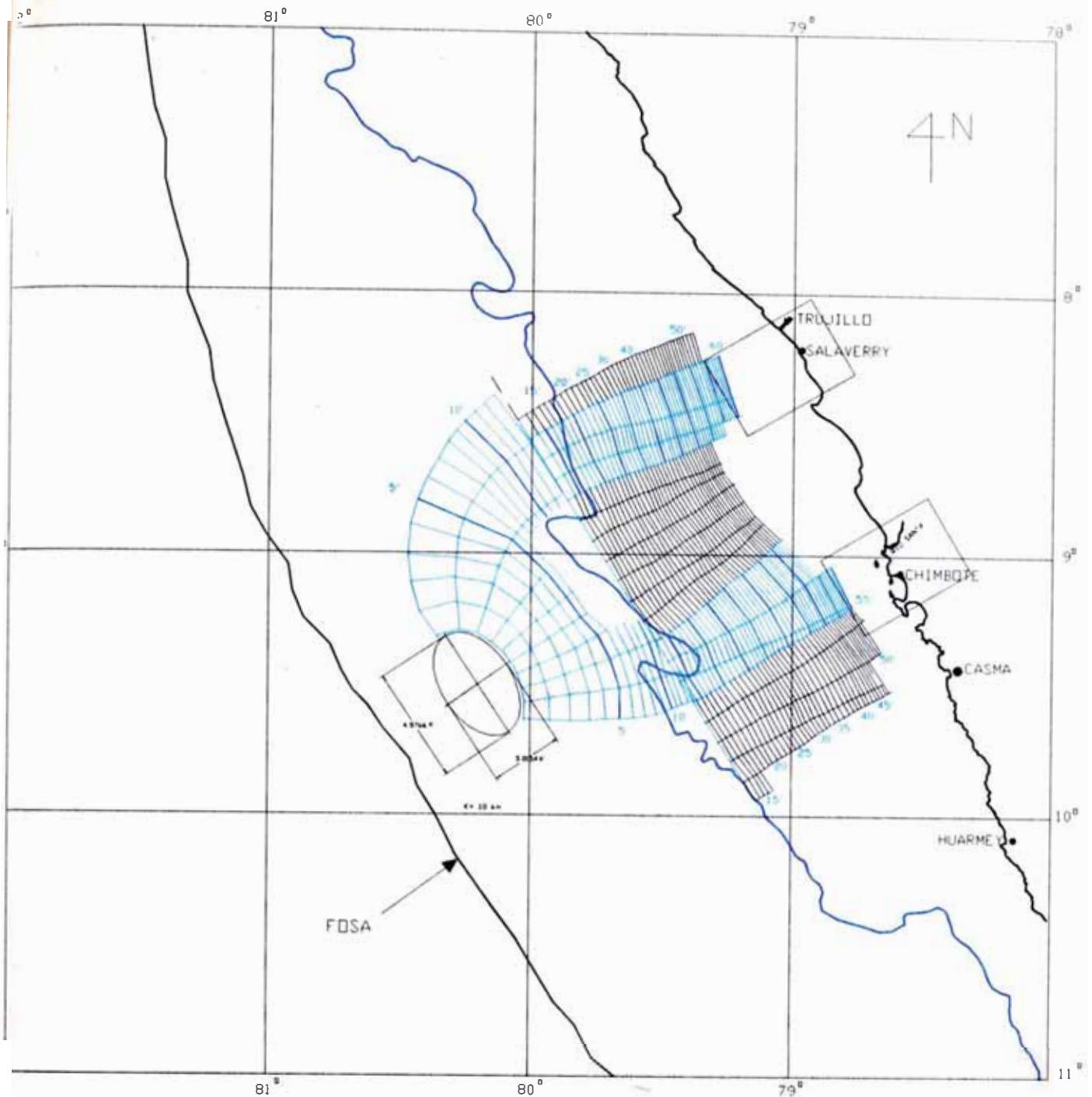
De acuerdo a la Lámina 6.4, el epicentro del sismo que hemos determinado tiene por coordenadas $9^{\circ} 29' S$ y $80^{\circ} 12' W$. Para



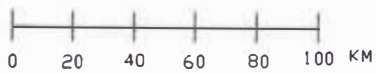
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD	 AUIBICA HIDRONAV
	TESIS: ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996
PLANO : CONTINUACION DEL TRAZO DE LOS FRENTES DE ONDAS PARA EL PUERTO DE SALAVERRY	
TESISTA Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR Ing. Julio Kuroiwa H.
LAMINA 6.2	
FECHA Marz. 1997	





 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		 AUSPICIA: HIDRONAV	
TESIS: ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996		LAMINA 6.3	
PLANO : CONTINUACION DEL TRAZO DE LOS FRENTE DE ONDAS PARA EL PUERTO DE CHIMBOTE		FECHA Marz. 1997	
TESIS TA Bach. Carlos Cárdenas G.		ASESOR Ing. Julio Kuroiwa H.	



ESCALA

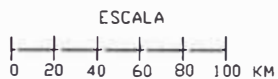
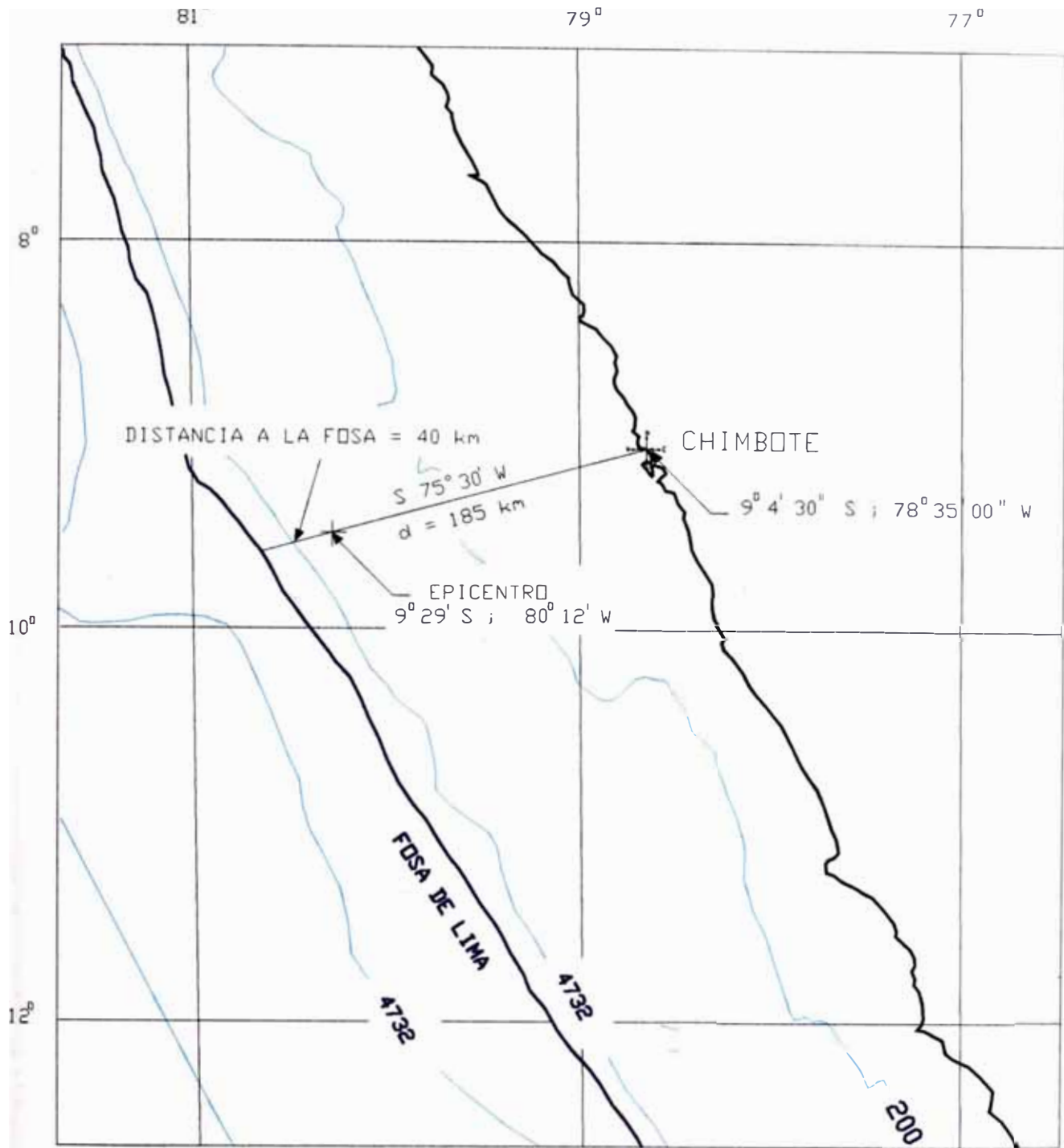




 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
TEMA :	ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996	AUTORIDAD HIDRONAV
PLANO :	ELIPSE DE GENERACION DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996	LAMINA: 6.4
TESISTA	ASESOR	FECHA
Bach. Carlos Cárdenas G.	Ing. Julio Kuroiwa H.	Marz. 1997

referenciar el epicentro con respecto a Chimbote, tomaremos de esta ciudad un punto de coordenadas $9^{\circ} 4' 30''$ S y $78^{\circ} 35' 00''$ W. La línea que une estos dos puntos tiene por dirección S $75^{\circ} 30'$ W y una extensión de 185 km. Si prolongamos esta línea hasta llegar a la fosa, la distancia del epicentro a esta última es de 40 km aproximadamente. La ubicación del epicentro del sismo nos indica que la ruptura se originó muy cerca de la fosa de Lima (6308 m , IGN). En la Lámina 6.5 se realiza una representación esquemática de los datos obtenidos.

Regresando a la Lámina 6.4, observamos que la elipse de generación tiene por eje mayor $a=48,77$ km y eje menor $b=30,15$ km, siendo entonces el área o fuente de generación $S=1154,86$ km². Las fórmulas de IIDA y HOTARI, de las que ya se hizo referencia, sirven para determinar la medida del eje mayor y menor de la elipse de generación. Como las fórmulas están en función de la magnitud M_s del sismo, al evaluarlas para diferentes magnitudes se obtendrán las correspondientes superficies de generación, y mediante un análisis por regresión podemos determinar una relación en la que M_s sea función de S . Procediendo de la manera anterior, la fórmula de regresión es $M_s = 4,5703 S^{0,05629}$, y al evaluarla para $S=1154,86$ km² hallamos que $M_s=6,8$; debiendo ser de éste orden la magnitud del sismo del 21 de Febrero de 1996.

El tsunami que afectó la costa de nuestro país fue de magnitud pequeña, según IMAMURA de $m=1$; lo cual es comprobado por la evaluación de daños. Para el caso de Coishco, por ejemplo, se observa que las viviendas afectadas corresponden a aquellas que se encontraban en la primera línea de ataque del



 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
TESIS : ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996	AUSPICIA: HIDRONAV	
PLANO : REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LOS DATOS OBTENIDOS	LAMINA 6.5	
TESISTA : Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR : Ing. Julio Kuroiwa H.	FECHA Marz. 1997

tsunami, siendo la penetración tierra adentro de pocos metros, mientras que la mayoría de las muertes se producían en las peñas (las víctimas eran cordeleros que en ese momento se encontraban en las peñas). Otra víctima se registró en una fábrica conservera y harinera debido a que la fuerza de las aguas lo arrojó contra un muro. Asimismo, hubieron víctimas en Guadalupe y la Caleta Santa. En el resto de la costa afectada los daños fueron mínimos.

En zonas inhabitadas o poco habitadas la penetración fue de varias decenas de metros, reportándose inundaciones o daños materiales más no personales, según corresponda. Si el agua llegó en algunos lugares a penetrar varias decenas de metros, fue porque son de poca pendiente, casi planos, y abiertos directamente al mar sin la presencia de algún tipo de construcción que reste energía al tsunami.

Toda esta evaluación, y que se realiza con más detalle en el Capítulo 7, nos dice claramente que la magnitud del tsunami fue pequeña, *lo cual confirma el resultado anterior de que fue un sismo con epicentro cercano a la fosa de Lima el mecanismo generador del tsunami*. Un sismo de magnitud M_s cercana a 6,8, y cuyo epicentro se ubique cerca a la fosa, puede tener la energía necesaria para producir la ruptura del fondo oceánico debido a que el espesor del estrato a romper es menor. El efecto que se produjo luego sobre la masa de agua fue del tipo pistón, provocando que esta última se irradie en varias direcciones. Según planos batimétricos, la altura de agua sobre el punto de ruptura es de 3 600 m aproximadamente. La masa de agua irradiada empezó su propagación desde los fondos oceánicos llegando en pocos minutos a la plataforma continental (15

minutos para el caso de Salaverry y 10 minutos para el caso de Chimbote, según el Diagrama de Refracción hallado. Ver Lámina 6.4). A partir de ese instante empezó su propagación en aguas poco profundas (menos de los 200 m de profundidad) determinándose menores velocidades. Para SOLOVIEV, los tsunamis son reflejados parcialmente por las irregularidades de los fondos oceánicos y principalmente por el talud continental. En este caso se produce una pérdida de energía cercana al 25%. Señala asimismo que la plataforma continental absorbe y conserva gran cantidad de la energía de los tsunamis.

Si tomamos como referencia un plano batimétrico de la región, obtenemos que la distancia de la isóbata de los 200 m a Chimbote es de 115 km, mientras que para Salaverry es de 105 km. Por eso, cuando el frente de onda del tsunami llegó a estas localidades, la energía transmitida por el sismo a la masa de agua había sido en gran parte disipada por los efectos de fricción mencionados.

Esto último explicaría en parte porque el tsunami no produjo grandes inundaciones en tierra. Sin embargo, la idea principal es que el sismo de magnitud $M_s = 6,8$ ubicado cerca a la fosa, ocasionó la ruptura de la corteza terrestre en los fondos oceánicos, (la placa Sudamericana, según la teoría de la Tectónica de Placas) provocando, debido a la magnitud del sismo y a su cercanía de la fosa, el deslizamiento de un lado de la fractura respecto al otro (los geólogos llaman *fallas* a estos deslizamientos). Este deslizamiento causó entonces el mismo efecto sobre la masa de agua por encima de ella, obligándola a seguir el comportamiento mencionado

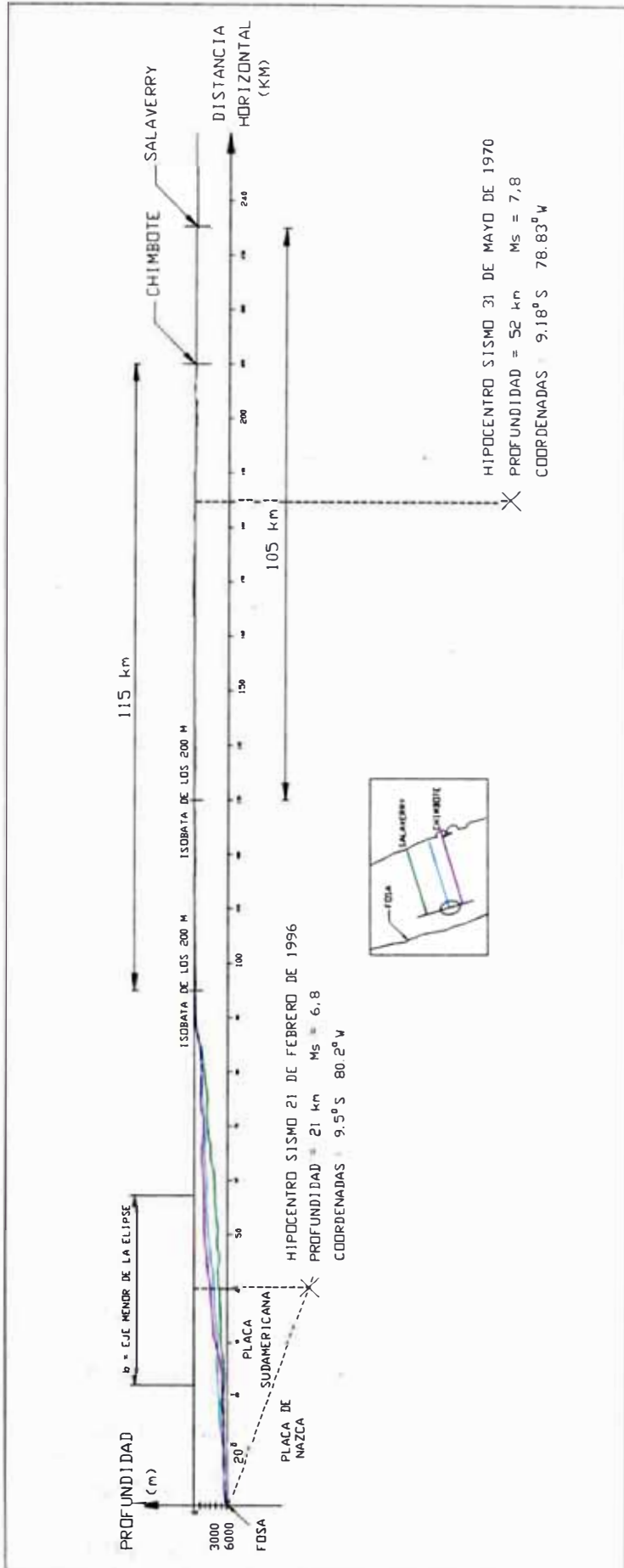
anteriormente. El hecho de que se hayan registrado tres olas de pequeña amplitud confirma este resultado. Sin embargo, en la generación de los tsunamis suelen actuar simultáneamente varios mecanismos, ya que los desplazamientos sísmo tectónicos rara vez están orientados precisamente en una dirección vertical u horizontal, y los desplazamientos del fondo oceánico son siempre seguidos por fuertes movimientos y oscilaciones elásticas.

El mayor evento sísmico registrado en Chimbote en el presente siglo ocurrió el 31 de Mayo de 1970, cuya magnitud fue de $M_s=7,8$, profundidad focal de 52 km y distancia 25 km de Chimbote (CERESIS). Este sismo reunía todas las condiciones para generar tsunami destructivo. Sin embargo, fue pequeño el que se observó, el cual quedó registrado como un retiro de las aguas del mar y un elevamiento en forma gradual del mismo, sin provocar graves daños en la costa. Para este evento la altura de agua por encima de la zona de ruptura fue de 100 m aproximadamente. El sismo del 21 de febrero de 1996 debió tener una magnitud cercana a $M_s=6,8$, profundidad focal de 21 km y distancia 185 km de Chimbote. Sin embargo, éste produjo un tsunami que afectó gran parte de la costa norte del país. Para este evento la altura de agua por encima de la zona de ruptura fue de 3 800 m aproximadamente. Esto nos hace pensar que debe haber una altura mínima de agua requerida encima de la ruptura como para que se produzca una efectiva transmisión de la energía del sismo a la masa de agua. Estudios teóricos y experimentales a nivel mundial no han podido establecer cuál es esta altura. Todo esto demuestra que las características de los tsunamis no están sólo influidas por el mecanismo generador sino también en gran medida por la razón entre el diámetro medio de la

fuente y la profundidad del agua. En la Lámina 6.6 se muestra las características de los dos sismos analizados.

Se descarta que el origen haya sido un derrumbe superficial submarino por que estudios anteriores sobre tsunamis en la costa del Perú han demostrado que este mecanismo de generación de tsunamis no se da en el Perú. Además, los modelos experimentales demuestran que sólo el 1-2% de la energía de un cuerpo en movimiento bajo, una cierta pendiente, puede transformarse en energía ondular de gravedad (SOLOVIEV). En consecuencia podemos decir que el principal mecanismo de generación de tsunamis es la ruptura de los fondos marinos debido a sismos tectónicos cuyos epicentros se ubican en el fondo del mar.

El tiempo de llegada de la primera ola a la costa es otro punto que merece explicación. Se sabe que la velocidad con la que avanza el tsunami depende de la batimetría, y que si ésta nos indica la presencia de aguas profundas cerca de la costa entonces el tsunami llegará muy pronto. Por el contrario, cuando tenemos aguas someras cerca de la costa, la distancia que recorre el tsunami es menor en comparación con aguas profundas por unidad de tiempo, y en consecuencia el tiempo que demorará en llegar la ola será mayor. Precisamente este último caso se presenta frente a la costa de Chimbote, y en general a partir de Huarney (Ancash) hasta Eten (Lambayeque), y no es otra cosa que el ancho de la plataforma continental que se presenta en esta parte de la costa del país. Los planos batimétricos indican para nuestra zona de estudio que el ancho de la plataforma continental se extiende de la siguiente

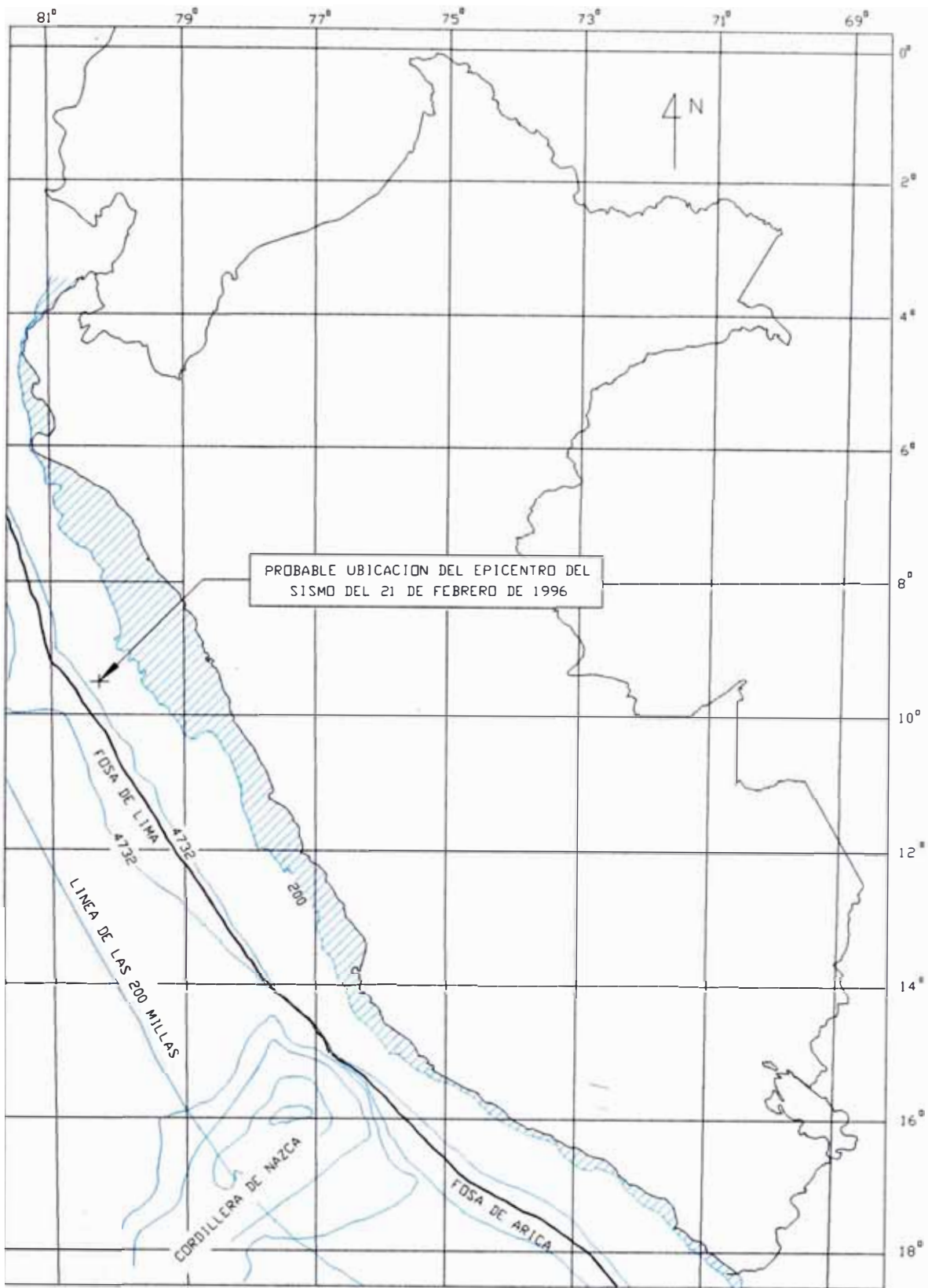


	
TESIS: ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996	AUSPICIA: HIDRONAV
PLANO: CARACTERISTICAS DE LOS SISMOS DEL 21-2-96 Y 31-5-70	LAMINA: 6.6
TESISTA: Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR: Ing. Julio Kuroiwa H.
FECHA: Marz. 1997	

manera: 115 km en Chimbote, 105 km en Trujillo, 100 km en Eten y 100 km en Pimentel. Frente a la costa de Huarney el ancho de la plataforma sufre un cambio brusco. Así tenemos 70 km hacia el SO. 85 km hacia el norte, mientras que hacia el sur de esta referencia 35 km. En la Lámina 6.7 se observa la variación del ancho de la plataforma continental a lo largo de toda nuestra costa.



Según el método del Diagrama de Refracción, para que el tiempo de llegada de la primera ola sea de 30 minutos, el epicentro del sismo se deberá ubicar a una distancia aproximada de 70 km de Chimbote, considerando $M_s = 7,5$. A esta distancia la profundidad del agua es de 140 m (80 brazas). Un caso crítico sería cuando el epicentro se ubique a 55 km de la costa, para las mismas características del sismo. En este caso el tiempo de llegada de la primera ola es de 10 - 15 minutos, siendo la profundidad del agua en este punto de 135 m (75 brazas). En ambos casos se espera que las profundidades de agua sean las mínimas requeridas como para que se produzca una efectiva transmisión de la energía del sismo a la masa de agua.

Un factor que contribuyó a incrementar la altura de la ola del tsunami fue la braveza del mar. Es decir, la braveza del mar se sumó al tsunami. Afortunadamente el tsunami ocurrió cuando en Chimbote se iniciaba un bajamar, en Salaverry se iniciaba un pleamar y en La Punta se completaba un pleamar. Las características del comportamiento del mar antes, durante y después de ocurrido el tsunami pueden verse en los mareogramas respectivos. La forma como pudo generarse el tsunami y su propagación hacia la costa se ilustra en la Lámina 6.8. En general, la



ESCALA



 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
TESIS: ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996		AUSPIA: HIDRONAV
PLANO: VARIACION DEL ANCHO DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL		LAMINA: 6.7
TESISTA: Bach. Carlos Córdova G.	ASESOR: Ing. Julio Kuroiwa H.	FECHA: Marz. 1997

DESPLAZAMIENTO DE LA MASA
DE AGUA DEBIDO AL EFECTO PISTON

CHIMBOTE

115 km

200 m

DESPLAZAMIENTO DEL
FONDO OCEANICO

M_s <-> 6,8

FOSA DE LIMA

PLACA DE
NAZCA

PLACA
SUDAMERICANA

GENERACION DEL TSUNAMI

LA GRAFICA MOSTRADA ES UNA REPRESENTACION SIMPLIFICADA DE LA FORMA COMO PUDO GENERARSE EL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996. EL EPICENTRO DEL SISMO PREVIO, SEGUN EL DIAGRAMA DE REFRACCION DETERMINADO, SE UBICO CERCA DE LA FOSA.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
CISMID - DPMD

TESIS: ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL
TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996

PLANO : GENERACION DEL TSUNAMI DEL
21 DE FEBRERO DE 1996

TESISTA :
Bach. Carlos Cardenas G.

ASESOR :
Ing. Julio Kuroiwa H.

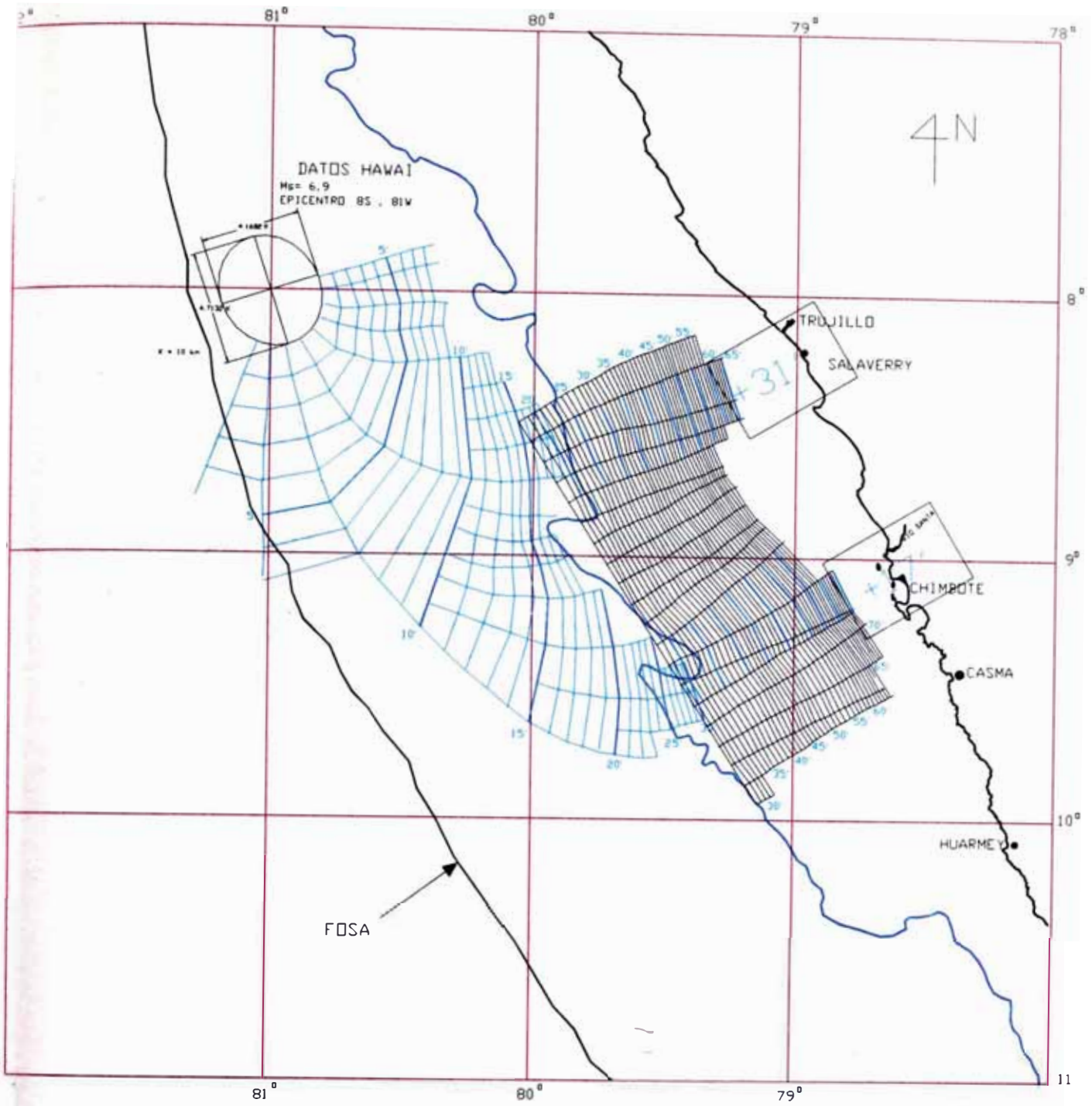
FECHA :
Abr. 1997



ASPECTO:
INDICE:
HIDROAV

LAMINA:
6.8

época del año en que se presentan las condiciones más desfavorables para incrementar la altura de ola de los tsunamis corresponde a los meses de enero, febrero y marzo; donde las bravesas de mar debido a cambios climáticos es frecuente, y si sumamos a esto que el tsunami se presente justo cuando nos encontramos en el nivel más alto del pleamar, se estarían dando entonces las condiciones de que se produzcan, a diferencia del tsunami del 21 de febrero de 1996, tsunamis mucho más peligrosos.

Para el Centro Internacional de Alerta contra Tsunamis, el sismo tuvo por epicentro 8° S y 81° W y magnitud $M_s=6,9$. Si trazamos las respectivas curvas de refracción obtenemos que la primera ola del tsunami estaría llegando 4,5 minutos después del tiempo registrado en el mareograma de Salaverry, y 15 minutos en el caso de Chimbote. En consecuencia, no se podría considerar a esta ubicación como la más probable. Por lo tanto, este es otro punto que refuerza los resultados que hemos obtenido respecto a la ubicación del epicentro del sismo generador del tsunami. En la Lámina 6.9 se muestra el trazo de las curvas de refracción considerando los datos emitidos por el Centro Internacional de Alerta contra Tsunamis.



 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
TESIS: ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1995		ASPIRA MEDIO NAV
PLANO: Curvas de Refracción según los datos emitidos por el sistema de alerta en Hawaii		LAMINA 6.9
TESISTA Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR: Ing. Julio Kuroiwa H.	FECHA Marz. 1997

Capítulo 7

Evaluación de Daños y Efectos

7.1 Generalidades

En el presente capítulo se realiza la evaluación de los daños y efectos ocasionados por el tsunami del 21 de febrero de 1996. La descripción del comportamiento del tsunami, en el instante previo al impacto, es anotada en aquellas localidades relacionadas con la ocurrencia de mayores daños y efectos. El material fotográfico adjuntado al final complementa esta evaluación, permitiendo observar, en forma panorámica, los escenarios en que se desarrollaron los hechos.

Para realizar una evaluación ordenada de daños y efectos del tsunami en estudio, realizaremos la misma comenzando desde Huacho y finalizando en Pacasmayo.

Los valores que se anotan para determinar el número de fallecidos, número de heridos, número de viviendas afectadas, etc., fueron obtenidos de entrevistas a la población, de reportes periodísticos de diarios locales y de la recopilación de información efectuadas en las Capitanías de Puerto visitadas. Los valores propios del tsunami como run-up, distancia de inundación, etc., fueron tomados del Internacional Tsunami Survey Team, cuerpo de profesionales peruanos y extranjeros que visitó la porción de costa del Perú afectada por el tsunami entre el 15 y 22 de Marzo de 1996.

7.2 Evaluación de Daños: Departamento de Lima

Según lo mencionado en el Capítulo 5, las localidades estudiadas son Huacho, Barranca y Supe Puerto.

HUACHO

En Huacho se produjeron sólo daños leves a pesar de que existen zonas urbanas ubicadas a nivel del mar, ya que gran parte de la ciudad de Huacho se encuentra ubicada a una cota promedio de 30 metros según consta en el plano topográfico de la ciudad. Las zonas que se encuentran a nivel del mar corresponden al Puerto de Huacho y a Carquín, estando ubicadas en ambos extremos de la ciudad. Ante tsunamis de magnitud (m) mayores que 1, estas zonas serían las más afectadas dada su posición frente al mar. Sin embargo, se puede ganar altura rápidamente. Por esto, la medida de protección más adecuada es la formulación de Planes de Evacuación.

La evaluación de los daños provocados por el tsunami en estudio nos dice que estas sólo se produjeron en pequeñas

embarcaciones artesanales, no reportándose víctimas ni heridos. Ver las Fotos N° 1 al 4.

BARRANCA

Los daños producidos a los balnearios de Chorrillos, Puerto Chico y Miraflores fueron leves, a pesar de encontrarse ubicadas en una posición que se abre directamente al mar y sin contar con elementos físicos elementales de defensa, como los rompeolas, que disipen la energía de las aguas. Por esta razón, los balnearios señalados anteriormente son vulnerables ante la ocurrencia de un gran tsunami, prácticamente desaparecerían. Sin embargo, su posición permite a los pobladores ganar altura rápidamente y poner a salvo sus vidas.

Los daños ocasionados por el tsunami en estudio se debieron al flujo de la masa de agua que afectó zonas cercanas a los balnearios descritos, generándose las correspondientes fuerzas de oleaje. No se reportaron daños materiales, víctimas o heridos. Las Fotos N° 5 y 6 ilustra lo que se viene diciendo.

La medida de protección adecuada es la formulación de planes de evacuación. La construcción de elementos físicos elementales, como espigones, es otra medida de protección que permitirá disipar la energía de las aguas.

SUPE PUERTO

Por su cercanía, y por encontrarse parte de este distrito a nivel del mar, es que se presenta vulnerable ante el ataque de tsunamis mayores al que estamos estudiando.

Los daños ocasionados por el tsunami del 21 de febrero consistió en la destrucción de algunas pequeñas embarcaciones y la salida del mar hasta el muro que delimita la planta de almacenamiento y procesamiento de combustible de propiedad de Petro - Perú, tal como se puede ver en la Foto N° 7.

Se reportó dos víctimas (pescadores artesanales del lugar). El deceso de estos pescadores no se produjo como consecuencia directa del tsunami, sino como resultado de la falta de equipo médico que en ese momento se requería (el equipo médico que se requería fueron tanques de oxígeno).

El nivel de la marea llegó a cubrir el muelle que se muestra en la Foto N°8. La presencia de los tanques de combustible mencionados determinan que se corra el riesgo de conflagración por BOIL OVER, la cual puede ser ocasionado por accidente, terremoto y/o tsunami. BOIL OVER es un término en inglés que significa *ebullición desbordante* del combustible almacenado (Para mayor referencia consultar la Tesis de Grado "Estudio del Probable Desastre por Conflagración en la Zona de Almacenamiento de Combustible del Puerto del Callao y el Planeamiento Físico para Mitigar sus Efectos" del Ing. Carlos Ferro; Fac. Ingeniería Civil; Univ. Nac. de Ingeniería).

CUADRO 7.1

VICTIMAS EN PUERTO SUPE

Sexo	Adultos	Menores	Sub-Total
M	2	-	2
F	-	-	-
Total			2

Después de analizar los daños y efectos ocasionados por el tsunami, y teniendo en cuenta que parte de Supe Puerto se encuentra a nivel del mar con la posibilidad de ganar altura rápidamente, se puede decir entonces que las medidas de protección más adecuadas serían la formulación de planes de evacuación y el funcionamiento de un adecuado sistema de alarma.

7.3 Evaluación de Daños : Departamento de Ancash

Las localidades estudiadas en este caso son: Puerto Huarmey, Punta Culebras, Caleta La Gramita, Puerto de Casma, Playa Tortuga, Caletas Samanco y Los Chimus, Playa Viento El Dorado, Playa La Caleta, Bahía Ferrol, Coishco y Santa.

HUARMEY

En el distrito de Huarmey encontramos la caleta de pescadores del mismo nombre, más conocida como Puerto Huarmey. No se reportaron víctimas ni heridos, pero sí daños a pequeñas embarcaciones artesanales. Ante la posibilidad de que ocurra un gran evento existe un elevado riesgo por desastre, debido a que la localidad de Puerto Huarmey se encuentra a nivel del mar y el tipo de material usado para la construcción de las viviendas son de adobe, madera y en algunos casos material noble. Por esto, la medida de prevención adecuada es la formulación de planes de evacuación y la puesta en funcionamiento de un adecuado planeamiento de las zonas costeras, ya que Puerto Huarmey es una localidad pequeña en pleno proceso de crecimiento.

Las Fotos N° 10, 11 y 12 muestran en forma panorámica la localización de Puerto Huarmey y su situación respecto al mar.

PUNTA CULEBRAS

Es una caleta de pescadores. Al igual que Puerto Huarney, presenta un elevado riesgo de desastre ante un gran tsunami debido a su posición y el tipo de vivienda que existe en la zona, las cuales están hechas a base de adobe, madera y en algunos casos material noble.

El último evento inundó sólo parte del muelle y los límites de la fábrica de aceite y harina de pescado. No se reportaron víctimas ni heridos, pero sí daños materiales a pequeñas embarcaciones artesanales.

Las medidas de protección serían entonces la puesta en funcionamiento de un sistema de alarma que de la voz de alerta lo más rápido posible, y la planificación de las zonas costeras de esta caleta que también se encuentra en proceso de crecimiento, de tal modo que se pueda orientar este crecimiento hacia zonas seguras, lejos de aquellas que son potencialmente inundables. Se determinó que las fuerzas generadas por el tsunami en estudio fueron de oleaje y de impacto. Las Fotos N° 13, 14 y 15 muestran a Punta Culebras.

CALETA LA GRAMITA

En esta caleta el tsunami del 21 de febrero de 1996 provocó la destrucción de aproximadamente 20 viviendas rústicas de esteras llamadas comúnmente ranchos. Se registró la salida del mar en unos 200 metros aproximadamente. No se reportaron daños personales. Muchas embarcaciones pequeñas fueron varadas hasta la playa.

PUERTO DE CASMA

Aunque es conocido como Puerto Casma, es realmente una caleta de pescadores semejante a Culebras, pero de menor población. Es otra bahía en la que encontramos tres fábricas harineras y una conservera.

El comportamiento del tsunami en esta zona fue el siguiente: el mar se retiró unos 30 a 40 metros causando preocupación en la población. Se esperaba una gran inundación pero poco a poco el mar volvía a su nivel. Sólo se determinó que hubo una salida del mar de 50 metros en Puerto Casma, mientras que en el área ribereña fue de 150 metros. Se podría explicar este fenómeno diciendo que la profundidad de las aguas no es mucha cerca de la costa, produciéndose entonces el correspondiente efecto de fricción. No se reportaron víctimas ni heridos, así como tampoco daños a embarcaciones. El límite inundable se encuentra próximo a las fábricas descritas, 40 viviendas fueron ligeramente afectadas y hubieron 240 damnificados.

Ante un futuro evento, mayor al estudiado, Puerto Casma puede sufrir daños materiales de consideración y daños personales en menor escala, debido a la baja densidad poblacional y lo rápido que se gana altura. Por esta razón, las medidas de protección recomendadas sería el funcionamiento de un sistema de alarma y la planificación de las zonas costeras. Adicionalmente se puede proteger las fábricas de la erosión, provocadas por aquel futuro evento. Las fuerzas generadas que se presentaron en el tsunami que venimos estudiando fueron de oleaje. En la Foto N° 16 se muestra a Puerto Casma.

PLAYA TORTUGA

Tortugas es un balneario ubicado al norte de Huarmey. La población se incrementa en verano. Una característica importante es que Tortugas es un balneario en crecimiento. Las construcciones predominantes son de material noble, existiendo en menor proporción las de adobe y madera.

Es una playa de aguas tranquilas por la configuración de la bahía. Daños materiales así como víctimas no fueron reportados, aunque el mar se salió varios metros (hasta la cota promedio de 2,5 metros, la cual coincide con el límite de la playa). Algunas embarcaciones fueron varadas, más no destruidas. El lugar es vulnerable ante un evento de gran magnitud, y ha medida que el balneario siga por la misma línea de crecimiento aumentará con ello el riesgo de desastre.

Medidas recomendables serían la formulación de planes de evacuación, planificación de zonas costeras, protección de las edificaciones existentes, prevención de la erosión en los cimientos de las estructuras y, la construcción de obras de defensa contra tsunamis, debido a que la capacidad económica de la zona es elevada.

Las Fotos N° 17, 18, 19 y 20 muestran varias tomas de Tortugas en las que se muestra la zona de inundación y su situación vulnerable ante un evento mayor.

CALETAS SAMANCO Y LOS CHIMUS

Salida del mar 200 metros aproximadamente, daños a embarcaciones pequeñas. No se reportaron daños personales,

aunque versiones señalan que en las caletas La Gramita y Los Chimus fallecieron otros dos (2) pescadores.

PLAYA VIENTO EL DORADO

Salida del mar a 200 metros aproximadamente. Evacuación de la playa a cargo del sargento de playa. Se determinó que 12 embarcaciones fueron varadas (de 1 a 3 toneladas), chalanas con remos presentaron daños parciales, 18 embarcaciones volteadas con pérdida de sus redes. No se registró daños a viviendas; 30 damnificados.

PLAYA LA CALETA

Salida del mar a 200 metros aproximadamente. La vía principal, pista Hospital La Caleta, inundada no afectando a las viviendas. El muelle del desembarcadero artesanal y muelle industrial fueron cerrados debido a que días antes se observó cierta braveza del mar, procediéndose entonces a la mencionada evacuación del personal y de los trabajadores del muelle.

CHIMBOTE

El distrito de Chimbote se encuentra ubicado en la bahía Ferrol. La Isla Blanca es una defensa natural contra tsunamis ubicada en la entrada de esta bahía. En Chimbote se encuentra el puerto del mismo nombre, ubicado en la falda del cerro La Paz, siendo precisamente las instalaciones del puerto la que sufrió los mayores daños.

Daños producidos por el momento de flujo y por inundación fueron registrados. Se determinaron fuerzas de oleaje, fuerzas de

arrastre y fuerzas de impacto. En la zona de Miramar Bajo (Av. San Pedro) 17 familias quedaron damnificadas, determinándose a 81 personas como damnificadas; mientras que en la zona de Coishco Viejo 20 familias resultaron damnificadas, siendo en total 110 las personas damnificadas. Esta zona de Miramar Bajo, así como otros pueblos jóvenes, se encuentran ubicados frente a la llamada Bocana Grande, que es por donde se canalizó el frente de onda luego de impactar contra la Isla Blanca.

Las medidas de protección ante futuros tsunamis serían la formulación de planes de evacuación, el funcionamiento de un adecuado sistema de alarma y la protección de edificaciones. Las Fotos N° 21 - 31 muestran a Chimbote y las instalaciones del puerto. La Foto N° 25 sirve como explicación de la inundación del puerto de Chimbote a causa del tsunami en estudio. Las Fotos N° 26 - 31 muestran diferentes zonas inundadas y que también lo serán por futuros eventos.

INSTALACIONES DE ENAPU S.A. TERMINAL MARITIMO (PUERTO)

Salida del mar a 200 metros de la playa. Destrucción de la caseta de control de seguridad, inundación de la oficina de seguridad en el muelle N°1; daños materiales como útiles de escritorio, archivos, etc., fueron registrados. En la posa de ENAPU varadura de una embarcación a la orilla de la playa. Se reportó una persona herida.

COISHCO

Coishco es un pueblo joven, una caleta de pescadores. Fue uno de los lugares más afectados por el tsunami del 21 de febrero

de 1996. Se determinó que el mar salió 200 metros aproximadamente. Evacuación de la población a cargo del sargento de playa.

Los daños producidos fueron inundación y caídas de paredes, como por ejemplo la del almacén de harina de pescado de una fábrica conservera. También se reportó la inundación del terminal saladero de pescado, 7 pescadores cordeleros fallecieron, 6 embarcaciones destruidas y 15 averiadas, 100 damnificados. Las inundaciones de viviendas provocaron que 15 viviendas fueran destruidas y otras 5 viviendas resultasen afectadas. Se confirmó que 37 familias resultaron afectadas por el tsunami, las cuales están pidiendo que se les permita mantenerse en el mismo lugar, señalando que son personas que tienen mucha vinculación con la playa.

La forma en V de la bahía sobre la cual se ubica Coishco, y que se abre directamente hacia el mar, fue un factor importante para aumentar los daños, a pesar de que Coishco tenga en la Isla Santa una defensa natural contra tsunamis. Dada su cercanía con la bahía Ferrol, fue muy posible que el frente de onda refraccionado por la Isla Blanca pudieran sumarse a las también refraccionadas aguas que provocó la Isla Santa que protege a Coishco, lo que originó una acumulación de las masa de agua. La Fotos N° 32 - 34 muestran la zona afectada de Coishco.

Las medidas recomendadas serían la formulación de planes de evacuación, la puesta en funcionamiento de un sistema de alarma y la construcción de pequeños espigones.

CUADRO 7.2

VICTIMAS EN COISHCO			
Sexo	Adultos	Menores	Sub-Total
M	7	-	7
F	-	-	-
Total			7

SANTA

Santa es un distrito ubicado al norte de Coishco. En este espacio geográfico se puede observar la presencia de grandes campos de cultivo y de una caleta de pescadores, llamada Caleta Santa. En la Caleta Santa existe un reducido número de viviendas, por lo que la región es propiamente un campo de cultivo. Está ubicado también en forma abierta al mar. Es en esta región que se produce la descarga de las aguas del río Santa hacia el mar, determinándose así que el delta del río Santa se encuentre en este lugar. Campo Santa es un lugar ubicado al norte de Santa, siendo una zona de difícil acceso, pero presenta las mismas características que Santa.

Fue la porción de costa comprendida entre Coishco y Santa en donde se produjeron los mayores daños, ya que se reportaron víctimas así como daños materiales, a saber, destrucción de pequeñas embarcaciones artesanales, destrucción de viviendas, etc. El límite de inundación llegó hasta las proximidades del puente Santa, el cual está ubicado a varios cientos de metros del mar. Por lo tanto, después de analizar los daños, las medidas de protección serían el funcionamiento de un adecuado sistema de alarma y la planificación de la costa.

En Playa Santa (Caleta Santa) se registró la salida del mar en 200 metros aproximadamente, lo que provocó la inundación de ranchos ribereños, la muerte de 4 pescadores artesanales (cordeleros) y una embarcación pequeña, volteada en el puerto.

CUADRO 7.3

VICTIMAS EN SANTA

Sexo	Adultos	Menores	Sub-Total
M	4	-	4
F	-	-	-
Total			4

7.4 Evaluación de Daños: Departamento de La Libertad

Las localidades estudiadas son: Guadalupito, Salaverry, Las Delicias, Huanchaco y Pacasmayo.

GUADALUPITO - SAN IGNACIO

El tsunami afectó tierras de cultivo cercana a la margen derecha del río Santa desde el puente ubicado a la altura del km 445 de la carretera panamericana norte. En este distrito fueron arrasados cultivos, tales como hortalizas (20 Has), maíz (20 Has), arroz (20 Has) y camote (20 Has). En total 80 Has de cultivo arrasado; 85 personas damnificadas por pérdidas de sus productos agrícolas. Se produjeron 6 fallecidos (4 fueron pescadores artesanales cordeleros) y 54 heridos que fueron atendidos en la posta de salud. Las fuerzas generadas que se determinaron fueron de oleaje y de arrastre.

CUADRO 7.4

VICTIMAS EN GUADALUPITO - SAN IGNACIO

Sexo	Adultos	Menores	Sub-Total
M	3	1	4
F	1	1	2
Total			6

SALAVERRY

En el distrito de Salaverry encontramos el puerto del mismo nombre. Se reportaron daños a pequeñas embarcaciones, las cuales fueron varadas. No se reportaron víctimas ni heridos. Las instalaciones del puerto no sufrió mayores daños debido a que se encuentra protegido por un espigón que disipó la energía de las olas. El material de construcción en el distrito es de albañilería, existiendo las de adobe, quincha y madera.

La ubicación del distrito de Salaverry respecto al mar la hacen vulnerable ante un evento mayor al estudiado, sobre todo los pueblos jóvenes que se encuentran en proceso de expansión y que están ubicados a poca altura respecto al nivel del mar. Ver Foto N° 37.

Adicionalmente este distrito presenta riesgo de conflagración por BOIL OVER debido a la presencia de los tanques de almacenamiento de combustible, propiedad de Petro-Perú, las cuales se encuentran localizadas en el centro mismo del distrito de Salaverry tal como puede verse en la Foto N° 39.

Medidas de protección adecuadas serían entonces la formulación de planes de evacuación, el funcionamiento de un

adecuado sistema de alarma, la planificación de las zonas costeras y por último, la protección de edificaciones.

LAS DELICIAS

Balneario ubicado al sur de Trujillo. La Foto N° 40 muestra el tipo de vivienda en la primera línea de ataque del tsunami. Las Delicias se encuentra a nivel del mar, razón por la cual es vulnerable ante un futuro evento mayor al estudiado existiendo el correspondiente riesgo de desastre.

Se reportaron daños materiales en las edificaciones, debido a que se inundaron muchas de ellas. Actualmente se viene ejecutando la construcción de un reservorio de agua, así como la ampliación del servicio de agua y desagüe. Esto demuestra el rápido crecimiento que viene experimentando los alrededores del Balneario Las Delicias . Las Fotos N° 41 y 42 muestran las diferencias del tipo de vivienda entre Las Delicias y las zonas de rápido crecimiento. La Foto N° 43 muestra los daños a las construcciones destinadas a comercio, en las cuales los daños fueron mayores debido al tipo de material del que estaban hechas (madera). No se reportaron víctimas en ambos casos.

Medidas de protección recomendadas ante un gran evento serían la formulación de planes de evacuación, planificación de las zonas costeras, sistemas de alarma y la protección de las edificaciones existentes.

HUANCHACO

Balneario ubicado al norte de Trujillo. Este balneario, así como Huanchaquito, se encuentran a nivel del mar, según se

muestra en la Foto N° 44. El tsunami en estudio no provocó grandes inundaciones, en consecuencia no se reportaron daños materiales de consideración. En la Foto N° 45 se observa la dirección de la corriente del mar, la misma que va a dar o "reventar" a un lugar llamado Boquerón.

En la Foto N° 49 se observa el tipo de material empleado para la construcción, en la cual vemos que éstas son de albañilería, adobe, quincha y madera. Aunque su situación es muy vulnerable a un tsunami de gran magnitud, se puede ganar altura rápidamente. Por esto, se recomienda la planificación de las zonas costeras, la puesta en funcionamiento de un adecuado sistema de alarma y la construcción de obras de defensa como espigones que disipen la energía de las aguas. Las Fotos N° 44 a la 49 muestran el balneario de Huanchaco y zonas aledañas.

PACASMAYO

El Puerto de Pacasmayo se encuentra ubicado en el distrito del mismo nombre. Se produjeron daños leves a pequeñas embarcaciones, debido a que fueron varadas. Daños personales no fueron reportados.

Por su ubicación es vulnerable ante un gran evento. De producirse, la población puede ganar altura rápidamente. La medida de protección recomendada sería entonces la formulación de planes de evacuación que permita a los habitantes abandonar la zona potencialmente inundable lo más rápido y seguro posible. Las Fotos N° 50 a la 53 muestran las instalaciones del Puerto de Pacasmayo y sus alrededores.

7.5 Evaluación Final

La evaluación final de los daños y efectos ocasionados por el tsunami, que el 21 de febrero de 1996 afectó la porción de costa comprendida entre el Callao y Pacasmayo, se realiza mediante cuadros en los que se indica el número de víctimas así como de heridos registrados. También se indica mediante cuadros el número de embarcaciones destruidas y averiadas, y por último el número de zonas de cultivos arrasadas .

CUADRO 7.5

NUMERO TOTAL DE VICTIMAS

LUGAR	VICTIMAS
SUPE PUERTO	2
COISHCO	7
SANTA	4
GUADALUPITO	6
LA GRAMITA Y LOS CHIMUS	2
TOTAL	21

El número de heridos registrados en Chimbote, Coishco, Santa, Samanco y Casma por las autoridades competentes fue de 121 personas.

CUADRO 7.6

CUADRO DE DAMNIFICADOS

LUGAR	TOTAL	MOTIVO
MIRAMAR (Chimbote)	81	Viviendas afectadas, 17 familias afectadas
COISHCO	100	Viviendas afectadas, 20 familias afectadas
CASMA	240	Inundación parcial de casas, sin pérdidas
GUADALUPITO	85	Pérdidas de cultivos

CUADRO 7.7**EMBARCACIONES AFECTADAS Y DESTRUIDAS**

LUGAR	EMBARCACIONES DESTRUIDAS	EMBARCACIONES AFECTADAS
PTO DE CHIMBOTE	-	1
COISHCO	6	15
EL DORADO	-	30
LA GRAMITA - CHIMUS	2	13
TOTAL	8	59

CUADRO 7.8**VIVIENDAS AFECTADAS Y DESTRUIDAS**

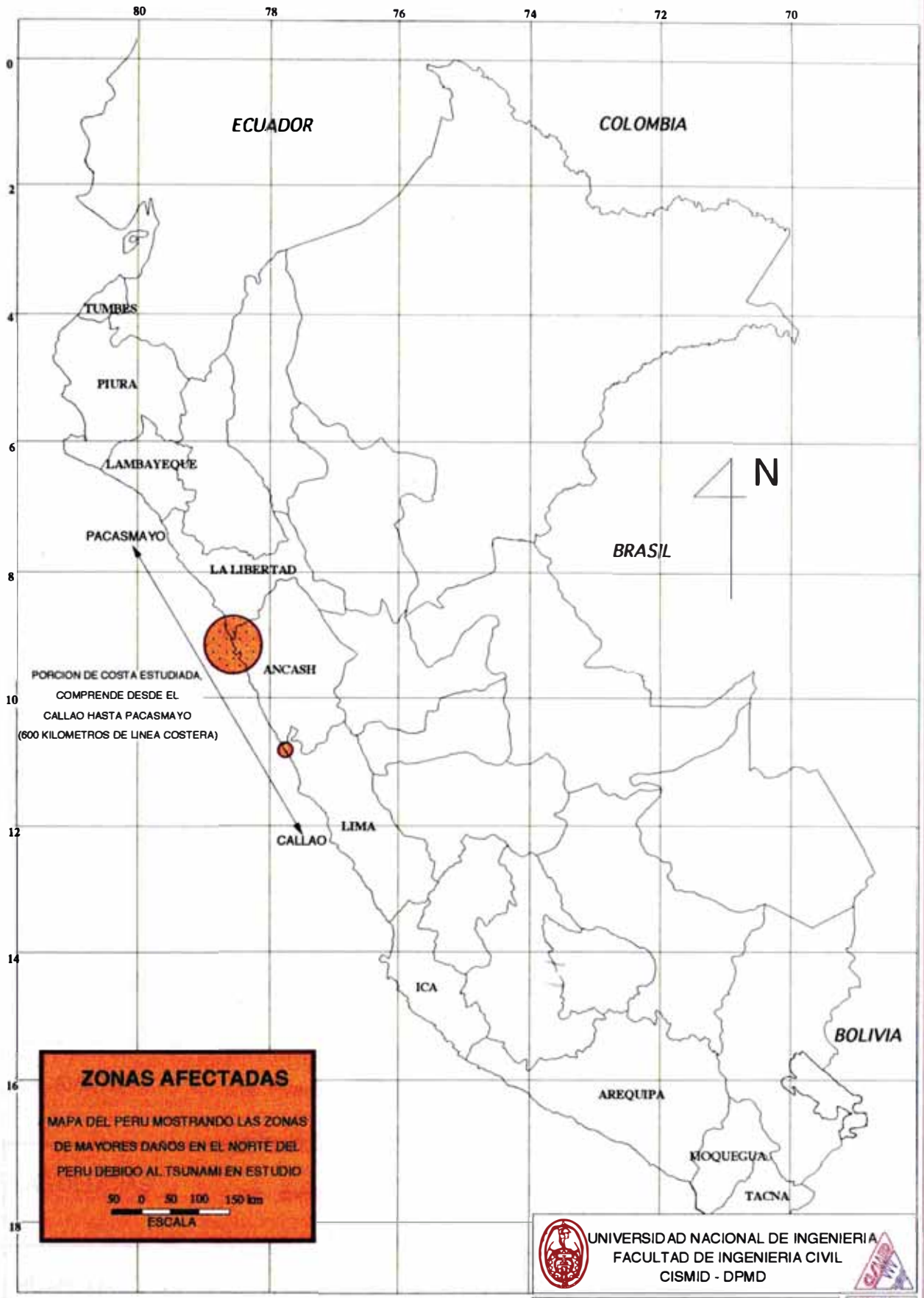
LUGAR	VIVIENDAS DESTRUIDAS	VIVIENDAS AFECTADAS
COISHCO	15	5
SANTA	1	-
LA GRAMITA	20	-
CASMA	-	40
TOTAL	36	45

CUADRO 7.9**CULTIVOS AFECTADOS**

LUGAR	CULTIVOS	HECTAREAS
SANTA	ALGODON	40
	CAMOTE	20
GUADALUPITO	HORTALIZAS	20
	MAIZ	20
	ARROZ	20
TOTAL		120

Las víctimas en Coishco y algunas víctimas en el área del río Santa eran pescadores peñeros que fueron cojidos en las rocas por el tsunami. Las otras muertes se produjeron debido a que en ese momento pobladores de San Ignacio se estaban dedicando a la recolección de leña, mientras que en Campo Santa otras dos personas se dedicaban a la recolección de oro. Entre estas víctimas habían 2 niños de 7 y 11 años.

La Lámina 7.1 muestra las zonas afectadas. Asimismo, los daños y efectos, que ya fueron mencionados en los puntos anteriores y que sirvieron de base para realizar la evaluación final anterior, se muestra en forma resumida en el Cuadro 7.10 llamado "Evaluación de los Daños y Efectos el Tsunami del 21 de Febrero de 1996 y Medidas Recomendadas para Futuros Eventos".




ZONAS AFECTADAS

MAPA DEL PERU MOSTRANDO LAS ZONAS DE MAYORES DAÑOS EN EL NORTE DEL PERU DEBIDO AL TSUNAMI EN ESTUDIO

50 0 50 100 150 km

ESCALA

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
TESIS : ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996		AUSPICA: HIDRONAV
PLANO : MAYORES ZONAS AFECTADAS		LAMINA: 7.1
TESISTA : Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR : Ing. Julio Kuroiwa H.	FECHA : Ene. 1997

Capítulo 8

Metodología para Formular Planes de Evacuación

8.1 Generalidades

Los fenómenos de la naturaleza son frecuentes y los daños que ocasionan, si bien es cierto son inevitables, pueden ser mitigados mediante un conjunto de normas y acciones preestablecidas.

Este conjunto de normas y acciones surgen como consecuencia de aplicar una metodología, la misma que nos permite considerar todos los aspectos que deben ser abordados cuando se estudia una localidad. En el caso de tsunamis, este conjunto de normas y acciones constituyen un Plan de Evacuación, que es una medida de protección del cual pueden disponer las localidades costeras.

En este capítulo estableceremos una metodología que contiene los diferentes conceptos y criterios a emplearse para la elaboración del plan de evacuación. Tales conceptos y criterios a seguir serán expuestos de acuerdo al orden en que, suponemos, deberán ser tratados. Parte de la metodología que se menciona en este capítulo fue empleada en la elaboración de planes de evacuación para la costa central y sur del Perú. Aunque su eficacia no ha sido aun comprobada ante un tsunami real, también es cierto que los simulacros realizados en diferentes ciudades del Perú han demostrado que se pueden mitigar los daños.

8.2 Planes de Evacuación

Tienen por objetivo la evacuación pre-impacto de la población hacia zonas seguras previamente señaladas, brindándoles de esta forma protección y seguridad. Experiencias recogidas en otros países, señalan que la medida más efectiva para proteger a la población es evacuarla de la zona inundable. La evacuación planificada de la población previamente ensayada constituye, pues, el método más efectivo de brindar protección.

El tiempo de llegada de la primera ola a la costa y la altura de esta ola en el momento de la inundación, son datos importantísimos para formular el Plan de Evacuación. Con estos datos se puede abordar, de manera secuencial, los siguientes puntos: localización y delimitación de la zona crítica, estudio de la realidad local, zonas de refugio, rutas de evacuación y finalmente, la formulación del conjunto de acciones coordinadas a ejecutarse durante la evacuación.

8.2.1 Localización y Delimitación de la Zona Crítica. Dentro de la localidad que se estudia se delimita la zona que, de acuerdo a las características topográficas y de ubicación en relación al mar, se estima será inundada por acción del tsunami.

Sucede que en muchas ocasiones el límite de la zona inundada (run-up) ha coincidido con la altura de la ola en la costa; pero tal afirmación no puede tomarse como referencial. El comportamiento en tierra del tsunami es bastante complejo y normalmente no predecible. Por esta razón surge el inconveniente de como delimitar la zona de inundación con la mayor seguridad posible.

Una manera de resolver este problema consiste en delimitar nuestra zona considerando los efectos de la pendiente del terreno, y la posible convergencia o divergencia de la energía del tsunami, que hacen que el valor del run-up varíe en ambos sentidos. Para esto es entonces importante determinar la altura que la ola del tsunami alcanzaría en la costa. Esta altura de ola deberá considerar el caso más crítico de la variación del nivel de la marea que se presenta en la zona estudiada, la forma del litoral, y otros factores que influyen en el tamaño de esta altura.

8.2.2 Estudio de la Realidad Local. Delimitada nuestra zona de inundación, el siguiente paso es efectuar un estudio de la realidad local. Nos limitaremos a realizar la investigación en la zona inundable previamente establecida. Así, los diferentes aspectos a considerar son los que se indican a continuación

- Población** : Número, edad y distribución.
- Salud** : Ubicación de los centros hospitalarios y postas médicas.
- Plan urbanístico** : Localización de amplias áreas verdes fuera de la zona inundable.
- Servicios básicos** : Operatividad de los sistemas de agua, desagüe y energía eléctrica.
- Daños producidos:** Estimar los posibles daños que ocasionaría el sismo previo a las edificaciones dentro del área inundable.

8.2.3 Zonas de Refugio. De acuerdo a la metodología planteada, la localización de las zonas de refugio es el tercer paso a seguir. El planeamiento e implementación de los refugios es parte importante del Plan de Evacuación.

Los refugios son los lugares donde se da albergue a la población evacuada de las zonas inundables y se pueden clasificar, de acuerdo al tipo de función que van a desempeñar, en Refugios Temporales y Refugios de Emergencia.

8.2.3.1 Refugios Temporales. Son los lugares donde la población evacuada permanecerá algunos días o semanas, mientras dure la emergencia. Su ubicación estará fuera del área inundable, pero contigua a ella, dando frente a las más importantes vías de evacuación o en la confluencia de varias de ellas. En cuanto a su elección, escogeremos grandes áreas de terreno cuyo cambio temporal de función permita continuar, en la medida de las posibilidades, las principales funciones urbanas como son

producción, abastecimientos, transporte, etc. Además, deberán estar preparados para proporcionar servicios básicos como alimentación, agua, abrigo, higiene, salud y otros. Pueden ser locales escolares o lugares abiertos como parques zonales, ya que permiten albergar a un gran número de damnificados, facilitando de esta manera la prestación de servicios.

En general, se recomienda que la organización dentro de un refugio temporal se realice bajo cuatro grandes áreas: *administración, residencia, salud y servicios.*

8.2.3.2 Refugios de Emergencia. Son inmuebles que se caracterizan por poseer áreas disponibles con fines de refugio en niveles ubicados por encima de los 10 metros sobre el nivel del mar. Están localizados en la zona inundable y, a pesar de ello, constituyen sitios de seguridad, debido a que los inmuebles poseen ciertas características como las presentadas a continuación:

1. Son sismoresistentes, y en consecuencia, no presentan daños o fisuras en sus elementos tales como vigas, columnas, placas y/o muros portantes de albañilería.

2. Son suficientemente altos, lo que permite que sobresalgan sobre el nivel máximo de inundación.

3. Las construcciones son de concreto y/o ladrillo, de modo que pueden resistir el efecto hidrodinámico de las olas, el impacto de pequeñas embarcaciones y presentan una cimentación que les permite resistir la erosión provocadas por las olas.

La finalidad de estos refugios será la de ofrecer albergue a madres de familia con niños pequeños, ancianos, personas con desventajas físicas, etc; que no pueden abandonar la zona inundable. Para estimar la población que se pueda albergar en un determinado inmueble, se considera (como promedio) que cada persona ocupa un metro cuadrado del área con fines de refugio.

Estos refugios también tienen que ser tsunami resistentes, por lo cual deben satisfacer ciertos requerimientos estructurales. Al respecto podemos indicar que han resistido bastante bien a los tsunamis las estructuras de concreto reforzado y ladrillo, con muros paralelos a la dirección de avance de las olas, de tal manera que ofrezcan el menor frente posible a la presión hidráulica y con su cimentación protegida contra la erosión. En cambio, las construcciones ligeras de madera sin el debido anclaje a la cimentación han sido completamente destruídas. Lo mismo sucede con las construcciones de adobe y quincha.

En resumen, para determinar los refugios de emergencia vamos a considerar los siguientes aspectos:

Ubicación y localización

Tipo de uso

Material de construcción

Antigüedad

Estado de conservación

Tipo de cimentación y su profundidad

Tipo de estructura

Altura

Áreas disponibles con fines de refugio

Existencia de sistema de comunicación

8.2.4 Determinación de las Rutas de Evacuación. Estas rutas deberán permitir acceder a lugares de mayor cota topográfica lo más rápidamente posible. De acuerdo a su importancia se clasifican en principales y secundarias.

8.2.4.1 Rutas de Evacuación Principales. Estas rutas quedarán establecidas bajo la condición de que serán las que reciban el mayor flujo de vehículos y peatones, provenientes ambos de la zona inundable o bien de unas rutas afluentes llamadas rutas de evacuación secundarias.

Las rutas principales de evacuación, que se determinan en esta tesis, cumplirán con tres requisitos:

1. Deberán tener pendiente ascendente.
2. Deberán poseer un ancho de vía apropiada de acuerdo a la masa poblacional y vehicular, por lo que se escogerá rutas de doble tráfico.
3. Deberán ser transitables después del sismo, de tal manera, que el colapso de las edificaciones que las bordean no las obstruyan.

También se optará por dejar para la evacuación vehicular el lado derecho de la ruta, saliendo de la zona de inundación; y el lado

izquierdo para los peatones; ya que ese lado quedará libre al momento de darse la alarma, lo que impedirá el ingreso de vehículos a la zona de inundación.

8.2.4.2 Rutas de Evacuación Secundarias. Las rutas de evacuación secundarias, tanto peatonal como vehicular, son más angostas que las principales. Estas rutas pueden ser utilizadas para evacuación directa o bien conducir el flujo de vehículos y peatones hacia las rutas principales, en forma de rutas afluentes. Para la elección de estas rutas dependerá mucho la localidad a estudiar. Puede resultar, si la realidad local lo determina, que estas rutas secundarias asuman el rol de rutas principales.

En conclusión, para determinar la capacidad de servicio de una ruta de evacuación, lo primero será definir el tipo de servicio que prestará la ruta durante el periodo de evacuación y la zona a la que sirve principalmente; luego el recorrido que seguirá, así como sus dimensiones, perfil topográfico, estado de conservación y demás aspectos; y finalmente, definir el ancho utilizable y los puntos de probable obstrucción luego de ocurrido el desastre.

8.2.5 Conjunto de Acciones Coordinadas a Ejecutarse Durante el Proceso de Evacuación. Las acciones que se ejecutarán durante el periodo de evacuación se realizarán mediante la colaboración de las llamadas Brigadas de Emergencia, que son grupos organizados provenientes de los diferentes sectores institucionales o de gobierno local, así como pobladores voluntarios, debidamente entrenados y capacitados dentro de sus respectivas áreas.

La organización de la evacuación de una localidad se llevará a cabo con la ayuda de la difusión general de una Cartilla de Prevención ante Tsunamis, que contendrá las instrucciones básicas que se deberán seguir durante el periodo crítico, las cuales se refieren al riesgo relativo de ataque de tsunami que afronta cada zona dentro de una localidad, las rutas de evacuación cuyo uso se recomienda y la ubicación de las zonas de seguridad. Las instrucciones aludidas deberán ser difundidas entre la población en forma esquemática. Se espera que estas acciones incrementen el grado de participación de la población durante el proceso de evacuación.

El responsable de realizar los ensayos y dirigir la evacuación en caso de producirse tsunamis, es el jefe de Defensa Civil de la respectiva jurisdicción. Por ley, en las capitales provinciales y distritales, son los respectivos alcaldes. La Marina de Guerra, que mediante las capitanías controla los principales puertos de nuestro litoral, debe ser uno de los principales participantes en todas las fases de preparación para hacer frente a los tsunamis; es decir, deben participar el sector público, el sector privado y la población en general. Las tareas a cumplirse durante el período de evacuación serán las siguientes:

1. Efectuar la rápida evacuación de personas que se encuentren en colegios, centros asistenciales, albergues, asilos y otros inmuebles.

2. En lo posible, mantener libres de obstáculos las vías de evacuación controlando que no ingresen vehículos a la zona crítica.

3. Canalizar en forma eficiente el flujo peatonal y vehicular durante la evacuación, en función de la localización de los refugios.

4. Rescatar y evacuar hacia zonas de seguridad a los heridos a consecuencia del sismo.

5. Organizar la recepción de la población evacuada en los refugios de emergencia.

Debido a estas acciones que se deberán cumplir durante el período de evacuación, las Brigadas de Emergencia quedarán clasificadas como: brigadas de alarma y comunicaciones, brigadas de evacuación general, brigadas de vías o rutas de escape, brigadas de transporte y colaboración vehicular, brigadas de inspección de seguridad y refugio, brigadas de rescate y primeros auxilios, brigadas contra incendios y daños materiales. El mismo nombre de las brigadas nos dice la función que van a desempeñar.

Capítulo 9

Formulación del Plan de Evacuación para Chimbote

9.1 Generalidades

Uno de los objetivos de esta tesis es la formulación del plan de evacuación para la ciudad de Chimbote. Para las otras localidades que se encuentran dentro de la zona de estudio, la formulación de planes de evacuación deberá seguir el mismo procedimiento que el empleado para Chimbote, acorde con la metodología propuesta en el Capítulo 8.

La altura y tiempo de llegada de la primera ola a la costa fueron determinados haciendo uso de los planos batimétricos de cada región, los cuales fueron proporcionados por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (HIDRONAV).

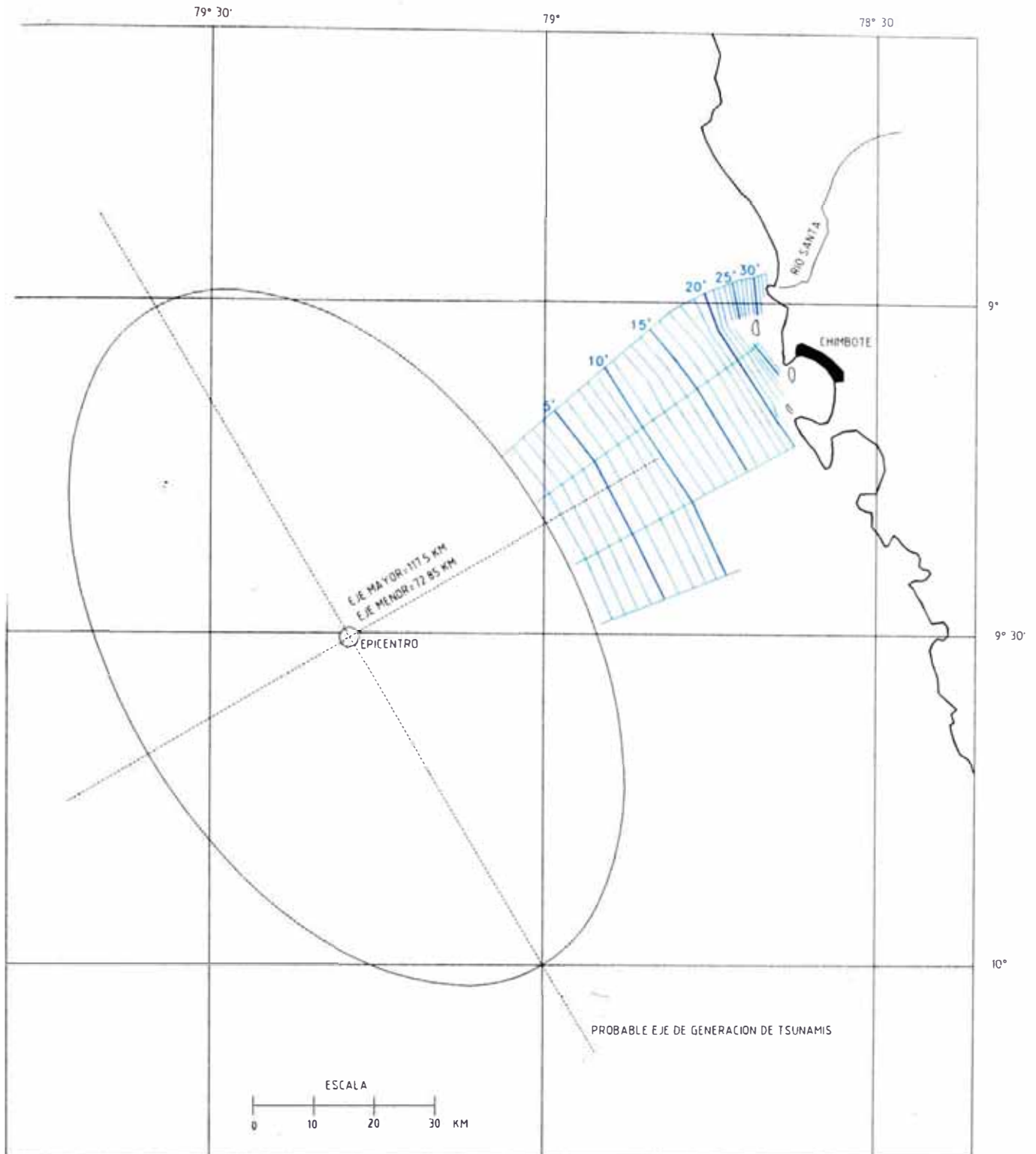
9.2 Plan de Evacuación de Chimbote



De acuerdo con la metodología propuesta, se formula el plan de evacuación para la ciudad de Chimbote. También se realiza la evaluación de los posibles efectos y daños debido a un futuro evento.

9.2.1 Formulación del Plan de Evacuación

a) Cálculo del Tiempo de Llegada de la Primera Ola a la Costa. El tiempo de llegada se calculará en forma gráfica, trazando para ello la respectiva Curva de Refracción (la metodología para su elaboración fue dada en el Capítulo 4). El tiempo que se calcule corresponderá al caso en que se ubique el epicentro del sismo justo frente a Chimbote, buscando de esta manera obtener el tiempo crítico de llegada de la primera ola a la costa. Para esto debemos conocer la posición del probable eje de generación de tsunamis en nuestra zona de estudio. Esta posición la podemos determinar en base al registro de los grandes sismos que afectaron dicha zona, empleando para ello el mapa de sismicidad y alineamientos elaborado por el IGP. Luego de realizar el análisis mencionado, se muestra en la Lámina 9.1 la ubicación de este eje referido a un sistema de coordenadas. En la misma lámina se muestra gráficamente que el tiempo de llegada de la primera ola a la costa es de 25 minutos. Este tiempo es el que dispone la población para evacuar la zona inundable.

b) Cálculo de la Altura de Ola. El cálculo de la altura de ola H , que será de utilidad para determinar la zona de inundación, merece para el caso de Chimbote un tratamiento especial. En principio, un estimado inicial de la altura de ola nos lo proporciona la fórmula



 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
TESIS: ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996		ASPIRANTE HIDRONAY
PLANO: TIEMPO DE LLEGADA DE LA PRIMERA OLA A LA COSTA DE CHIMBOTE		LAMINA 9.1
TESISTA: Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR: Ing. Julio Kuroiwa H.	FECHA: Marz. 1997

empírica de Yamaguchi. Así, aplicando esta fórmula desde la entrada de la bahía hasta la isóbata de los 100 metros y apoyándonos en un plano batimétrico, obtenemos que la altura inicial h es 2,0 metros.

Cuando la ola ingrese en la bahía estará sometida a perturbaciones locales. Una de las perturbaciones más importantes que sufrirá la podemos determinar haciendo uso de la ley de GREEN, la cual nos indica la variación que experimentará la altura de ola dentro de la bahía.

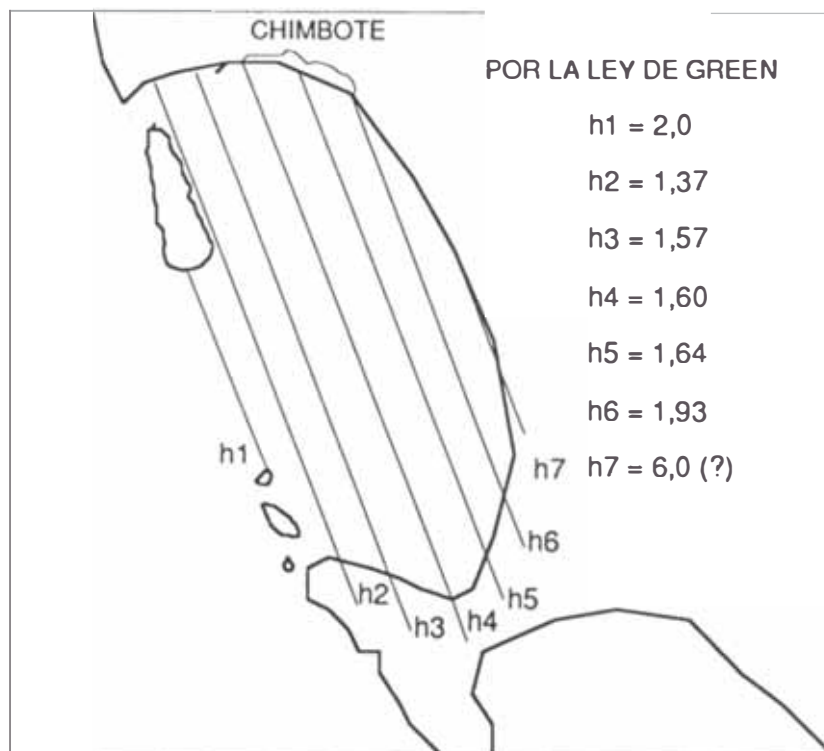


Figura 9.1 Variación que experimenta la altura de ola en la bahía Ferrol

El análisis anterior nos muestra que los tsunamis afectarían de modo variable, en lo que respecta a la gravedad de los daños, la costa de Chimbote. Otro factor importante que incidirá en la gravedad de los daños, en determinadas zonas, es el ángulo con

que ingresaría el frente de onda a la bahía. En la figura anterior también notamos que los mayores daños se producirán en la parte central de la bahía debido a la tendencia de la ola de incrementar su altura.

Sin embargo, para fines de trabajo, podemos considerar una altura de ola promedio h_p de 2,0 m. En consecuencia, la altura H estará determinada de la siguiente manera:

$$H = h_p + v_m + o_f$$

h_p = calculada por Yamaguchi, que es igual a 2,0 m.

v_m = corresponde a la variación del nivel del mar. Para el caso de Chimbote es característico que en pleamar sea de 0,6 m (Tabla de Mareas, HIDRONAV).

o_f = otros factores como bravezas de mar, etc; 1,2 m.

En consecuencia:

$$H = 2,0 \text{ m} + 0,6 \text{ m} + 1,2 \text{ m}$$

$$H = 3,8 \text{ m}$$

Debido al análisis por GREEN esta altura puede considerarse de 3,8 m hacia el norte y sur de la bahía, teniendo una tendencia a incrementar su altura en el vértice de la misma.

c) Determinación de la Zona de Inundación y el Límite Inundable. La zona de inundación se determinó haciendo uso de la metodología propuesta para tal fin en el Capítulo 4. En este caso estamos considerando que la altura de ola decrecería con una pendiente de

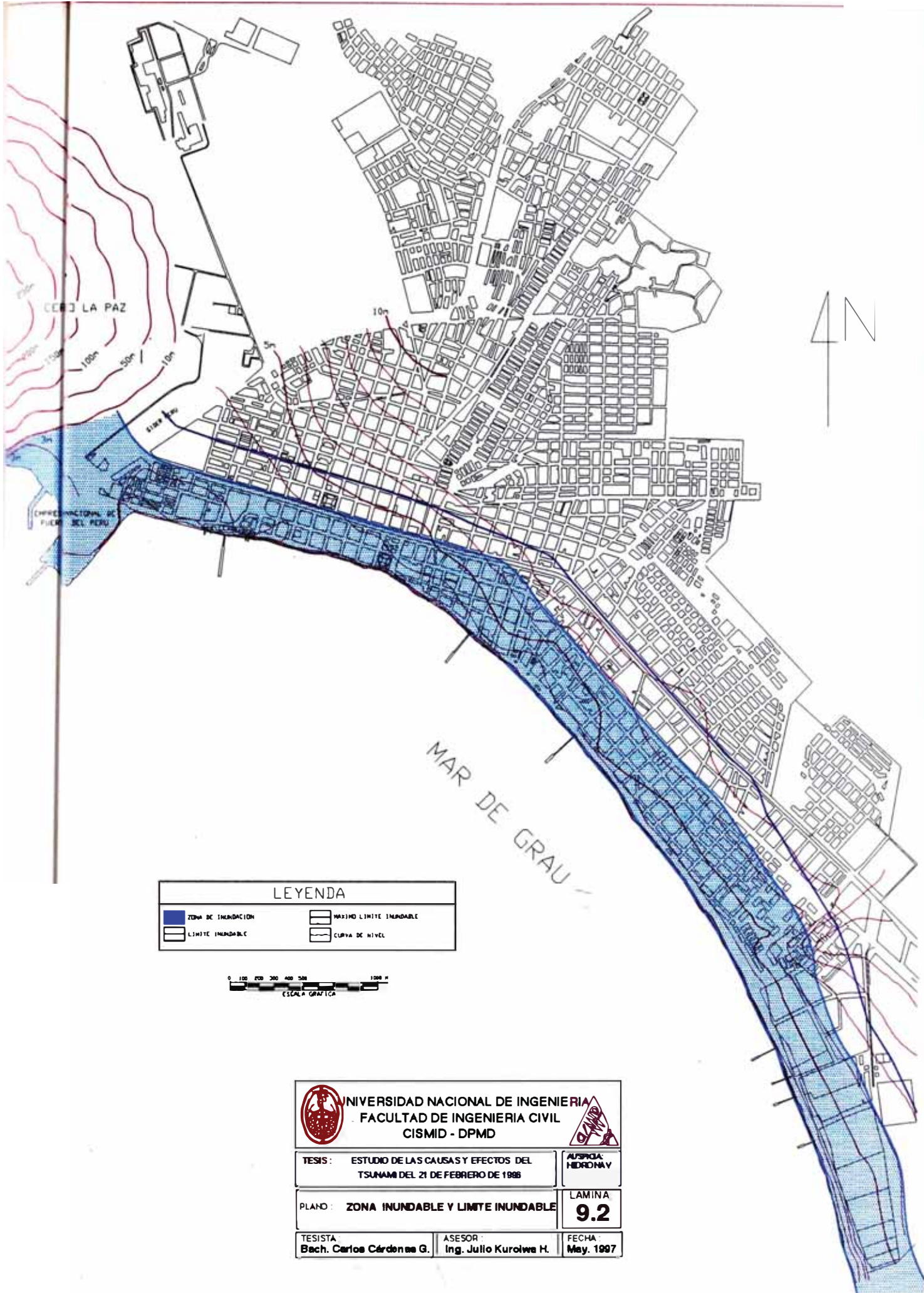
1/100 debido a efectos de fricción hacia el norte y centro de la bahía, y 1/200 para el resto de la bahía.

Al aplicar el método anterior, se determinó que el límite de la zona de inundación y el máximo límite inundable quedan cerca de avenidas muy conocidas en Chimbote, y que además son paralelas a la costa. Por lo tanto, fue conveniente elegir a éstas avenidas como los límites de la zona de inundación y el máximo límite inundable. Estos límites se muestran en la Lámina 9.2

d) Estudio de la Realidad Local

d.1) Uso Actual de la Zona Costera Inundable. En la actualidad, la mayoría de las principales actividades económicas que se desarrollan en Chimbote se concentra dentro de la zona inundable. Una inspección de la zona nos permite ver 3 sectores claramente diferenciables, las cuales se muestran en la Lámina 9.3. En ella, el sector 1 corresponde a las numerosas fábricas. El sector 2 corresponde mayoritariamente a viviendas y escuelas. El sector 3 corresponde también a viviendas, pero se caracteriza por que en ella se desarrolla las actividades bancarias, numerosos hoteles, etc., por lo que allí muchas de las construcciones son de varios pisos. En los límites de este último sector se encuentra las instalaciones del puerto de Chimbote y la urbanización La Caleta.

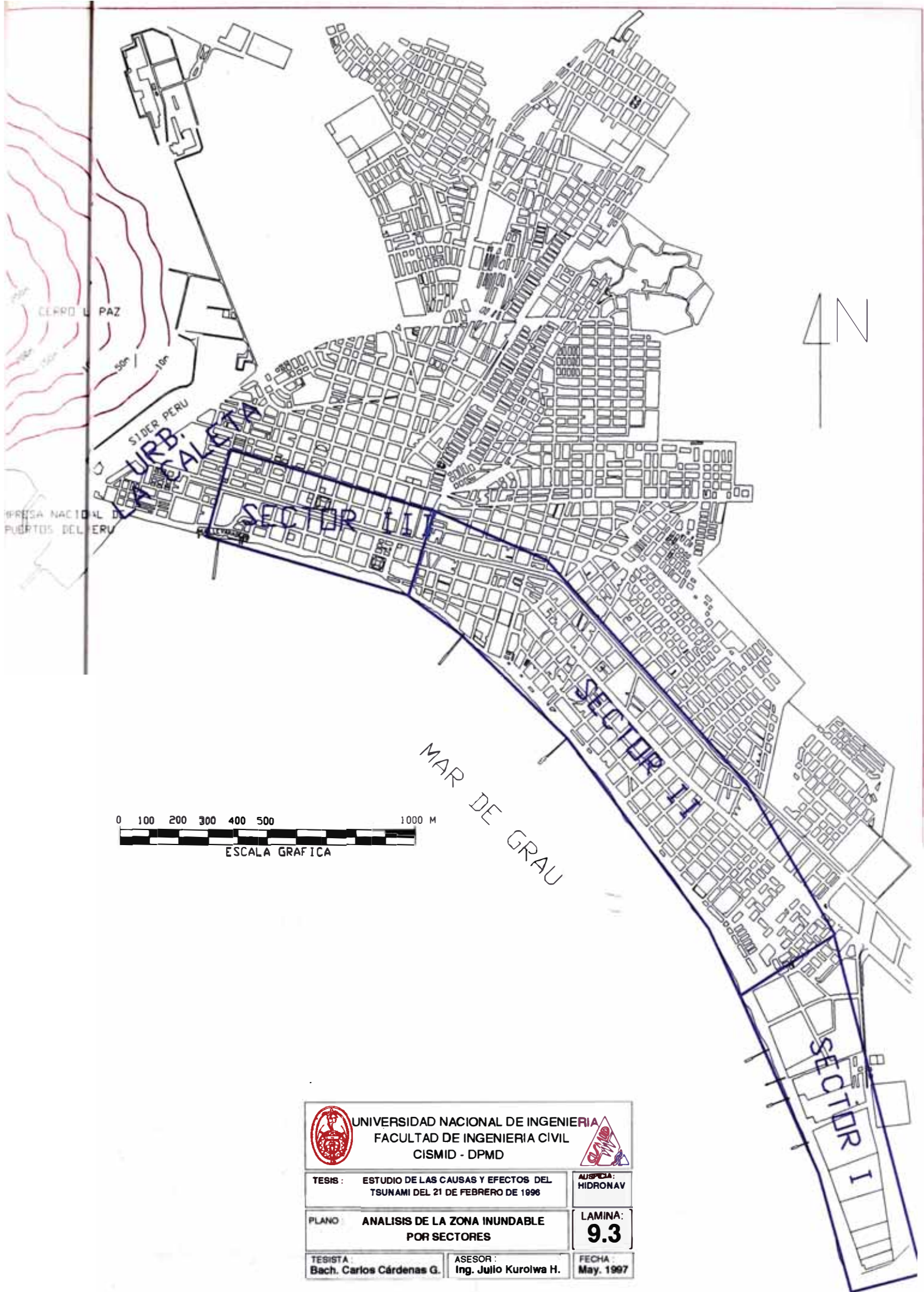
Es importante hacer notar que la costa de Chimbote sufre, de manera importante, los efectos de la braveza del mar cuando éstas se presentan. Por eso, el problema de erosión está afectando a muchas de las viviendas que se encuentran limítrofes con el mar, principalmente la del sector 2.





LEYENDA	
	ZONA DE INUNDACION
	LIMITE INUNDABLE
	MAXIMO LIMITE INUNDABLE
	CURVA DE NIVEL



	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
	TESIS: ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1986	AUSPICIA: HIDRONAV	
PLANO: ZONA INUNDABLE Y LIMITE INUNDABLE	LAMINA 9.2		
TESISTA: Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR: Ing. Julio Kuroiwa H.	FECHA: May. 1997	



 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL CISMID - DPMD		
TESIS : ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 21 DE FEBRERO DE 1996	AUSPICIA: HIDRONAV	
PLANO : ANALISIS DE LA ZONA INUNDABLE POR SECTORES	LAMINA: 9.3	
TESISTA : Bach. Carlos Cárdenas G.	ASESOR : Ing. Julio Kuroiwa H.	FECHA : May. 1997

d.2) Material de Construcción. En el sector 2 las viviendas son generalmente de un sólo piso. El material empleado para la construcción de las viviendas es variado. Es así que se puede notar la presencia de viviendas hechas con material noble, predominando las construcciones de adobe y observándose algunas de madera. En el sector 3 la mayoría de las edificaciones están hechas con material noble y son de varios pisos debido a las funciones que prestan. Estas edificaciones se encuentran a ambos lados de la Av. Enrique Meiggs.

d.3) Fábricas o Empresas Instaladas dentro de la Zona de Inundación. Las fábricas se encuentran ubicadas mayormente en el sector 1 calculándose que son un promedio de 15; muchas de ellas son productoras de harina y conserva de pescado, existiendo también las instalaciones del SIMA, la Base Naval de Chimbote, los tanques de almacenamiento de Petro-Perú, etc. En el sector 2 se observan pequeñas fábricas, y en el sector 3 se observa la presencia de algunos almacenes y empresas.

d.4) Colegios u Hospitales dentro de la Zona de Inundación. El hospital más importante dentro de la zona de inundación es La Caleta, ubicado en la urbanización del mismo nombre, la cual se encuentra a pocos metros del mar. Aparte de este hospital existen muchas postas médicas. Respecto a los colegios, son varios los que se hallan dentro de la zona inundable, correspondiendo a colegios estatales. La distribución se muestra en la Lámina 9.4.

d.5) Estado de las Vías. Las vías utilizadas para el tránsito vehicular y peatonal en el sector 1 y sector 2 son trochas de un sólo

sentido, ya sea entrando o saliendo de la zona inundable. Desde el sector 3 hacia adelante se nota la presencia de vías asfaltadas, bordeadas por las respectivas aceras en buen estado de conservación. Algunas de estas vías son de doble sentido.

d.6) Datos de Población. Según el INEI, la población nominalmente censada en Chimbote fue de 269 000 habitantes en 1993. La proyección estimada para 1996 señala 284 500 habitantes, concentrados principalmente en 57,5 km².

d.7) Condiciones Económicas de la Población Afectada. Los lugares con mayor capacidad de recuperación en caso de desastre corresponden al sector 1 donde se encuentran instaladas las diversas fábricas. Parte del sector 3 y la urbanización La Caleta también se encuentran dentro de esta categoría. En la urbanización La Caleta se estima que los daños producidos por el impacto del tsunami no será tan severo como en los dos sectores anteriores. Gran parte del sector 2, que corresponde en su gran mayoría a la población de menor capacidad económica, es la más vulnerable ante el ataque de tsunamis por estar ubicada muy cerca al mar y en el vértice de la bahía. Es por eso que la ayuda deberá ser orientada principalmente a ese lugar.

d.8) Presencia de Algún tipo de Defensa. Afortunadamente la ciudad de Chimbote se encuentra protegida por una defensa natural que lo constituye la Isla Blanca, cuya favorable posición en la entrada de la bahía le permite funcionar como un enorme muro de contención capaz de restar energía y dispersar la onda del tsunami, por lo cual es casi seguro que ésta ingrese por dos frentes: uno por

uno por la Bocana Chica y el otro por la Bocana Grande.

e) Determinación de los Refugios Temporales y Vías de Evacuación.

La determinación de estos lugares está en función de la máxima zona de inundación que pueda producirse en Chimbote, y cuya demarcación ya fue determinada en el punto c. Después de analizar las posibles vías de evacuación y refugios temporales en la zona de estudio, se llegó a elegir las mostradas en la Lámina 9.4.

9.2.2 Puesta en Funcionamiento del Plan de Evacuación

El Plan de Evacuación entrará en funcionamiento cuando se determine la posibilidad de un ataque por tsunami. Si el tsunami es de origen lejano, el factor tiempo deja de ser primordial, por lo que la evacuación de la población puede efectuarse en forma ordenada y tranquila. Pero si el tsunami es generado por un sismo muy fuerte, con epicentro cerca a la costa, el factor tiempo resulta ser muy importante debido al poco tiempo que se demora en llegar la primera ola del tsunami. En este caso el sismo es la primera señal de alerta. Un sismo cuyas características sean iguales o mayores a las referidas a continuación, puede originar tsunami: si es difícil permanecer de pie, si es dificultoso conducir automóviles y, si se observan derrumbes en diversas edificaciones. En general, si el sismo tiene intensidad mayor o igual a VIII en la escala de Mercalli Modificada.

De producirse el caso anterior, se deberá evacuar la zona inundable en forma inmediata a través de las vías de evacuación señaladas en la Lámina 9.4 y en dirección a los refugios temporales. El tiempo de permanencia en esos lugares dependerá de las

características del tsunami. Informaciones históricas señalan al respecto, considerando la ocurrencia de un gran tsunami, que las olas más altas son en número de 10 a 15, después de las cuales se observa que la amplitud decrece notoriamente. Si se asume que el periodo de estas olas es de 30 minutos, se concluye que el mar estará fuertemente perturbado unas 7 ó 8 horas. Sin embargo, los diversos daños que el tsunami pudiera causar en la zona inundable, obligan a una permanencia razonable en los refugios de 24 horas.

9.2.3 Estimación de los Posibles Efectos

a) Población Damnificada. La población damnificada, en caso ocurra un tsunami con las características que venimos asumiendo, se puede estimar conociendo el área inundable.

De la Lámina 9.4 estimamos que el área inundable es 3,72 km² de superficie. Si consideramos que los 269 000 habitantes se hallan concentrados principalmente en 57,5 km², obtenemos 4 678 hab/km² que multiplicados por 3,72 km² dan como resultado 17 398 damnificados. Si consideramos la población proyectada obtenemos 18 400 damnificados. Sin embargo, de presentarse el tsunami en día laborable, la población afectada será mucho mayor.

b) Viviendas Afectadas. De acuerdo con lo que venimos diciendo, las viviendas del sector 2 serán las más afectadas; primero por la ocurrencia del sismo previo y segundo por el impacto del tsunami. En el sector 3 estos daños serán menores, esperando que muchas de estas edificaciones muestren gran capacidad de resistencia. Lógicamente que los mayores daños, debido al impacto del tsunami, se producirán en aquellas viviendas ubicadas frente al mar, y a

medida que el tsunami penetre en tierra los daños causados serán por inundación.

c) Daños a Instalaciones Portuarias y Embarcaciones. Las instalaciones del puerto de Chimbote serán una de las más afectadas debido a que su posición está frente a la Bocana Chica. El tsunami del 21 de febrero de 1996 se canalizó por esta entrada impactando contra el cerro La Paz y rebotando contra las instalaciones del puerto, produciendo mucho daño material. Es muy probable que aquel comportamiento se repita debido a la configuración de esta parte de la bahía, siendo el caso más desfavorable cuando el tsunami impacte directamente contra las instalaciones del puerto. Las embarcaciones que se encuentran a lo largo de la bahía serán llevadas tierra adentro debido a la fuerza de la ola, impactando luego contra las edificaciones. En este caso la medida recomendable es que las embarcaciones se internen mar adentro. Al respecto, se ha verificado que estando a 15 brazas de la profundidad no sufrirán daño.

d) Análisis de la Capacidad de Servicio de los Hospitales. Indudablemente que en cualquier situación de desastre, la demanda superará a la oferta. Aun en situaciones actuales, se verificó que la capacidad de servicio de los hospitales es insuficiente, por lo que la instalación de postas médicas provisionales, luego de ocurrido el desastre, se hace necesaria en función de la población damnificada que hemos determinado en caso de tsunamis. Estas quedarán instaladas en los refugios temporales que ya hemos determinado y cuyas ubicaciones se muestran en la Lámina 9.4.

9.3 Otras Localidades

En el Cuadro 9.1 se anota los tiempos de llegada de la primera ola para el resto de las localidades estudiadas. Este tiempo se obtiene empleando el mismo procedimiento: se asume un sismo con epicentro frente a las costas de estos lugares, se determina la elipse de generación y luego se procede a trazar los frentes de ondas. Al asumir el epicentro frente a las costas buscamos obtener el tiempo crítico (mínimo) de llegada de la primera ola a la costa. En las Láminas que van de la 9.5 a la 9.15 se observa gráficamente este procedimiento. A su vez, los valores de las alturas de olas para estos lugares se anotan en el Cuadro 9.2.

CUADRO 9.1

TIEMPO DE LLEGADA DE LA PRIMERA OLA A LA COSTA

EPICENTRO FRENTE A:	TIEMPO DE LLEGADA DE LA PRIMERA OLA (Minutos)
Huacho	15
Puerto Supe	15
Barranca	18
Huarmey	16
Punta Culebras	20
Casma	26
Playa Tortuga	29
Chimbote	25
Coishco	25
Santa	30
Salaverry	55
Pacasmayo	45

CUADRO 9.2
ALTURA DE OLA EN LA COSTA*

LOCALIDAD	ALTURA DE OLA EN LA COSTA (m)
Huacho	3,7
Puerto Supe	5,2
Barranca	4,5
Huarmey	7,7
Punta Culebras	6,7
Casma	4,5
Playa Tortuga	4,0
Chimbote	2,0
Coishco	1,34
Santa	1,34
Salaverry	1,0
Pacasmayo	1,2

* Altura de ola determinada usando la fórmula empírica de YAMAGUCHI

Capítulo 10

Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos permiten mencionar las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1) El tsunami registrado el 21 de febrero de 1996 fue generado por un sismo cuya magnitud M_s se estima entre 6,6 y 6,7. Las coordenadas del epicentro del sismo fueron $9,5^{\circ}$ S y $80,2^{\circ}$ W, distante 185 km de la ciudad de Chimbote y a 40 km de la fosa, teniendo como profundidad focal 21 km. La altura de agua por encima de la zona de ruptura fue de 3 800 m. Estos resultados nos dicen que fué un sismo de moderada magnitud y epicentro cercano a la fosa el agente perturbador que generó el tsunami destructivo.

2) De acuerdo a lo anterior, se concluye que la magnitud y profundidad focal de los sismos pueden ser datos insuficientes para determinar la presencia de tsunamis destructivos en la costa. Los resultados obtenidos luego de analizar anteriores tsunamis en nuestra zona de estudio indican que el tirante de agua por encima de la zona de ruptura influyó de manera importante en la generación

de tsunamis destructivos. Por esta razón, se piensa que los futuros eventos que ocurran tendrán mayores posibilidades de ser destructivos si es que el sismo generador se ubica en aguas profundas. Si tomamos en cuenta que en nuestra zona de estudio la profundidad de 200 m se encuentra, en promedio, a 120 km de la costa, se deduce entonces que lo anterior puede darse para aquellos sismos que ocurran entre la isóbata de los 200 m y la fosa.

Por lo tanto, se concluye que las características de los tsunamis en nuestra zona de estudio no están sólo influidas por el mecanismo generador sino también, en gran medida, por la altura de agua encima de la zona de ruptura.

3) Para aquellos tsunamis destructivos que se pudieran generar cerca a la costa (entre el litoral y la isóbata de los 200 metros), se ha calculado que en 20 minutos estaría llegando la primera ola. En este caso, la alerta lo constituye la intensidad del sismo, siendo ésta generalmente de VIII MM. Es de esperar, como se ha mencionado, que las correspondientes alturas de agua sean las requeridas como para que se generen tsunamis destructivos.

4) Las tres olas registradas para el tsunami en estudio permiten deducir una instantánea dislocación del fondo oceánico, la cual puede darse por un sismo de moderada magnitud y epicentro cercano a la fosa. Esta característica del tsunami refuerza, pues, los resultados que se han obtenido acerca de las características del sismo generador. Un caso similar ocurrió el 2 de setiembre de 1992 en Nicaragua, en el cual el epicentro del sismo se ubicó en aguas profundas y cerca a la fosa. Se concluye entonces que la principal característica de los dos sismos-tsunamis analizados consiste en que fueron generados por sismos de moderada magnitud y epicentro cercano a la fosa, por lo que es probable esperar que futuros

eventos presenten la misma característica.

5) La principal alerta contra tsunamis lo constituye un sismo cuya intensidad en la costa sea mayor o igual a VIII MM. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los tsunamis suelen ser precedidos por un aumento o disminución del nivel de la marea fuera de lo normal, razón por la cual, esta señal debe ser la principal alerta contra tsunamis cuando la intensidad del sismo no sea considerable en la costa.

6) El material empleado en la construcción de las viviendas de muchas de las localidades estudiadas, así como la posición de éstas localidades respecto al mar, determinan un alto riesgo de desastre ante la ocurrencia de sismos y tsunamis. Esta situación obliga, pues, a intensificar las campañas de prevención. En ese sentido, los cálculos efectuados en esta tesis, como son el tiempo crítico de llegada de la primera ola del tsunami y la altura que tendría en la costa, son un aporte para tal fin.

7) Uno de los objetivos de esta tesis fue la formulación del plan de evacuación para la ciudad de Chimbote en caso de tsunamis. De acuerdo a ese objetivo se determinó que el tiempo de llegada de la primera ola a la costa sería de 25 minutos, siendo éste el tiempo que dispone la población para evacuar la zona inundable. Así mismo, se calculó que la altura de ola en la costa sería de 4,0 m hacia el norte y sur de la bahía, y una altura de ola de 5,0 m para el vértice de la misma. Delimitada la zona de inundación, se observó que el límite de la zona de inundación y el máximo límite inundable quedaban muy cerca de avenidas muy conocidas en Chimbote, y que además son paralelas a la costa, razón por la cual, fue conveniente elegir aquellas avenidas como los límites de la zona de inundación y el máximo límite inundable, debido a que favorecen a la

divulgación del Plan de Evacuación.

8) En la actualidad, la mayoría de las principales actividades económicas que se desarrollan en Chimbote se concentra dentro de la zona inundable. Una inspección de la zona nos permite ver 3 sectores claramente diferenciables, las cuales se muestran en la Lámina 9.3. En ella, el sector 1 corresponde a las numerosas fábricas. El sector 2 corresponde mayoritariamente a viviendas y escuelas. El sector 3 corresponde también a viviendas, pero se caracteriza por que en ella se desarrolla las actividades bancarias, numerosos hoteles, etc., por lo que allí muchas de las construcciones son de varios pisos. En los límites de este último sector se encuentra las instalaciones del puerto de Chimbote y la urbanización La Caleta. Este estudio por sectores permitió determinar que los lugares con mayor capacidad de recuperación en caso de desastre corresponden al sector 1 donde se encuentran instaladas las diversas fábricas. Parte del sector 3 y la urbanización La Caleta también se encuentran dentro de esta categoría. En la urbanización La Caleta se estima que los daños producidos por el impacto del tsunami no será tan severo como en los dos sectores anteriores. Gran parte del sector 2, que corresponde en su gran mayoría a la población de menor capacidad económica, es la más vulnerable ante el ataque de tsunamis por estar ubicada muy cerca al mar y a lo largo del vértice de la bahía. Es por eso que la ayuda deberá ser orientada principalmente a ese lugar.

9) De acuerdo con lo que venimos diciendo, las viviendas del sector 2 serán las más afectadas; primero por la ocurrencia del sismo previo y segundo por el impacto del tsunami. En el sector 3 estos daños serán menores, esperando que muchas de estas edificaciones muestren gran capacidad de resistencia. Lógicamente

que los mayores daños, debido al impacto del tsunami, se producirán en aquellas viviendas ubicadas frente al mar, y a medida que el tsunami penetre en tierra los daños causados serán por inundación.

10) Las instalaciones del puerto de Chimbote será una de las más afectadas debido a que su posición está frente a la Bocana Chica. El tsunami del 21 de febrero de 1996 se canalizó por esta entrada impactando contra el cerro La Paz y rebotando contra las instalaciones del puerto, produciendo mucho daño material. Es muy probable que aquel comportamiento se repita debido a la configuración de esta parte de la bahía, siendo el caso más desfavorable cuando el tsunami impacte directamente contra las instalaciones del puerto. Las embarcaciones que se encuentran a lo largo de la bahía serán llevadas tierra adentro debido a la fuerza de la ola, impactando luego contra las edificaciones. En este caso la medida recomendable es que las embarcaciones se internen mar adentro. Al respecto, se ha verificado que estando a 15 brazas de la profundidad no sufrirán daño.

11) Gran parte de las actividades comerciales públicas y privadas se desarrollan dentro de la zona inundable determinada para Chimbote en caso de tsunamis. Así mismo, son numerosos los colegios que se ubican en esta zona. Se ha estimado en 18 400 habitantes la población que se vería en peligro. Por lo tanto, se recomienda efectuar, simultáneamente, simulacros de evacuación en caso de sismos y tsunamis. El plan de evacuación para Chimbote, formulado en esta tesis, también es un aporte para tal fin

12) Indudablemente que en cualquier situación de desastre se incrementará la demanda de atención médica, superando así a la oferta. Aun en situaciones actuales, se verificó que la capacidad de

servicio de los hospitales es insuficiente, por lo que la instalación de postas médicas provisionales, luego de ocurrido el desastre, se hace necesaria en función de la población damnificada en caso de tsunamis calculada en esta tesis. Estas quedarán instaladas en los refugios temporales que ya hemos determinado.

13) Se recomienda formular planes de evacuación para las otras localidades dentro de la zona de estudio. El procedimiento debe ser el utilizado en esta tesis. Como contribución, se ha calculado el tiempo de llegada crítico de la primera ola a la costa, que es el tiempo que dispone la población para evacuar la zona inundable, así como la altura que tendría en la costa, con lo cual se estima la zona potencialmente inundable. Estas informaciones son importantísimas, por que a partir de ellas se formulan los planes de evacuación.

14) Se recomienda a las autoridades locales la planificación de las zonas costeras. Como esto sólo puede realizarse si existe la voluntad política de hacerlo, es necesario entonces intensificar las campañas de educación entre las autoridades locales sobre qué son los tsunamis y los efectos que pueden ocasionar en la costa.

15) Debido a que el Sistema Internacional de Alerta contra Tsunamis determinó que no se había generado tsunami destructivo como consecuencia de los sismos del 21 de Febrero de 1996 en Chimbote, y del 2 de Setiembre de 1992 en Nicaragua, es recomendable que el Sistema de Alarma Regional contra Tsunamis incremente su capacidad operativa con el fin de tener más posibilidades de detectar aquellos tsunamis que serán destructivos en nuestra costa. En ese sentido, los resultados de esta tesis son un aporte para tal fin.

16) Es recomendable que la Marina de Guerra del Perú, a

través de las Capitanías de Puerto, tenga una mayor participación en las campañas de prevención contra estos fenómenos, intensificando la difusión de folletos de información, así como de seminarios y charlas en todas las localidades que se encuentran en zonas bajas frente al mar.

17) La época del año en que se presentan las condiciones más desfavorables para incrementar la altura de ola de los tsunamis corresponde a los meses de enero, febrero y marzo; donde las bravesas de mar debido a cambios climáticos es frecuente, debiendo considerarse además el nivel de la marea en el momento de la inundación. Es importante hacer notar que la costa de Chimbote sufre, de manera importante, los efectos de la braveza del mar cuando éstas se presentan. Por eso, el problema de erosión está afectando a muchas de las viviendas que se encuentran limítrofes con el mar, principalmente la del sector 2.

18) Esta tesis propone una metodología que permitirá reproducir gráficamente la propagación de cualquier tsunami ocurrido en el pasado con sólo tener como dato el tiempo que llegó la primera ola a la costa. Reproducir la propagación del tsunami significará obtener información respecto del sismo previo al tsunami, tales como epicentro, magnitud, etc.; y de esta manera identificar cuáles son las zonas del fondo oceánico donde es muy posible que se generen futuros eventos.

19) Se espera que los resultados de esta tesis contribuyan al conocimiento de los sismo-tsunamis, y sean de utilidad a las medidas de prevención que se efectúen contra los desastres que ocasionan los tsunamis.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) ABE, Katsuyuki, **Size of Great Earthquakes of 1837 - 1974 inferred from tsunami data**, Journal of Geophysical Research - vol. 84, Ner 84, 1979.
- 2) AIDA, Isamu, **Numerical Experiments for the tsunami propagation - the 1964 Nigata tsunami and 1968 Tokachi - Oki tsunami**, Bulletin of the Earthquake Research Institute, vol. 47, pp 673 - 700, Tokyo, Japan, 1969.
- 3) BOLT, Bruce A., **Earthquakes**, University of California, Berkeley, 1978.
- 4) CASTILLO, J., **Peligro Sísmico en el Perú**, Tesis de Título Profesional, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, 1994.
- 5) CERESIS, **Terremotos Destructivos en América del Sur 1530-1984**, Proyecto SISRA, Volumen N° 10, 1985.
- 6) DELGADO, Alberto y GARCIA, Celia, **Plan de Evacuación de Ciudades Afectadas por Tsunamis, Zona La Punta-Pucusana**, Tesis de Grado para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1982.
- 7) DEPARTMENT OF COMMERCE, NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, **Tsunamis, the Great Waves**, Hawai, U.S.A., 1975.
- 8) DEZA, E., **Identificación de una Posible Estructura en Bloques en el Sur del Perú**, Simposio sobre el Peligro y Riesgo Sísmico y Volcánico en América del Sur, Setiembre 24-28, 1984, Instituto Nacional de Prevención Sísmica, San Juan, Argentina, Proyecto SISRA, Ceresis, Volumen N°14, 1985.

- 9) DIRECCION DE HIDROGRAFIA Y NAVEGACION DEL PERU, MINISTERIO DE MARINA, **Sistema de Alerta de Tsunamis**, Lima, 1979.
- 10) HOTARI, Tokutaro, **Vertical Trustal Deformation and Tsunami Energy**, Bulletin of the Earthquake Research Institute. Vol. 48, pp 171 - 188, Tokyo, Japan, 1982.
- 11) IIDA, K, **The Generación of Tsunamis and the Focal Mechanism of Earthquakes. Tsunamis in the Pacific Ocean**, Honolulu, 1970.
- 12) INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA (INEI), **Datos Censales de los años 1972, 1981, 1993**, Boletín Informativo, Lima, 1993.
- 13) KAJIURA, Kijiro, **Tsunami Energy in Relation to Parameters of Earthquake model**, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan, 1981.
- 14) KUROIWA, Julio, **Tsunamis - Efectos sobre las costas de Lima Metropolitana**, Lima, Perú, 1983.
- 15) KUROIWA, Julio y KOGAN, J., **Plan de Preparación para Tsunamis para Callao la Punta**, Lima, Perú, 1989.
- 16) RICHTER, C. F., **Elementary Seismology**, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1958.
- 17) SARRIA, A., **Ingeniería Sísmica**, Ediciones Uniandes, Colombia, 1990.
- 18) SILGADO,E., **Historia de los Sismos más Notables Ocurridos en el Perú 1513-1974**, Boletín N°3, Serie C, INGEMMET, Lima, Perú, 1978.
- 19) SOLOVIEV, S.L., **Tsunamis Waves**, Proc. Sakhalin Compl. Sci. Res. Inst., N° 29, Yuzhno-Sakhalinsk., 1972.

- 20) MURTY, Tad, **Seismic Sea Waves**, Ottawa, Canadá, 1977.
- 21) TANAHASHI, Ichiro and KUMAGAI, Yoshio, **Disaster Prevention Planning in the Urban Areas** ,Japan, 1980.
- 22) THE TSUNAMI COMMISSION OF THE INTERNACIONAL UNION OF GEODESY AND GEOPHYSICS (IUGG), Proceedings of the Internacional Tsunami Symposium, British Columbia, Canadá, 1987.
- 23) TORRES, Rolando; TREFOGLI, Claudio, **Actualización del Plan de Evacuación ante Tsunamis en las Costas del Callao y Evaluación Post-Desastre**, Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú, 1996.
- 24) UNDHA/GENEVA, **Tsunamis: Evacuación de la Población y Planes de uso del Suelo para Mitigar sus Efectos. Localidades estudiadas en el Perú entre 1981 y 1994**, Revisado y publicado por INDECI y la Marina de Guerra del Perú, Lima, Perú, 1994.
- 25) WIEGEL, Robert, **Tsunamis (Earthquake Engineering)**, Prentice - Hall Inc., U.S.A.