

Estimación Preliminar de la Zona de Inundación del Tsunami del 27/02/2010 en la Localidad de Lolloe (33°36'22''S; 71°37'31''W).

Patricio Wickler Grez⁽¹⁾ – Manuel Contreras López^(1, 2)

- (1) Ingeniería Civil Oceánica – Universidad de Valparaíso.
(2) Facultad de Ingeniería – Universidad de Playa Ancha.

Resumen

Se reporta la inspección de campo realizada el 03/03/2010 en la playa Lolloe, San Antonio, a seis (6) días de ocurrido el tsunami. Se entrevistaron lugareños y se realizó una inspección en terreno de los efectos producidos por las ondas de tsunami que llegaron a la localidad en la madrugada del 27 de febrero de 2010. El objetivo es identificar el área de inundación, recabar antecedentes del fenómeno y recopilar información específica de nivel del mar, que en conjunto permitirán definir los alcances de un futuro levantamiento de detalle en el sector¹.

Se procedió a confeccionar un registro gráfico con fotografías digitales del sector afectado, y con ayuda de la carta de navegación N° 514 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, SHOA, se delimitó un área inundada que cubre una superficie de alrededor de 3.5 hectáreas. Esta área es menor a la estipulada por el SHOA en la carta de inundación para el Puerto de San Antonio, elaborada para el tsunami histórico de 1906. Se discute que las condiciones de bajamar a la hora de llegada de las primeras ondas de tsunami y obras como el terraplén de acceso norte al puerto de San Antonio, contribuyeron a proteger alrededor de 280 viviendas de construcción ligera correspondiente al sector del camping Lolloe Norte, suerte que no corrieron aproximadamente 170 viviendas del sector camping Lolloe Sur, que fueron completamente arrasadas y donde se perdieron al menos 5 vidas humanas.

Palabras Claves: Área de inundación, anomalías nivel del mar, Puerto San Antonio.

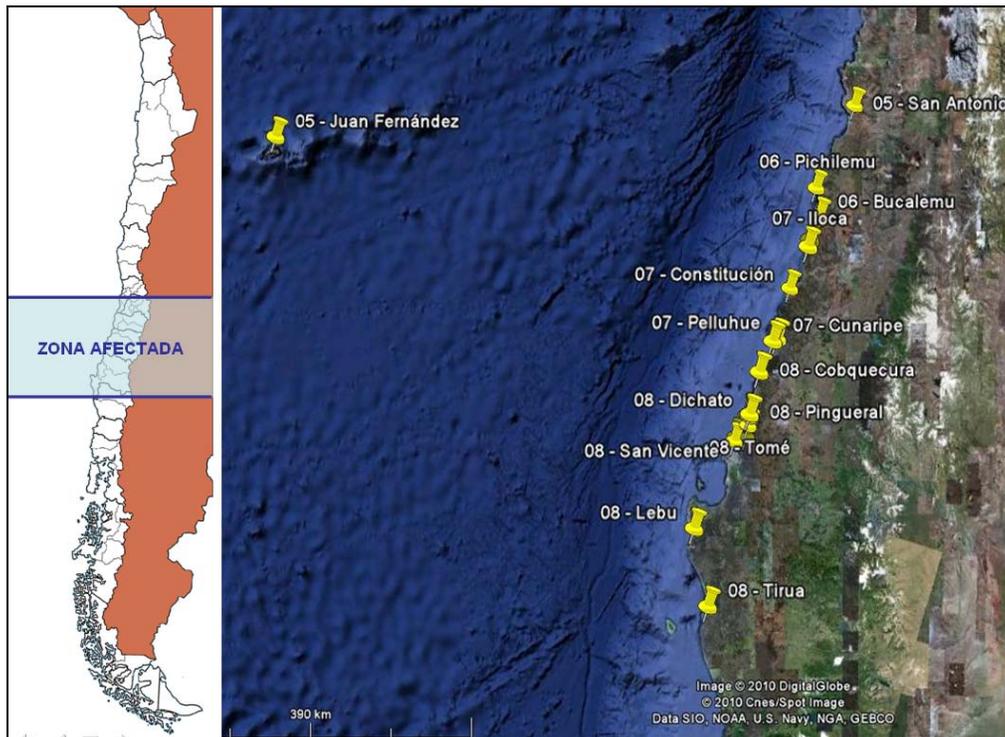
¹ Al cierre de este reporte, los autores se encuentran elaborando un levantamiento a lo largo de la zona afectada, patrocinado por la UNESCO y el International Tsunami Information Center (ITIC), como parte del International Tsunami Survey Team to Chile (ITST-Chile).

I. Alcances

El 27 de febrero de 2010, a hora local 3:34 AM, la zona central de Chile fue sacudida por un terremoto que alcanzó una magnitud de 8.8 grados en la escala de Richter, con epicentro 63 [km] al SO de Cauquenes y profundidad focal estimada en 47.4 [km] (Boroschek *et al* 2010). Como consecuencia del terremoto, se registraron ondas de tsunamis que impactaron con gran intensidad aproximadamente 550 kilómetros a lo largo de la costa continental – desde San Antonio (33°35'S, 71°37'W) hasta Tirúa (38°20'S; 73°29'W) – y la Isla de Juan Fernández (33°39'S; 78°52'W), ubicada a 600 [km] de la costa (Figura 1).

El presente trabajo reporta los efectos de las ondas de Tsunami en la localidad de la playa de Lolleo a 4 [km] al sur de San Antonio, en las inmediaciones de la desembocadura del río Maipo, con el objeto de estimar el área de inundación. Este sector fue la localidad del borde costero continental más septentrional donde hubo víctimas fatales como consecuencia del tsunami de la madrugada del 27 de febrero de 2010, cuando las ondas de tsunami arrasaron un conjunto de viviendas de material ligero emplazadas en el borde de la línea de más alta marea de la playa.

Figura 1: Localidades más afectadas por el tsunami del 27-02-2010 en la costa centro sur de Chile.



Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

II. Marco teórico

El término Tsunami corresponde a una serie de ondas oceánicas de considerable período y longitud de onda generada por una perturbación a gran escala en el océano (Van Dorn, 1968). Durante el proceso de retorno al equilibrio mediante una serie de oscilaciones, se generan ondas que se propagan hacia fuera de la región de origen, fenómeno que puede tomar horas e incluso días hasta llegar a la normalidad. Los tsunamis corresponden a ondas de período relativamente largo y baja probabilidad de ocurrencia, cuyos efectos a nivel costero son altamente dependientes del mecanismo que los genera, entre los que se cuenta: terremotos submarinos, actividad volcánica, resonancias de las masas de agua, avalanchas submarinas, explosiones nucleares y tsunamis de origen atmosférico.

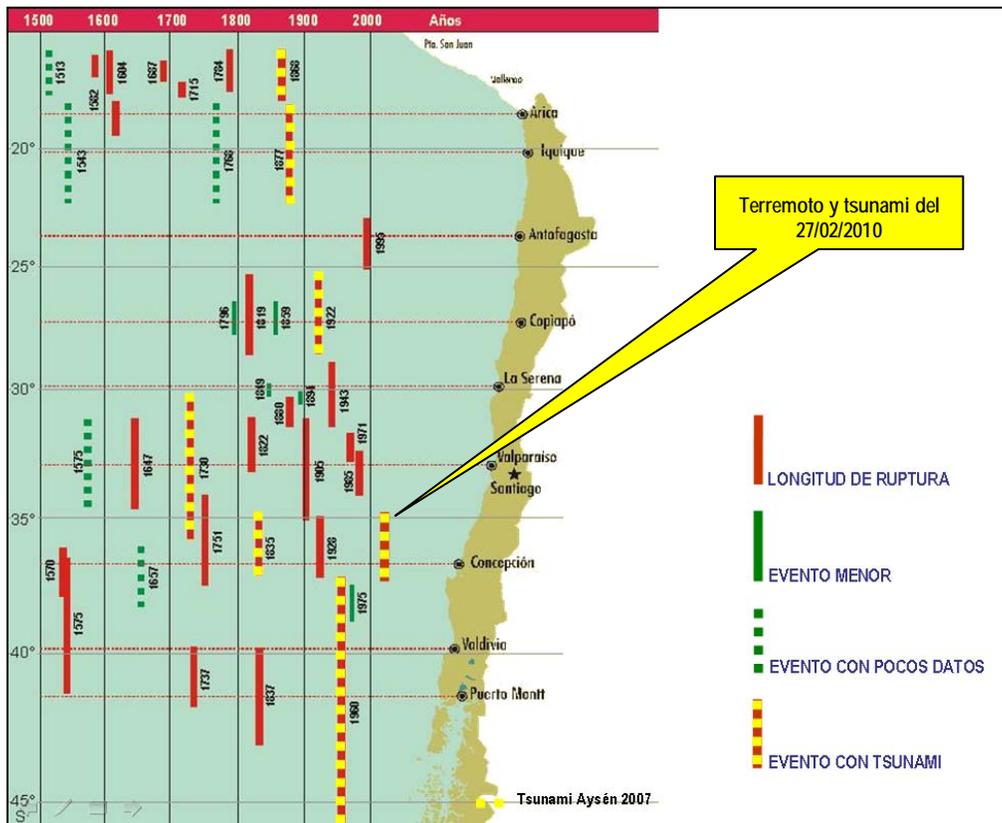
Estas ondas pueden alcanzar enormes dimensiones y acumular suficiente energía para atravesar océanos. Se propagan como ondas gravitacionales, presentando un rango de períodos que varía entre 5 y 60 minutos y alturas menores a 1 [m] en mar abierto. Al aproximarse a la costa, los tsunamis incrementan su altura y pueden causar un impacto importante en las comunidades costeras. El daño puede manifestarse en muertes, destrucción de la infraestructura portuaria, en la inundación de grandes extensiones de terreno y en daño a los sistemas de transporte, redes de energía y de agua potable. El arrastre de objetos y sustancias puede provocar contaminación ambiental y provocar enfermedades epidémicas en sectores poblados. Todos estos efectos fueron apreciados como consecuencia del pasado terremoto del 27 de febrero.

Geográficamente, se registra una mayor ocurrencia de tsunamis destructivos en la cuenca del Océano Pacífico, como consecuencia de los sucesivos terremotos que ocurren a lo largo del denominado “Cinturón de Fuego”, serie de cadenas montañosas submarinas, profundas fosas e islas localizadas en sus márgenes. Se estima que aproximadamente el 94% de los 450 tsunamis ocurridos durante el siglo pasado en el Océano Pacífico fueron originados por este tipo de mecanismo tectónico (Iida 1970 citado por Winckler 2002). Desde 1562, más de 30 tsunamis de campo cercano han asolado las costas de Chile, produciendo incluso la devastación de ciudades enteras como Arica en 1604 y Concepción en 1751 (Figura 2). El potencial destructivo del tsunami es función de la magnitud del terremoto, de la distancia desde su punto de origen a la costa, de la batimetría y configuración de la línea de costa y de la topografía submarina. Hasta la fecha se reconoce la existencia de 3 condiciones básicas para la generación de un tsunami de origen tectónico:

- Que el epicentro del sismo, o una parte mayoritaria de su área de ruptura, esté bajo el lecho marino y a una profundidad focal menor a 60 [km].
- Que ocurra en una zona de subducción entre placas tectónicas, es decir, que la falla tenga movimiento vertical y no sea solamente de desgarre con movimiento lateral.
- Que el sismo libere suficiente energía y que el mecanismo de falla a través del cual ésta es transformada en energía hidrodinámica sea efectivo.

Estas condiciones son de carácter cualitativo y, de acuerdo al estado actual del conocimiento en la materia, no existe aún ningún modelo teórico ni método operacional totalmente satisfactorio y confiable que permita determinar el potencial tsunamigénico de un sismo. En este sentido, se reconoce que no existe una relación binaria entre terremotos y tsunamis, puesto que un movimiento sísmico de magnitud considerable puede indistintamente generar un tsunami importante o no hacerlo. Asimismo, se reconoce que la amplitud del tsunami no es necesariamente proporcional a la del terremoto y que no hay una reciprocidad clara entre ambos fenómenos. En términos energéticos, una fracción de entre un 0,5% y un 10% de la energía sísmica es efectivamente convertida en energía hidrodinámica (Iida 1970 *op cit*).

Figura 2: Diagrama espacio temporal de los sismos fuertes en Chile Continental.



Fuente: Modificado de Barrientos (2007).

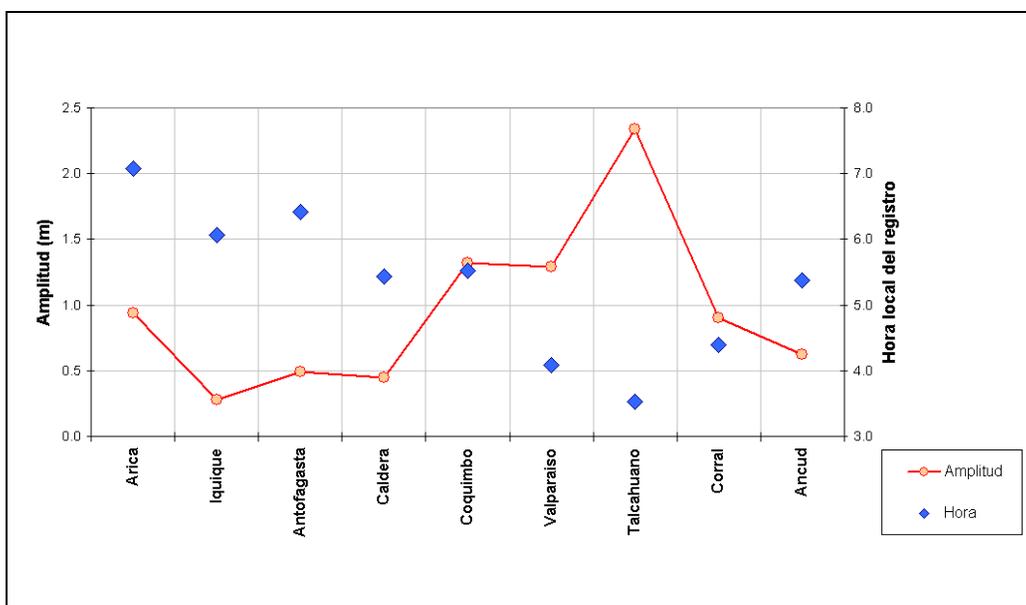
Nota: Las líneas indican la extensión aproximada de la fractura producida.

El perfil de ondas resultante de un tsunami generado en océano abierto depende de los parámetros de su fuente, de las características de la región de propagación y del tiempo o distancia transcurridos desde el inicio de esa propagación. Su velocidad de propagación depende básicamente de la profundidad del agua por la cual atraviesa. Esto determina que durante su trayectoria, el tsunami se vea sujeto a fenómenos de refracción y dispersión de energía. Se sabe que la gran longitud de onda que presentan los tsunamis de origen sismotectónico -del orden de 100 a 300 [km] en la zona de la fosa frente a las costas chilenas- provoca que su propagación en océano abierto se realice casi sin pérdida de energía por fricción de fondo y con una amplitud de onda de unos cuantos centímetros, por lo que resultan imperceptibles para las embarcaciones.

En la costa, en cambio, la disminución de la profundidad y su configuración, genera la concentración de la energía cinética de las ondas; disminuye su longitud y crece su altura, alcanzando un gran poder destructivo con alturas que pueden llegar hasta los 20 o 30 [m]. El tsunami observado en las costas de Chile el 27/02/2010, presentó altura en torno a 2,5 [m] en Talcahuano, descendiendo a un rango entre 0,5 y 1,5 [m], según los registros de las estaciones mareográficas al norte y sur del epicentro (PTWC 2010) (Figura 3). Estudios preliminares efectuados por los autores como parte del *International Tsunami Survey Team to Chile* (ITST-Chile) indican, no obstante, que en ciertas localidades como Constitución, pudieron alcanzarse cotas de inundación de hasta 15 [m] respecto del nivel del mar.

La onda tomó en torno a 3 horas en alcanzar el límite norte de Chile (estación de Arica) y fue registrada con alturas inferiores a 1 [m] en las estaciones de medición dispuestas por el Pacific Tsunami Warning System en la cuenca del Océano Pacífico. En las inmediaciones del área en estudio (estaciones de Valparaíso y San Antonio), la onda del tsunami tuvo alturas máximas reportadas por los instrumentos inferiores a 3 [m] (Figura 3), aun cuando las observaciones post tsunamis en sectores como Talcahuano, parecen ser superiores. Las ondas se presentaron con amplitudes significativas durante las 7 primeras ondas, lo que explica la gran cantidad de videos de anomalías en el nivel del mar reportados por habitantes costeros en la madrugada del 27/02/2010.

Figura 3: Amplitudes y hora del registro del tsunami en estaciones mareográficas.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NOAA (PTWC 2010).

En el análisis histórico de tsunamis, las mayores inundaciones han sido observadas en bahías angostas o semicerradas con presencia de islas (como en las bahías de Concepción y San Vicente) y en desembocaduras de ríos (como el caso de Constitución y Lolleo). La altura alcanzada por un tsunami al arribar a la costa se debe a la interacción de varios factores físicos y morfológicos; éstos son: características de las ondas en mar abierto, batimetría, pendiente del fondo marino, configuración del contorno de la costa, fenómenos de difracción, refracción, reflexión, dispersión, atrapamiento de las ondas en las distintas formaciones costeras, etc. Estos factores determinan que el arribo del tsunami a la línea costera sea un proceso complejo, lo cual genera diferencias notables de altura máxima (run-up), aún a cortas distancias a lo largo de ella. Por este motivo, con el objeto de mejorar los programas de contingencia ante estos fenómenos, es importante documentar de manera precisa las características que definen una onda de tsunami, como la cota máxima y área de inundación, además de la profundidad del escurrimiento, etc.

III. Metodología

En la mañana del día 4 de marzo de 2010, 6 días después del evento, se realizó una inspección en terreno de los efectos producidos por el tsunami en la localidad de Lolleo, desembocadura del río Maipo, con el objeto de identificar el área de inundación y recabar antecedentes del fenómeno, poniendo especial atención con respecto a las anomalías del nivel del mar ocurrida en la madrugada del 27 de febrero de 2010. Se procedió a confeccionar un registro gráfico con fotografías digitales del sector afectado, y con ayuda de la carta de navegación SHOA N° 514, se identificó el área inundada. El área inundada estimada fue digitalizada y su extensión estimada con software especializado. Por último se compararon los pronósticos de marea del SHOA, con los registros de los mareógrafos en los puertos de San Antonio y Valparaíso, ambos con una frecuencia de registro de 2 minutos, información que es contrastada con la apreciación de los lugareños entrevistados.

IV. Resultados

A continuación se presentan separadamente los resultados de las entrevistas, la inspección visual del terreno, la estimación del área de inundación y el análisis de las anomalías registradas en nivel de mar con los pronósticos de mareas.

IV.1. Entrevistas

En la mañana del 4 de marzo de 2010, se logró entrevistar in situ a tres personas (Tabla 1), dos de los sujetos adquieren especial credibilidad (una por su condición de ser funcionaria municipal e hija de pescadores artesanales; el otro por haber sido testigo directo del fenómeno mientras se encontraba manipulando sus embarcaciones para ponerlas en resguardo).

Tabla 1: Principales datos recabados en las entrevistas realizadas a los lugareños.

Caracterización Entrevistado	Relato
Mujer. Aproximadamente 50 años de edad. Funcionaria municipal e hija de pescadores con residencia a dos cuadras de la rivera del río.	Por cultura familiar, y sabiendo que se encontraba en una zona de inundación de Tsunami, inmediatamente después del sismo principal, huyo a un lugar elevado y resguardado junto a su familia. Cerca de 30 minutos después escudaron el mar subiendo por el río (4:00 A.M. app). No pudieron verlo. Una hora y media después (5:30 A.M. app), escucharon y vieron que el mar volvía a entrar con mucha fuerza y esta vez se desbordó, además arraso con el camping de la playa.
Hombre. Aproximadamente 60 años de edad. Pescador artesanal. Sin antecedentes de su lugar de residencia.	Vinieron varias olas después de las 4:00 A.M. La última fue la más grande. No vio el fenómeno directamente.
Hombre. Aproximadamente 40 años de edad. Pescador y dueño de un servicio de paseos en bote con residencia en la rivera del río Maipo en el sector de Cabimbao bajo.	Un poco después del primer sismo, observó que el río creció y se llevo uno de sus botes. Fue al embarcadero a realizar maniobras para salvar el resto. Mientras lo hacia por espacio de una hora, vio como el río creció dos veces más. Después de retirarse del lugar, pasadas las 05:30 AM, el río se desbordó (el mar entraba por cuarta vez) y se llevo las instalaciones del embarcadero.

Fuente: Elaboración propia.

IV.2. Inspección visual

Se recorrió el área afectada desde la rivera del río Maipo, inmediaciones de la desembocadura, en el sector denominado Cabimbao bajo ($33^{\circ}37'11''\text{S}$; $71^{\circ}37'13''\text{W}$) siguiendo una ruta en dirección Oeste, hasta el vertedero municipal en la boca, frente a la barra de la desembocadura y al lado de la empresa forestal Comaco S.A. ($33^{\circ}36'55''\text{S}$; $71^{\circ}37'36''\text{W}$). Posteriormente se siguió por la playa Lolloe en dirección al Norte hasta la Avenida la Playa ($33^{\circ}36'23''\text{S}$; $71^{\circ}37'27''\text{W}$) en el Camping Lolloe, lugar que en su lado sur fue afectado por el tsunami. Se prosiguió en una ruta paralela a la Avenida Costanera en dirección al puerto, obra que corresponde a un terraplén de acceso al puerto y sirvió de protección frente al fenómeno. Por este camino se llegó hasta el inicio del recinto portuario ($33^{\circ}36'04''\text{S}$; $71^{\circ}37'35''\text{W}$). Posteriormente se retrocedió para recorrer el camping y las cabañas afectadas por la Avenida la Playa en dirección Este, identificándose el punto hasta donde llegó la onda de ($33^{\circ}36'25''\text{S}$; $71^{\circ}37'21''\text{W}$). En la Figura 4 se ilustra el recorrido realizado durante la inspección y en los anexos se incluye el registro gráfico de esta inspección visual.

Figura 4: Recorrido realizado durante la inspección visual realizada.



Fuente: elaboración propia.

De esta inspección visual se desprende evidencia de hundimientos de terreno en zonas de la rivera del río, que el vertedero municipal fue afectado en su línea más cercana a la costa por la acción del tsunami, que las ondas ingresaron al sector del camping sur de Lolloe por la altura de la Avenida la Playa, arrasando un número aproximado de 169 viviendas construidas en material ligero y que la disposición más alta de la Av. Costanera protegió al sector norte compuesto de 277 viviendas también de material ligero. Se estima que las ondas de tsunami afectaron las lagunas costeras de Lolloe con un run-up en torno a los 3 [m], llegando el mar hasta la línea de contenedores aproximadamente paralela a la costa.

III.3. Estimación Área de Inundación

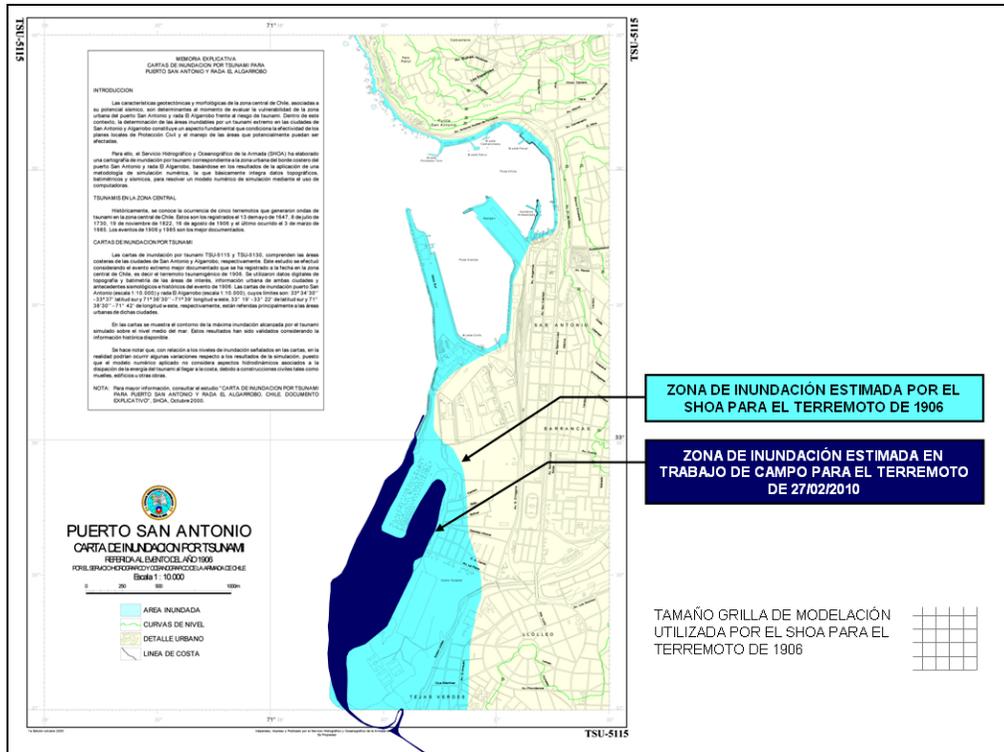
Con la ayuda de la carta de navegación SHOA N° 514, datos proporcionados por los lugareños y la evidencia visual de los autores, se estimó un área inundada de 3.5 hectáreas aproximadamente (Figura 5), información que es comparada con la carta de inundación confeccionada por el SHOA para terremoto tsunamigénico de 1906 (Figura 6).

Figura 5: Área de inundación estimada para el tsunami del 27 de febrero de 2010.



Fuente: elaboración propia.

Figura 6: Carta de inundación para el tsunami de 1906 y área de inundación estimada para el 27/02/2010.



Fuente: Adaptado del SHO A.

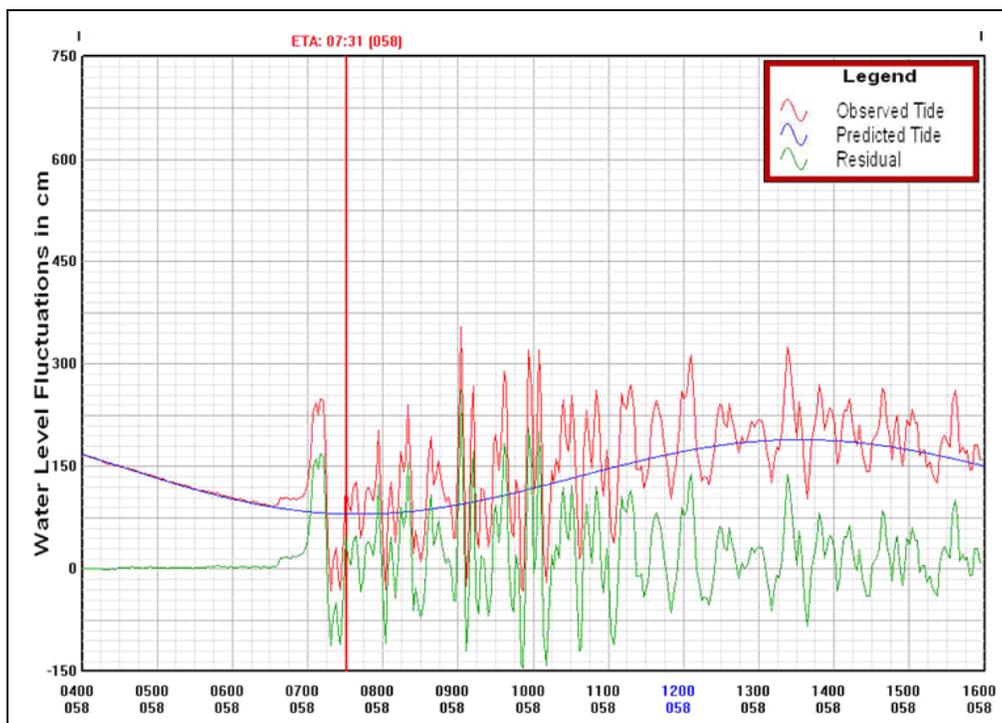
En la Tabla II se muestran los pronósticos de marea para las localidades de Valparaíso y San Antonio el día del tsunami. Se puede apreciar que la llegada de las primeras olas del tsunami coincidió con la bajamar de aquella madrugada, lo que se constata en los registros proporcionados por el *International Tsunami Information Center* (ITIC) para Valparaíso en la Figura 7 y por la *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA) para San Antonio en la Figura 8².

Tabla II: Pronósticos de marea para el 27/02/2010.

Estado del mar	Valparaíso		San Antonio	
	Hora	Altura (m)	Hora	Altura (m)
Bajamar	4:32	0.19	4:47	0.16
Pleamar	10:24	1.33	10:36	1.20
Bajamar	16:10	0.27	16:21	0.20
Pleamar	22:38	1.85	22:52	1.73

Fuente: Adaptado del SHOA.

Figura 7: Marea pronosticada (azul), marea observada (rojo) y anomalía (verde) para el 27/02/2010 en Valparaíso.

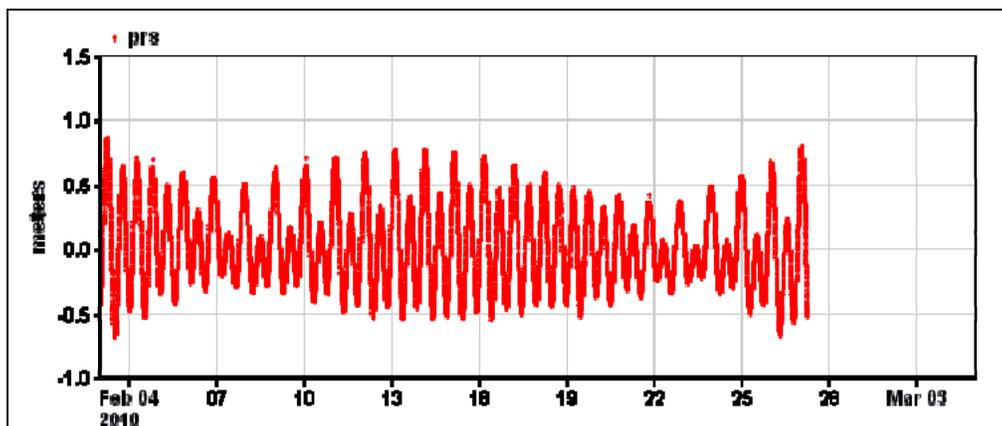


Fuente: <http://ioc3.unesco.org/itic/contents.php?id=667>.

Nota: La hora corresponde al meridiano de Greenwich y deben restarse 3 horas para llevarla a hora local.

² El registro en San Antonio se perdió, presumiblemente por la primera elevación significativa del nivel del mar.

Figura 8: Marea observada para el 27/02/2010 en San Antonio.



Fuente datos GLOOS - NOAA

IV. Discusión Preliminar

A falta de registros instrumentales en San Antonio, el análisis de la evolución del nivel del mar se basa en el análisis del registro de Valparaíso y en las estimaciones preliminares de la zona de inundación efectuadas por los autores³. En Valparaíso, el tsunami se manifestó inicialmente a través de una desnivelación positiva en torno a $\eta = +1,6$ [m] sobre el nivel de la marea, seguida de bruscos ascensos y descensos del nivel del mar. La altura máxima -esto es la diferencia entre una cresta un valle sucesivos- alcanzó $H = 2,5$ [m] aproximadamente 2 horas después de ocurrido el tsunami. Durante la madrugada, al encontrarse el mar en un estado de marea llanante, se observaron oscilaciones que alcanzaron cotas superiores a las iniciales pero con un menor potencial destructivo. Lloleo indican run-up en torno a $R = 3,0$ [m], lo que parece consistente con el registro en Valparaíso.

El ataque de las primeras ondas de tsunami ocurrió durante la bajamar de sicigias (el nivel del mar se encontraba en uno de sus puntos más bajos del año) situación que significó que las ondas apenas alcanzaran cotas sobre el nivel de más alta marea pronosticada para dicho día. De ello se desprende que la inundación y consecuente pérdida de vidas humanas e infraestructura podría haber sido bastante mayor si las primeras ondas en una condición de marea menos benévola. Por otra parte, la presencia del terraplén de acceso sur al puerto de San Antonio –utilizado como vía alternativa al acceso principal- actuó como una defensa que permitió proteger alrededor de 280 viviendas de construcción ligera correspondiente al sector del camping Lolloleo Norte, suerte que no corrieron aproximadamente 170 viviendas del sector camping Lolloleo Sur, que fueron completamente arrasadas y donde se perdieron al menos 5 vidas humanas.

³ La comparación con Valparaíso es apropiada sólo para las primeras ondas de tsunami, pero, debido a las condiciones locales de la bahía, la señal puede estar contaminada con oscilaciones derivadas del tsunami

Debido a la complejidad de los procesos de interacción topográfica y batimétrica que experimentan las ondas de tsunami en su propagación hacia una costa con accidentes significativos como la de San Antonio⁴, la evaluación de la inundación del evento del 27/02/2010 deberá efectuarse utilizando de modelos numéricos de propagación de ondas que consideren como en detalle la distribución de sondas y cotas topográficas en el área de interés, además de la distribución del run-up obtenida de el levantamiento topográfico en curso. Las cartas de inundación elaboradas por el SHOA utilizando en modelo TUNAMI-N constituyen un buen indicador de las zonas potencialmente inundables, pero su escasa resolución, de 93 [m] en la zona de inundación, no permite describir accidentes topográficos como el terraplén del acceso sur al puerto de San Antonio, que demostraron ser relevantes para evitar la pérdida de vidas humanas.

La determinación de las zonas vulneradas por el evento del 27/02/2010 y la definición de escenarios eventuales de tsunamis mediante técnicas de modelación de alta resolución permitirá delimitar zonas de riesgo que debieran ser contempladas en los instrumentos de planificación territorial.

V. Referencias

Barrientos, S. Earthquakes in Chile. In Moreno, T. and Gibbons, W. Ed, The Geology of Chile. Geological Society of London, 2007, p.263-287.

Boroschek R., Soto P., León R. y Comte D. (01 de marzo de 2010). Informe preliminar N° 1 Red nacional de Acelerógrafos. Terremoto Centro Sur Chile 27 de febrero de 2010. Departamento de geofísica, Universidad de Chile. 9 pp. Disponible en <http://www.renadic.cl> (fecha de visita: marzo de 2010).

Iida K. (1970). The Generation of tsunamis and the focal mechanics of earthquakes. In W.M. Adans (ed) Tsunamis in the Pacific Ocean East West Center Press- Honolulu Hawaii, pp 3 – 18.

PTWC (28 febrero de 2010). Tsunami Bulletin N° 027. Pacific Tsunami Warning Center/NOAA/NWS. Disponible en <http://www.itic.org> (fecha de visita: marzo de 2010)

Van Dorn, W. (1968). Tsunami. Contemp Phys. 9: 145 – 164.

Winckler, P. (2002). Evaluación de riesgo de tsunami en Quintero, Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 156 pp.

Anexo: Registro Gráfico

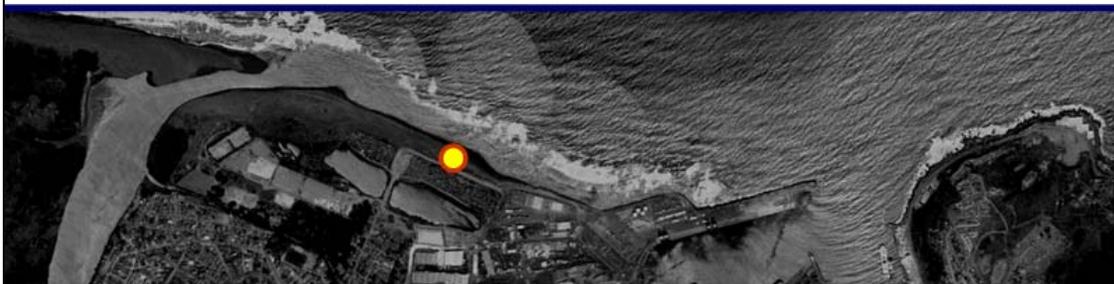
⁴ Las irregularidades son significativas en una zona como Llo-Ileo, donde el fondo marino está marcado por la presencia del cono de deyección del Río Maipo y el cañón submarino de San Antonio.



HUNDIMIENTOS EN EL TERRENO
BORDE DEL RÍO MAIPO, SAN ANTONIO



COTA MÁXIMA DE INUNDACIÓN
LLO-LLEO, SAN ANTONIO





VIVIENDAS ARRASADAS
LLO-LLEO, SAN ANTONIO



VIVIENDAS ARRASADAS
LLO-LLEO, SAN ANTONIO

