

ÁREA DE INUNDACIÓN Y EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 27
DE FEBRERO DE 2010 EN LA LOCALIDAD DE LLOLLEO,
SAN ANTONIO – CHILE (33°36.5''S)

Manuel Contreras López*, **Patricio Winckler Grez**** y **Luis Urbina Parra*****

*Centro de Estudios Avanzados y Facultad de Ingeniería, Universidad de Playa Ancha,
(manuel.contreras@upla.cl)

** Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, (patricio.winckler@uv.cl)

*** Ingeniero Ambiental, (luisurbinaparra@gmail.com)

RESUMEN

Se reportan los efectos que produjo el tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la localidad de Lolleo. Se identifica el área de inundación utilizando GPS y se compara el registro del mareógrafo de Valparaíso con las horas de llegada de las ondas indicadas por testigos tanto en la ribera del río Maipo, Lolleo y el Puerto de San Antonio. Lolleo es un ejemplo de un emplazamiento irregular con fines habitacionales en un lugar no apto que fue aumentando su vulnerabilidad en el tiempo, producto de intervenciones a las dunas costeras que servían de protección. Se muestra cómo el arribo de las primeras ondas de tsunami coincidió con la bajamar, lo que presumiblemente permitió que más de 260 cabañas de material ligero pudieran sobrevivir protegidas sólo por una rampa de acceso al puerto; mientras que 100 [m] al sur, 168 cabañas fueron completamente arrasadas, con 5 víctimas fatales.

Palabras clave: Dunas de arena, lagunas costeras, vulnerabilidad en la zona costera, desembocadura río Maipo.

ABSTRACT

We report the effects of the 27 February 2010 Chile Tsunami in the coastal town of Lolleo. The flooded area is identified using GPS and the tide gauge record at Valparaiso is compared to the arrival times of waves reported by witnesses in river Maipo, Lolleo and the nearby port of San Antonio. Though arrival of the first tsunami waves coincided with low tide, massive damage and 5 casualties were observed. Lolleo is an example of an irregular settlement located in lowlands with increasing vulnerability as a result of successive interventions to the coastal dunes that originally served as protection. The presence of a ramp at the southern end of the port prevented flooding of 260 cabins of light material, while 100 [m] south 168 unsheltered cabins were completely destroyed.

Key words: Sand dunes, coastal lagoons, coastal vulnerability, Maipo river mouth.

INTRODUCCIÓN

El 27 de febrero de 2010, a la hora local 3:34:08 AM (UTC – 3), la zona central de Chile fue sacudida por un terremoto que alcanzó una magnitud de momento sísmico $M_w = 8.8$ (Vargas *et al.*, 2011: 220). Como consecuencia de los importantes movimientos que generó el terremoto, un tsunami destructor impactó la zona centro – sur de Chile, siendo Lolloo (Figura 1) la localidad del borde costero continental más septentrional significativamente dañada, con cinco víctimas fatales (Fiscalía, 2011). Las ondas de tsunami arribaron a las 4:08 AM (Romero *et al.*, 2010: 147) y arrasaron un conjunto de 168 viviendas de material ligero (IMSA, 2010), junto con causar daños de diferente consideración en algunas estructuras costeras y portuarias.

Figura 1: Localización de la playa Lolloo y sus lagunas costeras en relación al Puerto de San Antonio, y la localización de este último en la región de Valparaíso.



[Fuente: Elaboración Propia]

Varios autores han otorgado descripciones sobre el mecanismo focal de este sismo, que fue de tipo inverso, correspondiente a un terremoto de subducción producto del hundimiento de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. El área de ruptura comprendió entre Valparaíso (33° S) y el sur de Isla Mocha ($38,6^\circ$ S), con una extensión superior a 610 [km] (Quezada *et al.*, 2010: 12) y un ancho promedio de 150

[km] (Barrientos, 2010: 412), afectando un área estimada de 82'500 [km²] (Pararas-Carayannis, 2010: 98). El Servicio de Sismología de la Universidad de Chile ubicó el hipocentro en (36.48° S; 73.239° W) a 30.1 [km] de profundidad bajo la corteza terrestre frente a las localidades de Curanipe y Cobquecura (Barrientos, 2010). El área afectada se encontraba poblada por más de 13 millones de habitantes (cerca del 80% de la población chilena) y fue percibido en gran parte del Cono Sur con diversas intensidades, en lugares como Ica – Perú, 2400 [km] al norte, y Buenos Aires y São Paulo por el oriente (CEPAL, 2010: 6 – 7).

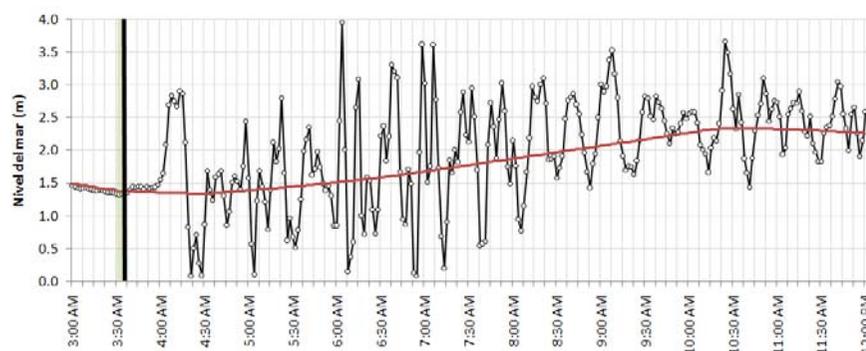
El sismo es considerado como el segundo más fuerte en la historia del país y uno de los seis más fuertes registrados por la humanidad. Sólo es superado a nivel nacional por terremoto de Valdivia en 1960 ($M_w = 9.5$), el de mayor intensidad registrado mediante sismómetros (Kanamori, 1978). Resultados preliminares estiman un desplazamiento cercano a los 10 [m] en el contacto interplaca (Lange *et al.*, 2012: 414). La ruptura se puede subdividir en dos segmentos (Quezada *et al.*, 2010), uno de los cuales rompe en dirección al SSW y el otro en dirección NNE del hipocentro (Delouis *et al.*, 2010; Lorito *et al.*, 2011):

- Ruptura Sur: Entre el sur de la Isla Mocha y Chanco ($35.8 - 38.6^\circ$ S). La ruptura comenzó en el borde norte (cercanías de Chanco) y se propagó hacia el sur, llegando al segmento que rompió en el terremoto de 1960 (Lange *et al.*, 2012: 414).
- Ruptura Norte: Entre Constitución y Valparaíso ($33 - 35.3^\circ$ S). Comenzó 75 [s] más tarde que la anterior y se propagó de sur a norte, superponiéndose a la ruptura acontecida en el año 1985 (Lange *et al.*, 2012: 414, *op. cit.*).

Como consecuencia del terremoto, un tsunami impactó toda la zona centro – sur de Chile, provocando muertes entre Tirúa por el sur hasta Algarrobo por el norte y destruyendo varias localidades ya devastadas por el impacto telúrico. El fenómeno se manifestó en la cuenca del océano Pacífico con efectos visibles, pero no destructores, en Islas Galápagos, México, Hawaii, Nueva Zelandia. Se reportaron daños en embarcaciones y un muelle en San Diego, California, e inundaciones en el norte de Japón (Pararas-Carayannis, 2010: 101–102). En el litoral de Chile, las localidades más afectadas fueron: Talcahuano, Constitución, Dichato, Lolloo, Tubul y Llico. También sufrieron daños significativos Tirúa, Coliumno, Vegas de Itata, Chanco e Iloca, entre otras muchas localidades costeras. Según las cifras oficiales del Ministerio del Interior (Fiscalía, 2011), el tsunami cobró 181 vidas, de las cuales 156 fueron identificadas, mientras que 25 personas nunca fueron encontradas. Las víctimas se distribuyen de la

siguiente forma: costa de la región del Maule (103), Biobío (46), O'Higgins (5), Valparaíso (7), Isla Mocha (4) e Isla Robinson Crusoe del Archipiélago de Juan Fernández (16).

Figura 2: Registro nivel del mar en puerto Valparaíso entre las 3:00 y 12:00 AM del 27 de febrero de 2010. La línea gruesa central indica el nivel del mar pronosticado por consideraciones astronómicas (marea). La línea vertical señala hora del sismo (3:34 AM). Las fluctuaciones sobre la marea pronosticada corresponden al registro de las ondas de tsunami en Valparaíso.



Las horas de llegada de las olas difieren según las localidades. El mareógrafo más cercano a Lollole que registró el tsunami se ubica en el puerto de Valparaíso, 60 [km] al norte de la localidad. El registro (figura 2) indica que las primeras ondas alcanzaron niveles de entre 1.3 y 1.5 [m] sobre el nivel de marea, pasadas las 4:00 A.M (26 minutos después del sismo principal). En Lollole, la ola más grande provino desde el sur y ocurrió al amanecer (Fritz *et al.*, 2011; Quezada *et al.*, 2010), con alturas de inundación de hasta 4 [m] (Fritz *et al.*, 2011, *op. cit.*). Al sur, en las bahías de Concepción, Coliumo y Golfo de Arauco, la dirección del tsunami fue de norte a sur (Morales, 2010) y la tercera ola (8:00 horas), fue la más destructiva; mientras que en Tirúa e Isla Mocha, la primera ola (4:00), fue la más destructiva (GEER, 2010). De acuerdo a la información de testigos, entre Constitución e Iloca el tsunami provino desde el oeste, con dos olas durante la noche y una tercera al amanecer, de mayor tamaño, desde el noroeste. Quezada *et al.* (2010) ha sugerido que estas diferencias en direcciones y tiempos de arribo pueden estar asociadas a los

dos segmentos de ruptura, cada uno de ellos generando su propio tsunami. Lorito *et al.* (2011) ajustaron de forma aceptable las ondas pronosticadas mediante un modelo que considera dos desplazamientos en el lecho marino, con los registros de mareógrafos.

Históricamente, las mayores alturas de tsunamis han sido observadas en bahías angostas o con presencia de islas, en desembocaduras y en sectores con farellones costeros. Un importante ejemplo del primer caso es bahía de Concepción. La pérdida del mareógrafo del puerto de Talcahuano tras el arribo de la segunda onda evidencia un efecto de amplificación importante al interior de esta bahía. Por otra parte, Fritz *et al.* (2011) documentan el efecto en la desembocadura del río Maule en Constitución, donde varios kilómetros río arriba se registraron efectos de las ondas y en las cercanías de la costa se apreciaron alturas significativas. González *et al.* (2012) describe los efectos de la onda de tsunami sobre la desembocadura del río Mataquito, donde fue arrasada una extensión de 5 [km] de la duna que separaba el océano del estuario. Posteriormente ésta se recuperó, pero con modificaciones en la posición y el equilibrio hidrodinámico de la desembocadura del estuario. El caso del sector de Lollole es interesante por cuanto se combinan dos factores opuestos en una corta extensión de terreno: a) la desembocadura del estuario río Maipo, donde se espera que la onda de tsunami sea mayor e incluso remonte el curso de agua dulce; y b) las lagunas costeras, que se espera frenen o mitiguen el avance de la onda de tsunami (Gedan *et al.*, 2011: 7 -8). Entrelazados con estos dos rasgos morfológicos, distintivos y delimitantes del comportamiento de las ondas de tsunami en la zona, se encontraban emplazados en un sector bajo de inundación una caleta de pescadores, una planta astilladora, el camping, un botadero y la infraestructura de acceso al puerto de San Antonio (figura 3), cuyas vulnerabilidades ante la amenaza de tsunami se definían por la cota inferior a 3 [m] sobre el nivel del mar del lugar (Winckler *et al.*, 2011: 24).

El presente trabajo reporta los efectos de las ondas en la localidad de Lollole con el objeto de estimar el área de inundación y registrar antecedentes útiles que permitan realizar estudios de riesgo de tsunami en la zona. El patrón de inundación alcanzado por un tsunami en la costa obedece principalmente a la topo-batimetría local, y puede variar drásticamente incluso en cortas distancias. Esto quedó ilustrado en la zona en estudio, donde dos sectores habitados y separados por 100 [m] fueron afectados de manera distinta: El denominado camping norte de Lollole fue protegido por un terraplén de acceso de camiones al puerto de San Antonio; mientras el camping sur, que sólo contaba con dunas naturales de baja cota como protección, fue completamente arrasado.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la mañana del día 4 de marzo de 2010 (6 días después del evento), se realizó la primera de un total de 10 inspecciones en terreno, con el objeto de identificar el área afectada, estimar alturas de inundación, realizar un registro gráfico y recabar antecedentes del fenómeno. En las campañas de terreno se entrevistó a lugareños y testigos del fenómeno, testimonios que fueron complementados con antecedentes disponibles en el Museo de San Antonio y la Municipalidad. Mediante GPS se posicionaron las marcas de tsunami con un error de 3 [m], cuyas identificaciones fueron corroboradas con las entrevistas. En GoogleEarth pro v.6.1.0 se volcaron los datos georeferenciados recolectados en zona en estudio.

Al momento del ataque del tsunami, el mareógrafo del puerto de San Antonio no estaba registrando niveles. Por ello, para reconstruir la evolución temporal del fenómeno en Lolloleo se recurrió al registro del mareógrafo en el Puerto de Valparaíso (Figura 2) y se complementó esta información con testimonios de los lugareños afectados por el tsunami.

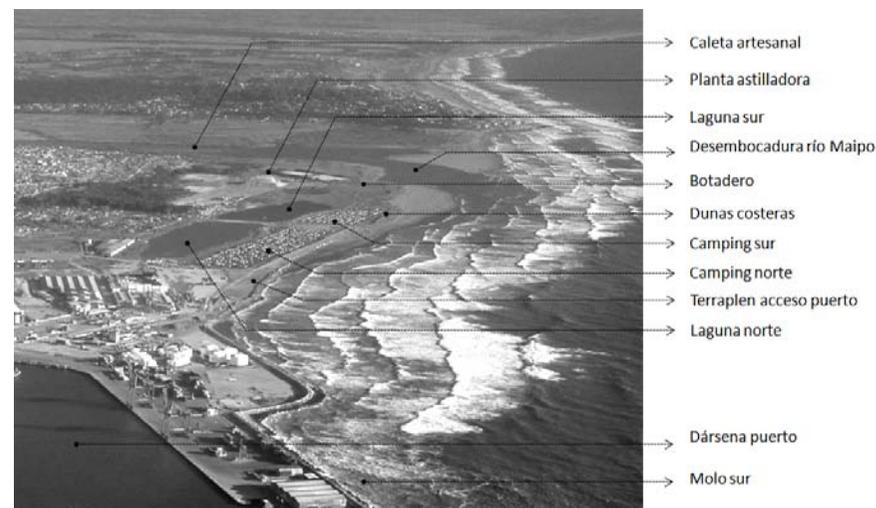
Área de Estudio

La playa de Lolloleo se ubica a 4 [km] al sur de San Antonio (33°36'S; 71°37'W), con una longitud de 2.25 [km] y una orientación NNE – SSW, quedando totalmente desprotegida del oleaje del SW (Del Canto y Paskoff, 1983). Se caracteriza por ser un sector que refleja la complejidad evolutiva que pueden alcanzar las zonas costeras (Lazcano y Retamal, 2011: 22). A comienzos de 2010, en un área cercana a las 350 hectáreas se encontraban compitiendo por el uso de suelo: el Puerto de San Antonio, un camping compuesto de unas 440 cabañas de construcción liviana, un botadero utilizado además como vertedero de residuos domiciliarios y peligrosos, dos plantas astilladoras, un parque recreacional y una caleta de pescadores artesanales ubicada en su ribera norte. En las inmediaciones del camping existían dunas vivas afectadas por agentes hidrodinámicos del estuario y dunas antiguas semi-estabilizadas por una frágil cubierta vegetal (Del Canto y Paskoff, 1983, *op.cit*). En la Figura 3 se identifican estos sitios de interés.

La construcción del Puerto de San Antonio en 1910 comenzó a producir un ensanchamiento de la playa original (Figura 4), debido a que el molo sur detuvo la corriente de deriva litoral que arrastraba sedimentos de origen volcánico del río Maipo

(Brito, 2009: 62 – 64). Este ensanchamiento fue estimado por Pomar (1962) en unos 600 [m] entre 1912 y 1934.

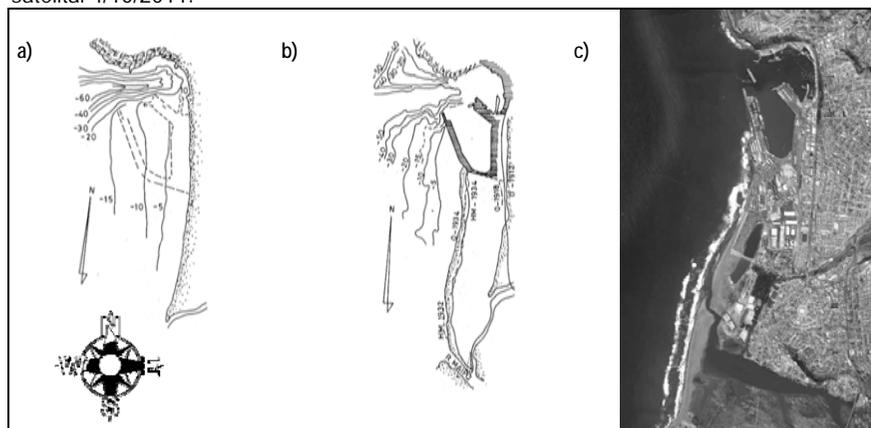
Figura 3: Principales sectores mencionados en el texto. Se puede apreciar los camping Sur y Norte emplazados entre las lagunas y la playa. Fuentes:).



[Fuente: Fotografía disponible en Panoramio
(<http://www.panoramio.com/photo/31582860>)]

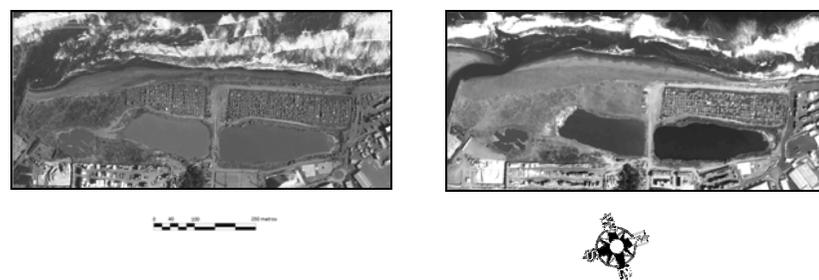
Desde 1562, más de 30 tsunamis de campo cercano han asolado las costas de Chile. La zona central, y en particular la zona de estudio, fue afectada por tsunamis de diferentes importancias en los años 1575, 1647, 1730, 1822, 1906, 1971, 1985, y ahora en el año 2010. Este último y el del año 1730, han sido los únicos tsunamis importantes que han afectado el lugar. Los tsunamis de 1971 y 1985 no produjeron daño en las lagunas y el camping, dado que existía una mayor concentración de dunas, y sólo se evidenciaron efectos en la rivera del río Maipo (Brito, 2009). En la tabla 1 se muestra una síntesis de los principales sucesos relacionados con el ataque de tsunamis en la zona. En la figura 5 se compara las vistas de planta de la zona de estudio, antes y después del tsunami.

Figura 4: a) Bahía de San Antonio, playa Lolloe y desembocadura del río Maipo antes de la construcción del molo sur. b) Avances de la línea de costa hasta 1934. c) Foto satelital 4/10/2011.



[Fuente: Lira (1938) y Google Earth.]

Figura 5: Borde costero de Lolloe a) antes del tsunami (10 de agosto, 2009) y b) después del tsunami (10 de abril, 2010). Las ondas arrasaron 168 viviendas construidas en material ligero en el camping sur. El terraplén más elevado de la Av. Costanera protegió al sector norte compuesto de 277 viviendas.



[Fuente: Google Earth.]

Tabla 1: Tsunamis anteriores y otros sucesos relevantes en el sector de Lolloe.

Tipo y Fecha	Descripción
Terremoto del 17 de Mayo de 1575.	No existen registros de un tsunami pues a la fecha no había un asentamiento humano estable en la zona. En la Bahía de Arauco no se observaron movimientos anómalos en el mar. Sin embargo, en Valdivia se registró una gran ola que arrasó dos naves fondeadas en el río Calle Calle y barrió casas, postes y árboles en la ribera del río.
Terremoto del 13 de Mayo 1647.	Archivos de la Real Audiencia afirman que "por todos los puertos de la costa (central) advirtieron los pescadores tanta violencia en las olas de mar que se subían sobre las más altas sierras que las cercan" (Kausel, 1986, citado por Winckler, 2002).
Terremoto del 8 de julio de 1730.	Afectó entre Valdivia y la Serena con epicentro estimado en (36°S; 73°W), y con una magnitud estimada Mw = 8.7, el tsunami resultante afectó alrededor de 1'000 kilómetros de costa y provocó variaciones del nivel del mar de 16 metros en Concepción. En Valparaíso, el tsunami devastó las instalaciones portuarias, parte del naciente barrio El Almendral e incluso casas situadas en las laderas de los cerros.
Nombramiento del puerto en 1810.	Se nombra a San Antonio como puerto mayor.
Terremoto del 19 de noviembre de 1822.	Con epicentro en Copiapó (33.0° S, 71.4° W) y Mw = 8.5, afectó gran parte de Chile central. En Valparaíso el mar descendió unos 3 metros y posteriormente fueron afectadas varias embarcaciones en la bahía con olas de unos 4 [m]. El mar se retiró tres veces y las olas rompieron en la ribera sin inundar la ciudad. Se registraron olas importantes desde el río Copiapó hasta Valdivia. No existen mayores antecedentes en San Antonio, pero se estima un tsunami de 3.5 metros.
Terremoto del 20 de febrero de 1835.	Epicentro en (36.8° S, 73.0° W) y Mw = 8.2. El maremoto destruyó varias localidades costeras con olas de más de 3 metros. No existen antecedentes específicos para San Antonio.
Terremoto del 13 de agosto de 1868.	Con epicentro en Arica, provocó un tsunami de 18 [m] en el norte de Chile, y que en el centro y sur provocó grandes marejadas que dañaron lanchas, muelles y caminos, especialmente en Constitución (cinco víctimas fatales), Tomé, Penco, Talcahuano y Concepción.
Terremoto del 16 de agosto de 1906.	Epicentro en (33.0° S., 72.0° W), con una magnitud Mw = 8.6, afectando principalmente desde la desembocadura del río Rapel hasta Papudo. El tsunami generado fue relativamente menor. En Valparaíso devastó gran parte del barrio El Almendral, con un total de 3882 víctimas en la zona central. El tsunami que acompañó el evento registró amplitudes máximas de sólo 1.2 [m] sobre la marea alta en Valparaíso, siendo registrado incluso en Japón.
Construcción puerto en 1911.	Se inician los trabajos del Molo Sur, que finalizan en 1918, y que desestabilizan la playa de Lolloe, provocando que se acreciente de forma descontrolada.
Temporal de 1936.	Se estima que este gran temporal afectó la zona de la desembocadura del río Maipo, formándose su barra de arena y dando origen a la actual laguna de Lolloe.
Maremoto del 1 de Abril de 1946.	Se produjo un tsunami producto de un terremoto submarino, cuyo epicentro fue ubicado a 3666 metros de profundidad en las islas Aleutianas. La onda afectó a todos los puertos del Pacífico sur. En Valparaíso las olas penetraron más de 100 metros tierra adentro. Se desconoce qué tipo de daños causó en San Antonio, pero en Valparaíso fueron cuantiosos.
Obras del puerto en 1947.	La regularización del puerto y construcción del Molo Sur, permite la formación de la laguna de Lolloe original.

Construcción Av. La playa finales del 40.	La laguna es dividida en dos para facilitar el acceso a la Playa (Av. La Playa).
Maremoto del 4 de noviembre de 1952.	Se produjo en la Península de Kamchatka en el Hemisferio Norte, sus efectos se sintieron en los puertos del norte y centro de Chile, con oleajes pequeños cubriéndose levemente áreas costeras.
Camping Lollole años 1960.	Comienzan a instalarse las cabañas en el camping.
Terremoto del 8 de julio de 1971.	Afectó a Coquimbo, Valparaíso y Santiago. Tuvo una magnitud de Mw = 7.7 grados. Lollole quedó con el cuarenta por ciento de sus casas destruidas, aunque muchas fachadas de pie. El sector de estudio no fue afectado, pues las dunas y la berma de la playa sirvieron como protección del pequeño tsunami que se generó
Terremoto del 3 de marzo de 1985.	Con una magnitud Mw = 8.0 y epicentro en 33.13°S y 71.87°W. En Valparaíso, se produjo un tsunami de 1.15 [m] que no generó daños, pero fue registrado a lo largo de la costa de Chile. En el sector de estudio, dicho tsunami sólo remontó por el río Maipo, sin causar daños.
Terremoto del 8 de abril de 1985.	Sismo en Bajo Lago Rapel, generó anomalías en el mar a nivel local, pero estas no afectaron el área debido a la protección de las dunas.
Crecimiento Puerto de San Antonio 1995	El puerto incrementa fuertemente su movimiento de contenedores, constituyéndose en el principal puerto del país.
Construcción Av. Costanera, años 90.	Se realizaron rellenos con escombros y requeríos, construyendo un camino paralelo al mar en el sector norte, con 20 m de ancho en algunos puntos y de unos 3 m de altura.
Destrucción dunas en 1999.	Se construyó una pista ilegal de automovilismo que funcionó brevemente. Para la construcción se utilizó una retroexcavadora que barrió con las dunas del sector sur.
Relleno escombros ribera norte río Maipo en 2003.	En el sector se encontraba una cancha de fútbol abandonada y fue rellenada con escombros provenientes del paseo Bellamar, habilitando el sector con un botadero.
Desborde del río Maipo Mayo del 2008.	Las grandes descargas del río no pudieron romper la barra de arena de la desembocadura que se había acrecentado durante la sequía del año 2007. El desborde se llevo casi la totalidad de la playa de Lollole, llegando el mar a unos pocos metros de las cabañas en los camping Norte y Sur.

[Fuente: Adaptado de Brito (2010), Winckler (2002), Urbina (2011) y Pararas-Carayannis (2010).]

RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestran las horas y alturas de pleamar y bajamar pronosticadas por el SHOA en los puertos de Valparaíso y San Antonio. El sismo ocurre una hora antes de la más baja marea del día y la primera onda arriba poco antes de que la bajamar de sicigias (una de las alturas más bajas del año). La

siguiente pleamar ocurre a las 10:30 de la mañana, por lo que las ondas que arriban después de las 7:00 llegan en plena llenante.

En la Tabla 3 se muestran los principales testimonios recabados. Los testigos coinciden en que a partir de las 4:00 comienzan a arribar diferentes olas con una intermitencia de 30 minutos aproximadamente. No existe consenso sobre la hora de ocurrencia de la onda extrema, pero se estima arribó entre las 5:30 y 6:00, antes del amanecer. Esto es coherente con el registro de nivel del mar en puerto de Valparaíso.

En la Figura 6 se muestra el área inundada por el tsunami. Los puntos destacados señalan marcas georeferenciadas y corroboradas por testigos.

Se pudo constatar la existencia de hundimientos de terreno en zonas de la ribera norte del río (Figura 7a). El botadero municipal emplazado en las inmediaciones de la desembocadura del río Maipo sufrió una socavación de unos 20 [m] por la acción de las ondas que alcanzaron el punto MT130 (33°36'59.30"S; 71°37'34.60"W), mostrado en la figura 6, dejando marcas como vegetación muerta por la salinidad del mar y residuos sólidos. Las ondas presumiblemente ingresaron al camping sur de Lollole por el sector donde las dunas fueron eliminadas en 1999 para construir la pista de automovilismo (33°36'42"S; 71°37'38"W), arrasando 168 viviendas construidas en material ligero (Figuras 7c y 7d). El terraplén más elevado de la Av. Costanera (33°36'12"S; 71°37'28"W) protegió al sector norte compuesto de 277 viviendas también de material ligero (Figura 7b), aunque algunas cabañas fueron afectadas en el punto MT42 (33°36'23"S; 71°37'27"W), cuando el tsunami ingresó a través de la Avenida la Playa (33°36'23"S; 71°37'27"W). Las ondas de tsunami afectaron las lagunas costeras de Lollole, llegando hasta la línea de contenedores aproximadamente paralela a la costa (33°36'25"S; 71°37'21"W). La máxima inundación alcanzó el punto MT22 (33°36'26.60"S; 71°37'18.52"W), de acuerdo a la información proporcionada por testigos y las marcas dejadas en murallas. La Laguna Sur quedó contaminada con los restos del camping arrasado (Figura 7d), mientras que en la Laguna Norte se encontraron algunos restos y el cuerpo de una persona, junto a los cuerpos de otros animales ahogados por la onda de tsunami (Tabla 3).

Tabla 2: Horas y alturas en metros de las pleamares y bajamar pronosticadas para el momento del tsunami en las localidades cercanas.

Localidad	26 de febrero de 2010		27 de febrero de 2010			
	Hora	Pleamar	Hora	Bajamar	Hora	Pleamar
Valparaíso	21:52	1.76	4:32	0.19	10:24	1.33
San Antonio	21:22	1.53	4:47	0.16	10:36	1.20

[Fuente: SHOA]

Tabla 3: Entrevistas y testimonios del tsunami.

Entrevistado/Fuente	Relato
Mujer. 50 años. Funcionaria municipal e hija de pescadores. Reside 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 escucharon el mar subiendo por el río (04h00 A.M. app). No pudieron verlo. Una hora y media después (05h30 A.M. app), escucharon y vieron que el mar volvía a entrar con mucha fuerza y esta vez se desbordó, además arrasó con el camping de la playa.
Hombre. 60 años de edad. Pescador artesanal.	Vinieron varias olas después de las 4h00 A.M. La última fue la más grande. No vio el fenómeno directamente.
Hombre. 40 años. Pescador. Reside en la rivera del río Maipo.	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 05h30 AM, el río se desbordó (el mar entraba por cuarta vez) y se llevo las instalaciones del embarcadero.
Antecedentes recabados por el Director Museo San Antonio. Fuente: Brito (2010).	Producido el terremoto los turistas del camping Llolleo se dieron cuenta que el nivel del mar había descendido bruscamente, abandonando el lugar. Pero una importante parte de estos habitantes comenzaron regresar a sus cabañas, hasta que alrededor de las 04:20 hrs. una ola de alrededor de 2.5 a 3 metros de altura ingresó al camping. Fue detectada por varios de ellos como una pared gris que avanzaba desde el sur. La masa de agua penetró unos 500 metros desde el suroeste con dirección noreste, arrastrando a su paso parte del enrocado superior de la escollera de defensa del puerto construida en 1917, para desviar las aguas de la desembocadura del río Maipo, y arrastrando la totalidad de las cabañas del sector sur del camping, destrozando totalmente la mayoría de las viviendas, otras las arranca completas desde el piso y las arrastra hundiéndolas enseguida en las aguas del sector sur de la laguna Llolleo, algunas de ellas con sus moradores humanos en su interior, al igual que algunos vehículos. La ola arrastró el cuerpo de uno de los cuidadores que resulto ahogado, siendo encontrado al día siguiente entre los pajonales en la ribera de la laguna norte, al igual que algunos cuerpos de aves de corral y un perro. En la ribera del río Maipo, los testigos indican que al menos tres olas sísmicas ingresaron por el río y pasaron el sector del puente Lo Gallardo, la mayor y mas importante aproximadamente a las 04:20 hrs.,

	de unos 2 metros de altura, posteriormente una alrededor de las 06: 20 hrs., mas pequeña de entre 1 y 1.5 metros de altura y una tercera a las 12 hrs. de un metro. La ola borró la barra de arena de la desembocadura y continuó su camino hacia el interior socavando la ribera norte y dañando seriamente las viviendas del sector Tejas Verdes y la vegetación en algunos sectores. En el sector Caleta Boca del Río Maipo, arrastró unos 50 metros aproximadamente el muelle flotante, algunos botes y socavó las rampas del sector ingresando el agua hasta las bocacalles del sector, hasta donde arrastró algunos botes sin hundirlos
Informe Alcalde I.M. San Antonio. Fuente IMSA (2010).	<p>Unos 90 minutos después del terremoto se produjo un tsunami que afectó en forma preferente al sector sur del camping de LLo-lleo, siendo completamente arrasadas 168 cabañas, en ese lugar había gente que ocurrido el terremoto les fue avisado para que evacuaran y quedaron solamente algunos (alrededor de 10 personas), de ellas cinco perdieron la vida por inmersión, las que en su totalidad fueron encontradas. Las otras personas fueron salvadas con vida flotando en los escombros existentes en el lugar.</p> <p>Hasta ese minuto de ocurrido el terremoto no sabíamos lo que venía en términos de tsunami, salvo el sonido de sirenas de unos barcos que era un anuncio de algún movimiento en el océano, pero no teníamos ninguna capacidad de poder reaccionar e informar a la comunidad porque no había ningún elemento como hacerlo ni energía eléctrica, ni altavoces, ni nada.</p> <p>El tsunami afectó también al sector de la Boca del Maipo, preferentemente al Sindicato de la Boca del Maipo; destruyó su muelle y todas sus instalaciones de atraque, afectó también la zona portuaria preferentemente STI, en una parte de protección del Molo Sur fue reventado, se produjo un forado y por ahí entró la fuerza del mar y generó la inundación en todo el patio de contenedores a una altura de un metro y medio sobre la losa, el terremoto mismo provocó un desnivel en la losa del Molo Sur. También la fuerza de este impacto desplazó de su ubicación original de los rieles a una de las grúas grandes, (1200 toneladas), la desplazó de su ubicación, felizmente sin volcarla. Respecto a Puerto Panul había un buque operando y con la orden de zarpe arrasó con grúa y todo al zarpar. En la zona de Puertecito el tsunami provocó daños en cuarenta embarcaciones, con la pérdida de aparejos y motores fuera de borda cuando el mar subió 2 metros. En la empresa Vopak un estanque con fenol, un producto químico que es base para insecticidas y diluyentes, se reventó y las 750 toneladas de fenol evacuaron hacia el mar.</p>

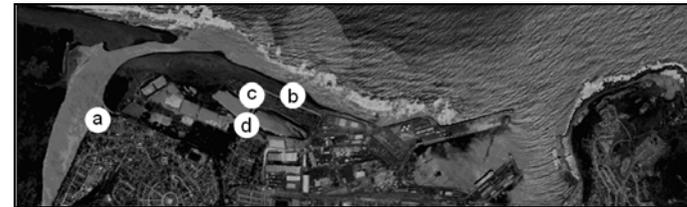
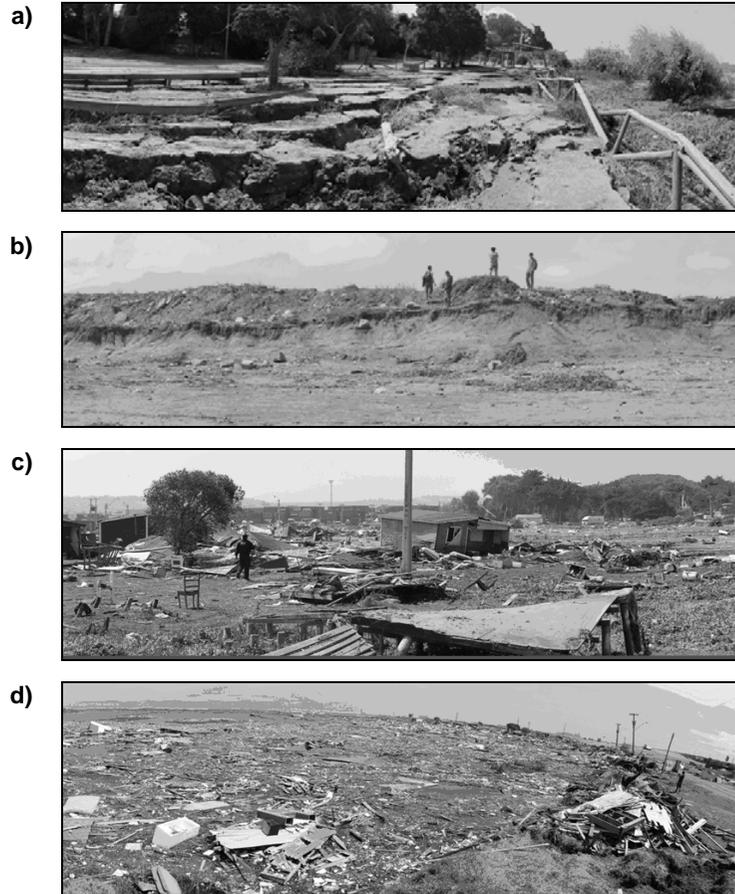
[Fuente: Elaboración Propia.]

Figura 6: Área de inundación estimada para la madrugada del 27 de febrero de 2010, que corresponde a una superficie de 43 hectáreas aproximadamente.



[Fuente: Elaboración Propia]

Figura 7: a) Hundimientos de terreno en la riberia del río Maipo. b) Marcas de la cota máxima de inundación en la Playa de Lolloe. c) Viviendas arrasadas del camping sur de Lolloe. d) Restos de viviendas arrasadas flotando en la laguna sur. e) Ubicación de las fotografías.



[Fuente: Elaboración Propia]

DISCUSIÓN

Playa Lolloe corresponde a un ejemplo del nivel de competencia por el uso de suelo que se puede alcanzar en la zona costera ante la inexistencia de una planificación territorial adecuada y la omisión de criterios de vulnerabilidad ante fenómenos naturales. El sustrato físico donde se emplazaba el camping arrasado por el tsunami, se formó a partir del año 1928 como resultado de las obras de construcción del molo sur del puerto (Lira, 1938; Pomar, 1962). De esta forma, el sector obedecía a una intervención humana, que estaba evolucionando en respuesta a diferentes alteraciones de los equilibrios hidrodinámicos, tanto de origen antrópico como naturales. Esto permitió la formación de las lagunas costeras de significativa importancia ecológica, el emplazamiento de sectores recreacionales e industriales en las inmediaciones, la disposición de un vertedero en la riberia de la desembocadura y la materialización de construcciones ligeras localizadas entre las lagunas y la playa, sobre un lugar que 82 años antes le pertenecía al mar.

Antes de 2008 dichas construcciones se encontraban fuera del terreno de playa, definido como la franja de tierra de 80 [m] de ancho medidos a partir de la línea de más alta marea (Lazcano y Retamal, 2011). La erosión causada por el desborde del río en aquel año, provocó que en el momento del tsunami las cabañas del camping sur se encontrasen a escasos 30 [m] de dicha línea (tabla 1). Ello, junto a la sistemática destrucción a la que fueron sometidas las dunas antiguas semi-consolidadas y la vegetación que las protegía, implicó que las cabañas del camping sur se encontrasen sin ninguna protección frente a tsunamis o incluso de una intensa marejada. En el plan regulador comunal, esta zona se encontraba identificada con uso habitacional e

industrial y las lagunas con una declaración de interés de protección por su importancia ecológica para las aves migratorias y marinas (Urbina, 2011: 53 – 54), en franca competencia con la expansión del puerto proyectada a ese sector. La legislación vigente -con una lógica de considerar el suelo como un recurso estático- no considera que la playa de Lollole se encuentra en un delicado equilibrio hidrodinámico donde cualquier alteración, como la construcción del puerto en el siglo pasado o las crecidas del río Maipo, pueden alterar significativamente su configuración, tanto acrecentando la playa o erosionándola.

Es interesante constatar como la vulnerabilidad del lugar se incrementa a partir del año 40, cuando se construye el camino que dividió la laguna en dos para facilitar el acceso a la playa. Esta avenida habría impulsado el emplazamiento de construcciones de material ligero que constituyeron el camping y que posteriormente fueron urbanizadas. Al momento del ataque del tsunami el sector disponía de alumbrado público, alcantarillado e infraestructura, lo que denota como un asentamiento que se emplazó de forma ilegal en una zona vulnerable fue consolidándose como sector habitacional. La intervención de la zona de dunas durante los últimos 20 años (Urbina, 2011; Lazcano y Retamal, 2011) habría incrementado la vulnerabilidad del sector.

Otro factor relevante durante la madrugada del 27 de febrero fue la condición de bajamar en época de sicigia, lo que traduce en que el nivel del mar se encontraba en uno de sus puntos más bajos del año. Esto contribuyó a que el sector afectado registrara inundaciones del orden de 500 [m] y que la rampa de acceso al puerto, construida en los años 90 y con alturas de unos 3 [m], haya sido capaz de servir de protección al camping norte, haciendo las veces de una duna artificial. Se presume que los efectos habrían sido bastante más graves si el tsunami hubiese arribado en otra condición de marea.

Según información de diversos testigos (tabla 3), el tsunami en Lollole habría partido con un recogimiento del mar. Sin embargo, en el registro del mareógrafo de Valparaíso el tsunami parte con una onda positiva, por lo que permanece la duda si es que los testigos confundieron la estoa de bajamar con un recogimiento. Posteriormente se observan bruscos ascensos y descensos del nivel del mar, con una frecuencia aproximada de 30 minutos en Valparaíso, lo que es confirmado por los testigos en Lollole y San Antonio. Esta situación, permitió que las primeras ondas de tsunami, inferiores a 1.5 [m], apenas alcanzaran el nivel de más alta marea pronosticada. Con el

avance de las horas y al encontrarse el mar en un estado de marea llenante, las ondas de tsunami puede haberse visto amplificadas, arribando la ola más destructora entre las 5:30 y 6:00 AM.

Posteriormente el lugar quedó expuesto a las marejadas. En tres ocasiones después del tsunami hasta diciembre del 2011, el mar logró ingresar nuevamente a la laguna sur, cuando se combinaron condiciones de intensas marejadas con una marea alta de sicigia, situación que no había ocurrido antes (tabla I).

CONCLUSIONES

En la madrugada del 27 de febrero de 2010, playa Lollole fue afectada por una serie de ondas de tsunami, con intervalos aproximados de arribo de 30 minutos, desde las 4:00 a las 7:00. Las primeras ondas apenas fueron percibidas como anomalías de la marea y arribando las más destructivas poco después de las 5:30 AM, hora local. La condición de baja mar en sicigia puede haber contribuido a mitigar el efecto de las primeras ondas de tsunami.

El camping de unas 400 cabañas de Lollole se encontraba emplazado en un área vulnerable. En el terreno de playa delimitado por el mar y las lagunas costeras "ojos de mar" de Lollole, lo que impidió que el rol protector de las lagunas costeras ante una inundación contribuyera a mitigar el efecto de las ondas de tsunami sobre estas cabañas.

Las ondas de tsunami inundaron una superficie total aproximada de 43 hectáreas, siendo detenidas por la rampla de acceso al puerto y las lagunas costeras. Existe evidencia de que las ondas de tsunami lograron remontar al menos 2.5 [km] la desembocadura del estuario río Maipo, arrasando con la barra de arena existente en el sector, siendo detectada el paso de la onda a la altura del puente Lo Gallardo.

AGRADECIMIENTOS

La Dirección General de Investigación de la Universidad de Playa Ancha, financió parcialmente este trabajo, a través de fondo DGI TES/01-2010; Mientras que el Laboratorio de Toxicología Humana y Ambiental, LdT, de la UPLA facilitó algunos de los instrumentos. Además colaboraron activamente en parte de la recolección de datos de campo los, entonces, alumnas y alumnos de las carreras Ingeniería Civil (PUCV, UTFSM), Ingeniería Ambiental (UPLA) y Geografía (UPLA): Ignacio Sepúlveda Oyarzún, Luis Burgos Gajardo, Rodolfo Navarro Jara, Matías Alday González, Francisca Sánchez Rodríguez, Karla Sepúlveda Zambrano, Ángel Lazcano Figueroa y Esteban Retamal González.

BIBLIOGRAFÍA

BARRIENTOS, S. (2010). Terremoto (m=8.8) del 27 de febrero de 2010 en Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67 (3): 412 – 420.

BRITO, J. (2009). *San Antonio: nuevas crónicas para su historia y geografía*. Fondo de iniciativas artísticas y culturales del Gobierno Regional de Valparaíso. Valparaíso, 412pp.

BRITO, J. (2010). *Efectos de la ola sísmica o tsunami en la laguna Lolleo*. 13pp. Disponible en línea (visita: enero de 2013): www.sanantonio.cl

CEPAL (2010). *The Chilean earthquake of 27 February 2010: an overview*. United Nations publication. 2010-191, Santiago, 32pp.

DEL CANTO, S. y PASKOFF, R. (1983). Características y evolución geomorfológica actual de algunas playas de Chile central, entre Valparaíso y San Antonio (V Región). *Revista de Geografía Norte Grande*, 10: 31-45.

DELOUIS, B.; NOCQUET, J. y VALLÉE, M. (2010). Slip distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37(17): 1 - 7.

FISCALÍA (2011). *Nomina de fallecidos y desaparecidos por el tsunami*. Disponible en línea: http://www.fiscaliadechile.cl/Fiscalia/sala_prensa/noticias_det.do?id=125 (fecha de última visita en enero de 2013).

FRITZ, H.; PETROFF, C.; CATALÁN, P.; CIENFUEGOS, R.; WINCKLER, P.; KALLIGERIS, N.; WEISS, R.; BARRIENTOS, S.; MENESES, G.; VALDERAS-BERMEJO, C.; EBELING, C.; PAPADOPOULOS, A.; CONTRERAS, M.; ALMAR, R.; DOMINGUEZ, J. y SYNOLAKIS, C. (2011). Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, N°168 (2011): 1989–2010.

GEDAN, K.B.; KIRWAN, M.L.; WOLANSKI, E.; BARBIER, E.B. Y SILLIMAN, B.R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm, *Climatic Change*, Vol. 106(1): 7 - 29.

GEER (2010). *Geo-engineering reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake*. GEO-ENGINEERING EXTREME EVENTS RECONNAISSANCE (GEER) ASSOCIATION. GEER Association Report N° GEER-022.

GONZALEZ, P.; ORTIZ, J.; JEREZ, R.; PAVEZ, N. y ARCOS, D. (2012). "Efectos del Tsunami 2010 en el Humedal del Río Mataquito". En FARIÑA, J.M. Y CAMAÑO, A. (editores): *Humedales costeros de Chile*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, pp: 351 - 389.

IMSA (2010). *Acta Concejo Municipal San Antonio, sesión ordinaria n° 07 (3 de marzo de 2010)*. Ilustre Municipalidad de San Antonio, 21 pp, disponible en línea: http://transparencia.sanantonio.cl/Lists/Actas%20de%20Concejo/Attachments/55/ActaSONo07_03-02-2010.pdf (fecha última visita en enero de 2013).

KANAMORI, H. (1978). Quantification of Earthquakes. *Nature*, vol. 271, n° 5644: 411 – 414.

LANGE, D.; TILMANN, F.; BARRIENTOS, S.; CONTRERAS-REYES, E.; METHE, P.; MORENO, M.; HEIT, B.; AGURTO, H.; BERNARD, P.; VILOTTE, J.P. y BECK, S. (2012). Aftershock seismicity of the 27 February 2010 Mw 8.8 Maule earthquake rupture zone. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 317-318: 413–425.

LAZCANO, A. y RETAMAL, E. (2011). *Diagnóstico ambiental en la zona costera del sector Lolleo, comuna de San Antonio, Chile, por efectos revelados del tsunami 2010*. Tesis para optar al título profesional de ingeniero ambiental. Universidad de Playa Ancha, Facultad de Ingeniería, departamento de Medio Ambiente. Valparaíso, 236pp.

LIRA, M. (1938). *San Antonio. Primer Congreso Sudamericano de Ingeniería*. Tomo II. Puertos en Playas de Arenas. Pág 228 – 232 y figuras en página 200. Imprenta Universitaria, Santiago de Chile.

LORITO, S.; ROMANO, F.; ATZORI, S.; TONG, X.; AVALLONE, A.; MCCLOSKEY, J.; COCCO, M.; BOSCHI, E. y PIATANESI, A. (2011). Limited overlap between the seismic gap and coseismic slip of the great 2010 Chile earthquake. *Nature Geoscience*, Vol. 4: 173 – 177.

MORALES, R. (2010). Terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010. Efectos urbanos en localidades de la provincia de Arauco. *Revista URBANO*, N° 22: 43 - 62.

PARARAS-CARAYANNIS, G. (2010). The Earthquake and Tsunami of 27 February 2010 in Chile – Evaluation of Source Mechanism and of Near and Far-field Tsunami Effects. *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 29, No. 2: 96 – 126.

POMAR, J. (1962). Cambios en los ríos y en la morfología de la costa de Chile. *Revista Chilena de Historia y Geografía*, N° 130: 318-356.

QUEZADA, J.; JAQUE, E.; BELMONTE, A.; FERNÁNDEZ, A.; VÁSQUEZ, D. y MARTÍNEZ, C. (2010). Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro – sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur*, N° 2: 11 – 45.

ROMERO, H.; FUENTES, C. y SMITH, P. (2010). Dimensiones geográficas territoriales, institucionales y sociales del terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, n° 19: 135-150.

URBINA, L. (2011). *Variación de los factores ambientales en las lagunas costeras de Lolleo, San Antonio – Chile, producto de tsunami del 27/2/2010*. Tesis para optar al título profesional de ingeniero ambiental. Universidad de Playa Ancha, Facultad de Ingeniería, departamento de Medio Ambiente. Valparaíso, 147 pp.

VARGAS, G.; FARIÁS, M.; CARRETIER, S.; TASSARA, A.; BAIZE, S. y MELNICK, D. (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 38 (1): 219-238.

WINCKLER, P.; REYES, M. y CONTRERAS, M. (2011). Recomendaciones de Diseño de obras Marítimas y terrestres sometidas a cargas de tsunamis. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, 123(1): 19 - 39.

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