

todas las estaciones mareográficas del océano Pacífico.

3. El sistema de alarmas de tsunamis del Pacífico funcionó adecuadamente, si bien con algunos errores iniciales en la medición del sismo. Este sistema permite prevenir, con la suficiente anticipación, a todos los países que pueden ser afectados por los

tsunamis, permitiendo así minimizar los daños.

4. La diferencia en las velocidades de las olas es producto de los distintos trayectos y profundidades que siguió el tsunami. Por otra parte, se aprecia que la amplitud de las olas decrece a medida que se aleja del epicentro, producto de la disipación paulatina de la energía.

B. ANOMALIAS HIDROGRAFICAS

*Santiago Murphy Rojas
Capitán de Corbeta*

Desde la llegada de los españoles a Chile existe algún tipo de registro de los terremotos ocurridos en esta parte del mundo. Sus consecuencias han significado, en algunas ocasiones, la destrucción de ciudades enteras y la muerte de miles de personas.

A pesar de ser un fenómeno natural y repetitivo, el ser humano reacciona por lo general en forma instintiva e irracional al enfrentarse a un sismo, y este miedo que manifiesta tiende a olvidarse, sin aprovechar sus experiencias y aprender a convivir con esta característica particular de nuestro país.

El origen de los sismos está directamente relacionado con las características geológicas y geofísicas de la corteza terrestre. La tierra está cubierta por enormes placas rocosas que flotan y derivan en una materia densa denominada "magma", que constituye una verdadera capa que rodea el centro del planeta. Estas placas rocosas se encuentran en un proceso dinámico permanente, denominado "de tectónica de placas", producto del calor interno de la Tierra, que genera corrientes de convección en su interior, las cuales presionan

hacia la superficie, particularmente en las zonas de fractura. A medida que estas placas han ido derivando a lo largo del tiempo, han empujado los continentes, ya sea juntándolos o separándolos. Como la corteza es rígida, estos movimientos, que ocurren en forma muy lenta y gradual, producen acumulaciones de gran cantidad de energía potencial, que sólo puede liberarse cuando parte de la corteza cede, descargándose repentinamente y buscando su posición de equilibrio, lo que produce un brusco desplazamiento del área comprimida y la generación del movimiento sísmico.

Aunque estos sismos pueden también ser producidos por erupciones volcánicas y avalanchas submarinas originadas en las pendientes de las fosas oceánicas, la mayoría de ellos son causados por los roces de las placas de la corteza terrestre en estas zonas de convergencia de placas. La súbita descarga de energía producida por el movimiento de las placas genera una gran variedad de ondas sísmicas que se propagan a través de la Tierra y su superficie, llegando a nosotros en la forma de temblores. La intensidad del sismo en un lugar determinado será, por tanto, proporcional a la cantidad y velocidad del movimiento ocurrido, y a la eficiencia con que la energía es

transferida desde el foco, o "hipocentro", hasta el lugar, a través de la corteza terrestre.

Las estaciones sismológicas detectan estas ondas y las transforman en señales eléctricas que quedarán finalmente impresas en un registro gráfico, dejando de esta manera el temblor su firma. Con esta información, los sismólogos pueden determinar la magnitud del temblor y la distancia en superficie, desde las estaciones sismográficas a la fuente del disturbio.

Varios detectores sísmicos dispuestos adecuadamente permitirán calcular automáticamente el punto de origen en la superficie, o "epicentro", de las ondas sísmicas. Las estaciones registrarán la hora de arribo de la onda del temblor y el intervalo de tiempo entre sus dos tipos de onda característicos. La onda compresiva (longitudinal), que por su particularidad al llegar a la superficie se transformará en sonido; y la onda de corte (transversal), que es la que sacude horizontalmente con componentes en todas direcciones. Estos antecedentes permitirán calcular la distancia desde la fuente a cada estación, determinando los arcos de distancias correspondientes, que al intersectarse en un globo terráqueo determinarán el epicentro. Hoy en día los sistemas de comunicaciones y el empleo del computador permiten contar con la información necesaria en forma rápida y precisa.

La actual medición sismológica se basa en la escala de Richter, que es una escala de magnitudes obtenida a través de la medición instrumental de la energía liberada en el hipocentro, y la escala de Mercalli, que se encuentra graduada de I a XII, de acuerdo a la medición subjetiva de los daños provocados.

Chile está ubicado en la zona más sísmica del planeta, "El cordón del Pacífico", cinturón de frecuentes temblores y erupciones volcánicas que rodea el océano Pacífico, donde se encuentra la costa oeste de América, Alaska, Japón, Nueva Guinea y Nueva Zelanda.

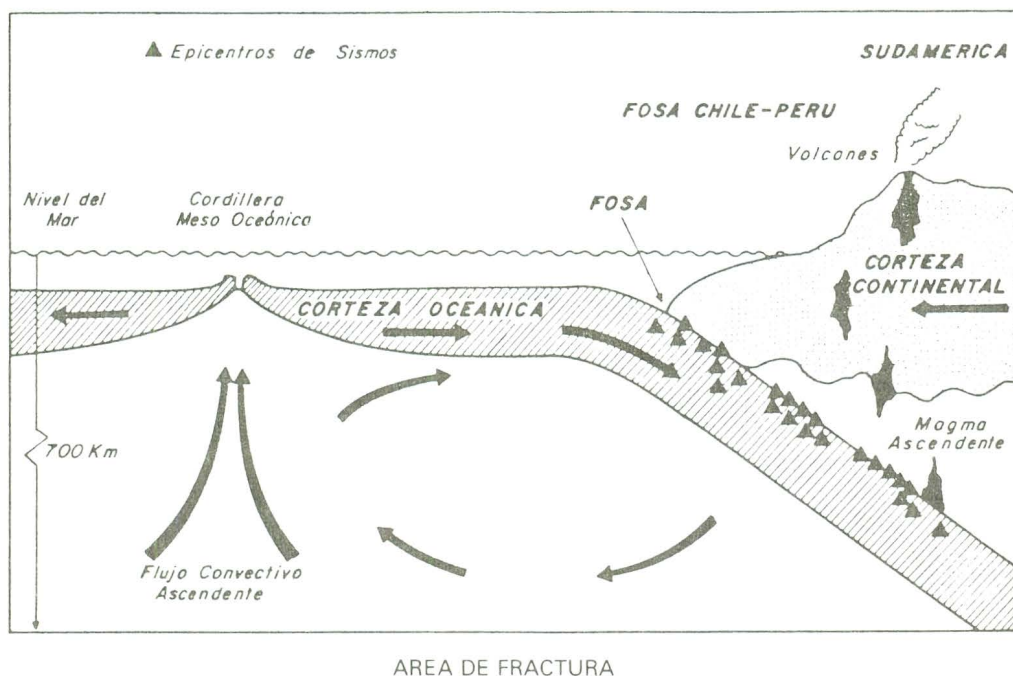
Cuando los epicentros de los temblores corresponden a áreas oceánicas o cerca de ellas, y especialmente cuando se producen desplazamientos verticales del suelo mari-

no, se pueden generar desplazamientos bruscos de un gran volumen de agua del océano, alterando su nivel normal en una gran extensión de su superficie. Esta alteración tratará de alcanzar su posición de equilibrio, produciéndose la onda conocida internacionalmente como "tsunami", la cual, llegando a un cierto grado de magnitud, provocará un maremoto cuyos efectos pueden ser tan destructivos como un terremoto.

El día 3 de marzo de 1985, a las 19.47 horas, un fuerte sismo con características de terremoto azotó varias ciudades de la zona central del país. Las mayores intensidades observadas, de acuerdo a la escala modificada de Mercalli, fueron las siguientes, de norte a sur.

La Serena y Coquimbo	V
Los Vilos	VI
Quintero	VI-VII
Valparaíso	VII-VIII
Algarrobo	VI-VII
Curacaví	VII-VIII
Santiago	VII
Cartagena	VII-VIII
San Antonio	VIII
Melipilla	VII-VIII
Rancagua	VI-VII
Pichilemu	VII
Curicó	VII-VIII
Constitución	VI-VII
Talca	VII

Dos sismos mayores fueron detectados por los sensores del Instituto de Sismología de la Universidad de Chile. El primero tuvo su epicentro a 36 kilómetros al oeste-noroeste de Algarrobo, en latitud 33°14,4' sur y longitud 72°02,4' oeste, de una magnitud de 7,7 de la escala de Richter, con su hipocentro a 15 kilómetros de profundidad. El segundo sismo comenzó 10 segundos después del inicio del primero, y su epicentro, que se supone en las cercanías del anterior, aún no ha sido determinado, ya que la totalidad de la información existente aún no ha sido procesada. La duración total del terremoto fue cercana a los 3 minutos, y la energía liberada en el área epicentral se estima fue originada por un desplazamiento relativo de 1,5 a 2 metros, entre las placas de Nazca y la Sudamericana, en la convergencia de la Fosa Chilena.



Esta acumulación de energía que originó la fractura se debe al movimiento gradual de la placa de Nazca, ubicada al oeste del continente americano, a una razón promedio de 10 centímetros por año, en dirección al continente.

El sismo fue precedido por una gran actividad sísmica de intensidad baja y moderada, y el reacomodo posterior de la zona afectada ha producido una gran cantidad de réplicas. En los 15 días posteriores al sismo se han observado 3 ó 4 movimientos sísmicos sobre los 6 grados (Richter) y alrededor de 20 sobre 5 grados. Se esperan réplicas sensibles por un mes, y por dos años a nivel instrumental.

El desplazamiento del fondo marino, aunque no fue lo suficientemente grande como para provocar un maremoto, produjo una variación anormal de la marea de 1,1 metros en Valparaíso, de 2 metros en Talcahuano, y sus efectos fueron registrados hasta en los mareógrafos de Alaska, al día siguiente, a las 16.38 horas (hora chilena).

Este movimiento sísmico desencadenó una serie de deformaciones instantáneas

en el subsuelo marino y en el sector costero inmediatamente cercano al epicentro. Como resultado de lo anterior, la infraestructura portuaria de los puertos de Valparaíso y San Antonio sufrió deformaciones de gran magnitud, así como también varios de los puntos fijos de referencia en altura, emplazados en los sectores de muelles, manifestaron alteraciones en su posición respecto a los niveles de referencia hidrográficos.

Estas alteraciones, como consecuencia de la energía liberada por el sismo, pueden responder a tres tipos diferentes de deformaciones, a saber: Desplazamiento general del área de fractura, desplazamiento zonal de un sector hidrográfico y desplazamiento local topográfico.

En esta ocasión, si se estimó un desplazamiento relativo superior a 1,5 metros entre las placas tectónicas en toda o gran parte del área de fractura, debemos esperar una alteración morfológica general, si no importante, al menos detectable mediante mediciones. Las alteraciones producidas por desplazamientos zonales y locales

también son detectables mediante mediciones geodésicas y efectuando comparaciones con los niveles de referencia hidrográficos obtenidos antes del evento.

Para la evaluación de los datos obtenidos por el Instituto Hidrográfico de la Armada, en las áreas portuarias mencionadas, se definen los siguientes términos a usar:

Nivel Medio del Mar (NMM). Es el nivel que alcanzaría la superficie del mar si no

existieran alteraciones debido al efecto de las mareas. El valor estimado para cada localidad se obtiene mediante el cálculo de la media de las alturas de las mareas observadas durante un período lunar completo o parcial, referida a un cero arbitrario.

Cero de la escala (ØEC). Corresponde al cero arbitrario del instrumento con el cual se observa la variación del nivel del mar (mareógrafo).

PRESENTACION DE DATOS Y ANALISIS

Valparaíso

Cota N° 7 (acceso al molo)

NMM anterior al evento: 6,189 m

NMM posterior al evento: 6,285 m; diferencia = 0,096 m

Cota N° 2 (sitio Foxtrot del molo)

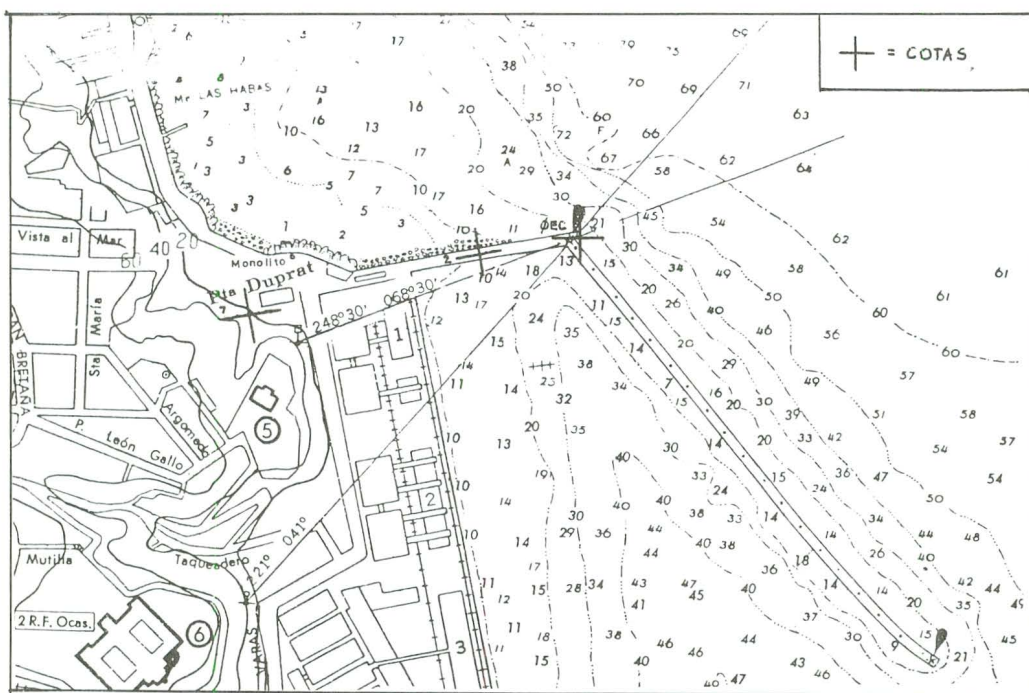
NMM anterior al evento: 3,827 m

NMM posterior al evento: 3,833 m; diferencia = 0,006 m

Cota ØEC (faro Duprat)

NMM anterior al evento: 0,941 m

NMM posterior al evento: 1,091 m; diferencia = 0,15 m



ALTERACIONES EN EL MOLO DE VALPARAISO

De los datos anteriores se obtiene:

- Alteración por desplazamiento zonal: $0,096 + 0,006 - 0,150 = 4,8 \text{ cm}$
- Alteración por desplazamiento local: $0,096 + 0,006 + 0,150 = 25,2 \text{ cm}$

San Antonio

Cota N° 3 (Gobernación Marítima)

NMM anterior al evento: 4,369 m

NMM posterior al evento: 4,579 m; diferencia = 0,21 m

Cota IGM 1FC (embarcadero)

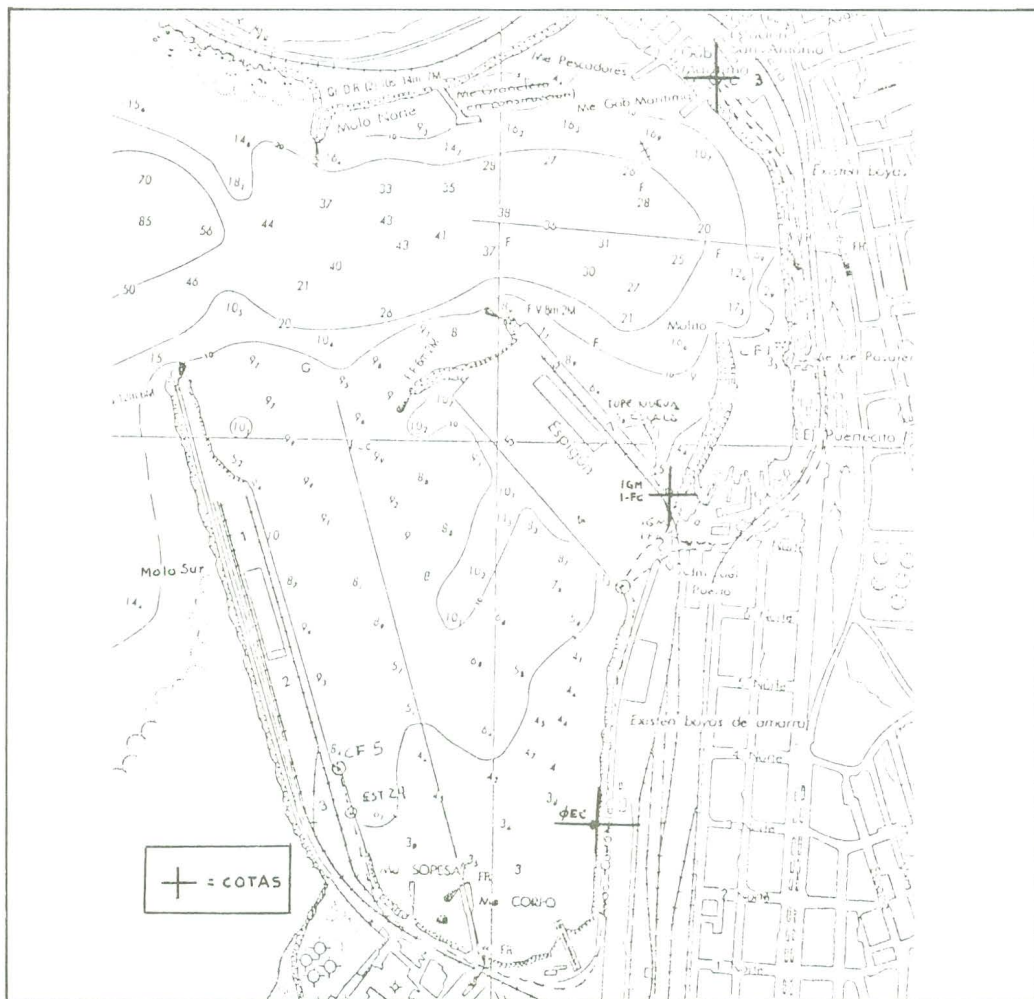
NMM anterior al evento: 3,949 m

NMM posterior al evento: 4,151 m; diferencia = 0,202 m

Cota ØEC (Avenida Costanera)

NMM anterior al evento: 1,277 m

NMM posterior al evento: 1,520 m; diferencia = 0,243 m



ALTERACIONES EN EL MOLO DE SAN ANTONIO

De los datos anteriores se obtiene:

- Alteración por desplazamiento zonal: $0,210 + 0,202 - 0,243 = 17 \text{ cm}$
- Alteración por desplazamiento local: $0,210 + 0,202 + 0,243 = 65 \text{ cm}$

De lo anterior se desprende la confirmación de los desplazamientos zonales y locales. En el sector de la poza en Valparaíso la alteración por desplazamiento zonal alcanza a 4,8 cm, y por desplazamiento local 25,2 cm, lo que confirmaría un hundimiento del sector portuario y, por consiguiente, una variación mínima de 1 pie en la batimetría de los sitios de atraque del puerto. Para el caso de San Antonio, la alteración por desplazamiento zonal es de 17 cm, y por desplazamiento local de 65 cm, lo que indicaría un hundimiento del sector portuario, mayor que el de Valparaíso, estimándose una variación mínima de 2 pies en los sitios de atraque y alrededores.

Aunque se supone un desplazamiento general del área de fractura en su componente vertical, estas mediciones no permiten determinar si estos valores representan las anomalías hidrográficas instantáneas que sufrió el área, las variaciones finales de los niveles de referencia hidrográficos absolutos y la variación de los niveles de referencia topográficos en términos relativos. Lo anterior se debe a que la verificación del NMM de la localidad (nivel de referencia), sólo se podrá determinar con un mínimo de exactitud después de 365 días de observación continua.

Conclusiones

Las consecuencias visibles del sismo quedaron materializadas en los cuantiosos daños provocados, de los cuales los más

representativos de la zona costera, y los más fácilmente observables y medibles para los efectos de este trabajo, han sido los de los puertos de Valparaíso y San Antonio. Ambos puertos sufrieron diversos hundimientos y alzamientos del terreno, lo que provocó fracturas en sus estructuras y desniveles, como asimismo, daños a sus grúas e instalaciones.

Tanto Valparaíso como San Antonio mostraron anomalías topográficas e hidrográficas de importancia, lo que hace disminuir la confiabilidad de la batimetría portuaria, siendo necesario efectuar nuevos sondeos batimétricos para ir determinando la variación morfológica debido a la estabilización del terreno, y al mismo tiempo actualizar la cartografía náutica de las zonas afectadas.

Se deberá efectuar nuevos levantamientos hidrográficos en ambos puertos, a objeto de efectuar su vinculación geodésica con los nuevos valores de niveles de referencia que se obtengan de acuerdo a las futuras observaciones.

Otra tarea interesante sería verificar la variación de los niveles de vinculación geodésica para el área, con el resto de los puntos de la red geodésica continental.

Aunque estos dos puertos representan puntos de muestra de la costa de la zona afectada, un panorama detallado de todas las deformaciones morfológicas ocurridas en el área requeriría de una verificación general de ella.

