

Research Article

El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central

**Patricio Winckler¹, Manuel Contreras-López², Rodrigo Campos-Caba³
José F. Beyá¹ & Mauricio Molina¹**

¹Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile

²Facultad de Ingeniería y Centro de Estudios Avanzados, Universidad de Playa Ancha
Viña del Mar, Chile

³Programa de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile
Corresponding author: Patricio Winckler (patricio.winckler@uv.cl)

RESUMEN. El temporal del 8 de Agosto de 2015 se caracterizó por la ocurrencia conjunta de condiciones meteo-oceanográficas que causaron la destrucción de infraestructura costera y edificaciones en varias localidades del litoral central de Chile. El oleaje extremo se sumó a rachas de vientos provenientes del noroeste y una mínima histórica de la presión atmosférica asociada al sistema frontal. La marea de origen astronómico -aun cuando no extrema- hizo su contribución para peraltar el nivel del mar sobre el cual las olas rompieron con violencia en el borde costero. Para estudiar el evento se procesaron: a) registros de 64 estaciones meteorológicas distribuidas en el sector costero de las regiones de Valparaíso y Coquimbo, b) registros de 6 estaciones mareográficas en Chile Central, c) pronósticos y registro de oleaje en aguas profundas, y d) un modelo de propagación de oleaje desde aguas profundas hacia los sectores más afectados de la región. A partir del análisis de estas variables se explican los daños observados en la infraestructura costera.

Palabras clave: registros de viento, oleaje, presión atmosférica, marea astronómica.

The storm of August 8, 2015 in the regions of Valparaíso and Coquimbo, Central Chile

ABSTRACT. A storm of August 8, 2015 was characterized by the joint occurrence of meteorological and oceanographic conditions that caused the destruction of coastal infrastructure and buildings in several localities of the central coast of Chile. The extreme swell was added to wind gusts coming from the northwest winds, and a historical minimum of atmospheric pressure. The tide of astronomical origin -although not extreme-, made its contribution to the sea level banking on which the waves broke violent on the coastal edge. In order to study the event, records of: a) 64 weather stations distributed in the coastal zone of Valparaíso and Coquimbo regions, b) six tide gauge stations, c) forecast and wave records in deep-waters, and d) a model of deep-water wave propagation towards the most affected sectors of the region, were processed. From the analysis of these variables, the observed damages in the coastal infrastructure are explained.

Keywords: wind records, waves, atmospheric pressure, storm surge.

INTRODUCCIÓN

El litoral de Chile central cumple un importante rol portuario, productivo y recreacional. Esta zona comprende los puertos de San Antonio, Valparaíso, Quintero y Coquimbo, numerosos asentamientos costeros, playas,

caletas de pesca artesanal y áreas de interés para la conservación de la biodiversidad. El litoral se caracteriza por un trazado general rectilíneo, con orientación norte-sur y tendencia al solevantamiento, producto de la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Las playas de arena o de rodados

son poco extensas y se limitan a bahías de bolsillo donde desembocan los ríos de Chile central (Paskoff, 2010).

El clima del oleaje en las costas de Chile continental está condicionado a vientos que, en términos medios, van de oeste a este entre 40°S y 60°S (Fuenzalida, 1983). Estas olas se propagan a lo largo del Océano Pacífico, llegando a la costa de Chile como mar de fondo o “swell” (Molina *et al.*, 2011). La zona central de Chile se encuentra relativamente alejada de la zona de generación principal, lo que explica que el oleaje incida desde el suroeste con escasa dispersión direccional, periodos relativamente largos y menores alturas en relación al extremo austral. Por otra parte, existen dos procesos mediante los cuales esta zona se ve afectada por temporales extremos: i) ciclones extra-tropicales asociados a sistemas frontales que generan oleaje local, y ii) vientos costeros de baja altura y carácter sinóptico, denominados surazos, que son más frecuentes e intensos durante primavera y verano (Beyá *et al.*, 2016a).

Agosto de 2015 se caracterizó por una serie de temporales que afectaron severamente la infraestructura de la costa central de Chile. El mes inició con un swell asociado a un sistema frontal en el extremo sur del Océano Pacífico. Dada la ubicación de la fuente de generación de oleaje, dicho evento alcanzó una intensidad máxima el 2 de agosto en Valparaíso, con dirección SW. La protección de accidentes geográficos como Punta Ángeles en Valparaíso, Península Los Molles en Quintero y Punta Tortuga en Coquimbo, redujo significativamente el impacto del oleaje en el territorio costero al sur de las bahías, y en menor grado al norte de ellas. Entre 5 y 6 de agosto surge un nuevo sistema frontal con vientos e intensas precipitaciones, que afectan moderadamente la zona central de Chile. Finalmente, la noche del 7 arriba un sistema frontal que se desarrolla hasta la tarde del 8 de agosto, durante el cual se registran presiones muy bajas, vientos fuertes y oleaje intenso. La combinación de estas variables, sumada a la exposición de bahías abiertas al oleaje proveniente del NW, como en Valparaíso y Quintero, causó daños en caletas y en el borde costero por un costo superior a los US\$7.2 millones, según una estimación de la Dirección de Obras Portuarias, DOP (diario El Mercurio de Valparaíso, 12 agosto 2015); cifra que no incluye los daños a infraestructura privada ni aquellos ocurridos en los recintos portuarios. De acuerdo a la ONEMI (2015), en la zona de Valparaíso el sistema frontal dejó un fallecido y 4.276 personas afectadas, con un total de 533 viviendas con daños de diversa consideración. En la zona de Coquimbo, el temporal cobró una vida, dejando 54.087 personas

afectadas y un total de 2.002 viviendas dañadas. En otras regiones se registraron cuatro fallecidos.

El objetivo de este trabajo es realizar el análisis de las variables físicas (presión atmosférica, viento, oleaje y marea), que permitan explicar el nivel de daño generado por el temporal del 8 de agosto en la zona de Valparaíso. Como complemento a este análisis, se discuten antecedentes históricos cuyo objetivo es demostrar que el nivel de vulnerabilidad de los asentamientos costeros persiste en el tiempo a pesar de la ocurrencia de eventos extremos como éste.

Al respecto, no existe consenso en la literatura sobre la definición de los términos marejada y temporal (Puelma *et al.*, 2016), por lo que en este texto se utilizan ambos indistintamente para referirse a condiciones extremas de oleaje asociadas al evento del 8 de agosto. Por ejemplo, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), define una marejada como una “ola larga ocasionada generalmente por una tormenta lejana; tienen por lo común varios centenares de metros de longitud” Asimismo, define a un temporal como uno de los niveles de la escala Beaufort del viento (SHOA, 2002). El término “estado de mar” (UKMO, 2010) -que corresponde a un intervalo de tiempo donde las propiedades del oleaje se asumen regidas por un proceso estacionario y ergódico, es de uso común en ingeniería. Si bien esta definición es exacta, no es suficiente para caracterizar un evento donde el daño se asocia a la ocurrencia conjunta de diferentes variables meteo-oceanográficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de daños

Entre agosto y noviembre de 2015 se efectuó una serie de visitas a diversas localidades de Valparaíso y Coquimbo (Fig. 1), para registrar los daños, medir efectos sobre las playas y entrevistar a testigos. Entre el 8 y 10 de agosto se efectuaron levantamientos en las comunas de Valparaíso, Viña del Mar y Concón, que fueron las más afectadas por el paso del temporal. El 11 de agosto se visitó la Bahía de Quintero, donde se observaron daños menores, y el 12 de septiembre se inspeccionó la Playa El Convento y la Reserva Nacional El Yali, al sur de San Antonio. Entre el 17 de septiembre y 14 de noviembre, como parte de un levantamiento para medir los efectos del tsunami del 16 de septiembre (Contreras-López *et al.*, 2016), se efectuó una serie de visitas entre la Reserva Nacional El Yali (33,7°S; 71,73°W) por el sur, y Bahía Carrizalillo (29,11°S; 71,46°W) por el norte. Durante estas visitas se realizaron mediciones y entrevistas a testigos siguiendo la guía de campo de la UNESCO

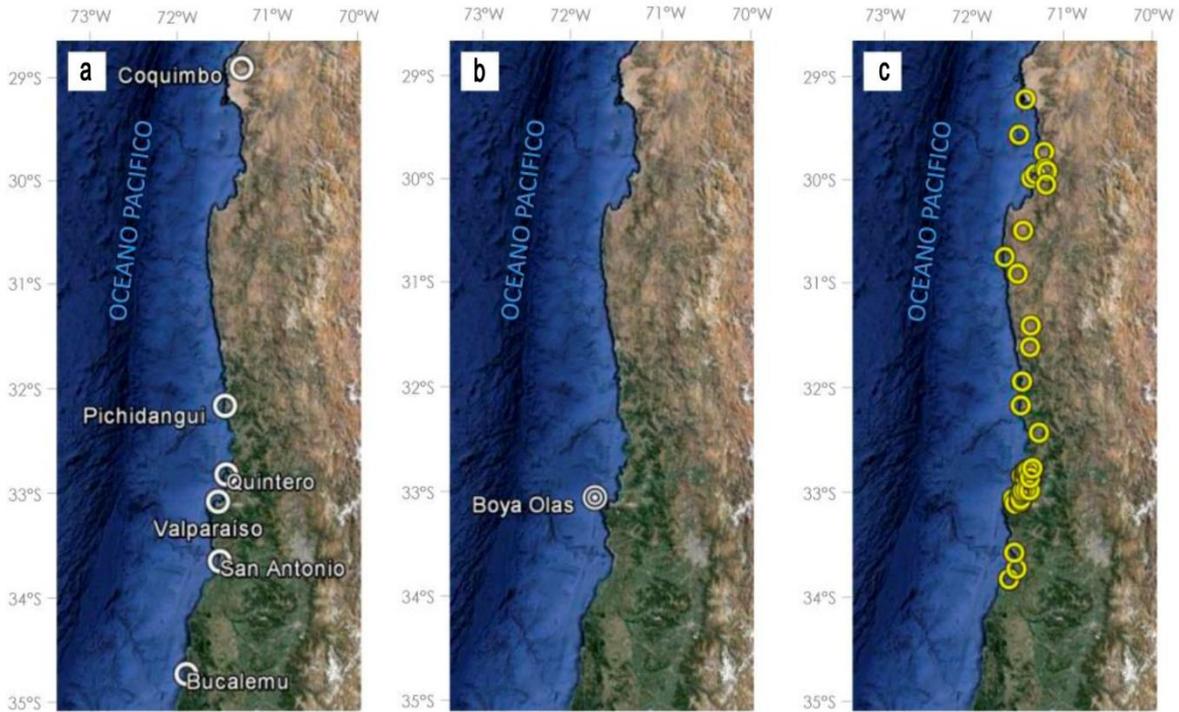


Figura 1. Ubicación de a) estaciones mareográficas del SHOA, b) boya Watchkeeper del SHOA, y c) estaciones meteorológicas.

(Dominey-Howes *et al.*, 2014), donde se pudo constatar que algunos sectores afectados por el tsunami experimentaron también una inundación relevante debido al temporal del 8 de agosto (Winckler *et al.*, 2015; Contreras-López *et al.*, 2016). Por último, se revisaron antecedentes de la prensa escrita y abundantes fuentes de información de carácter no científico.

Análisis de las variables físicas

Se efectuó el análisis de datos de presión atmosférica, viento, nivel del mar y oleaje obtenidos en estaciones meteorológicas y oceanográficas ubicadas en Coquimbo y Valparaíso (Fig. 1).

Se obtuvieron datos de presión atmosférica y viento en estaciones meteorológicas costeras disponibles en el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire del Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2015), en la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC, 2016) y en la red de estaciones meteorológicas del Centro de Estudios Avanzados de Zonas Áridas (CEAZA, 2012). También se reunieron datos de estaciones meteorológicas pertenecientes a universidades e instituciones privadas, del total de registros disponibles, se analizaron los datos de 64 estaciones costeras (Fig. 1a, Anexo 1).

Se realizó un control de calidad a todas las series de tiempo de presión atmosférica y viento, estandarizando

zándolas mediante un muestreo cada una hora. Los registros fueron referidos a la hora local y ordenados de acuerdo a su latitud sur a norte. Las series fueron analizadas entre las 0:00 h del 1 de agosto y 23:00 h del 12 agosto 2015, para abarcar los dos temporales menores ocurridos durante los primeros días del mes. Los datos de presión atmosférica fueron complementados con el análisis de las cartas sinópticas comprendidas entre el 7 y 8 agosto 2015 (Fig. 2), disponibles en la Dirección General de Aeronáutica Civil de la Dirección Meteorológica de Chile.

Para cada estación, los registros fueron normalizados respecto al mayor registro en el intervalo de análisis, de modo de visualizar de mejor manera la forma de las series.

Para contar con registros de vientos comparables, los valores de rapidez fueron referidos al viento a 10 msnm, v_{10} , usando la ley potencial propuesta por Terrero *et al.* (2014);

$$\frac{v_{10}}{v_z} = \frac{\ln(z) - \ln(z_0)}{\ln(10) - \ln(z_0)},$$

donde z_0 depende del tipo de superficie en el entorno de la estación (10^0 si se trata de un poblado, 10^{-1} en áreas verdes, 10^{-2} en un aeródromo, 3×10^{-3} en arena y 10^{-3} en un cuerpo de agua) y v_z es la velocidad a una altura. El factor de corrección z_0 se incluye para cada estación en el Anexo 1.

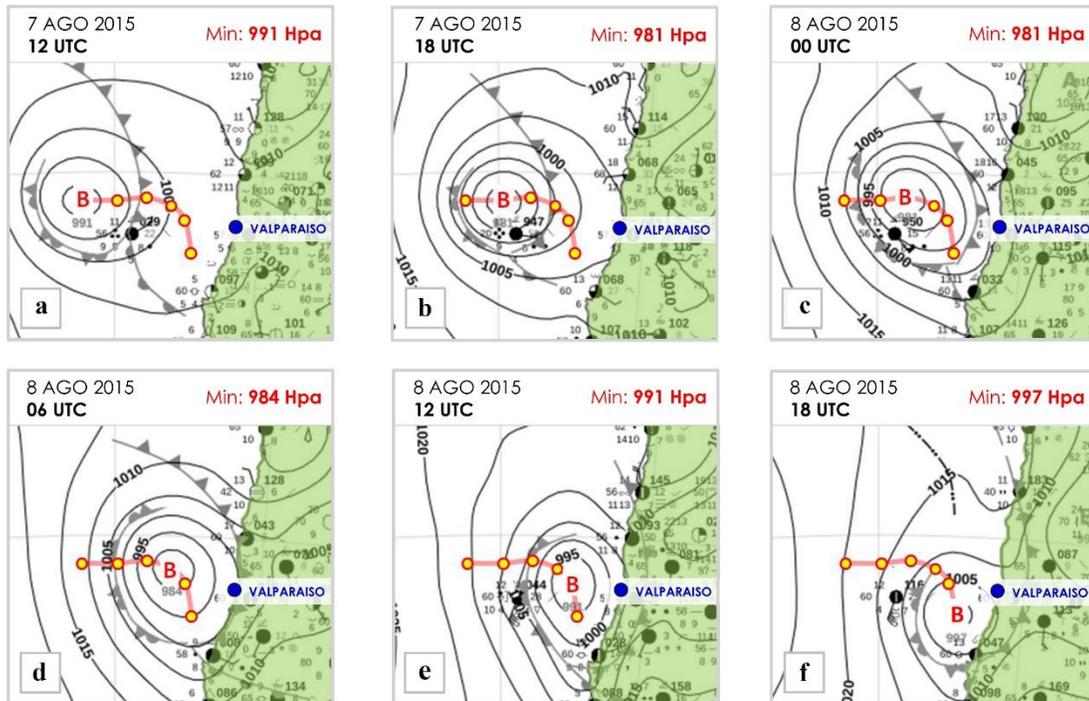


Figura 2. Cartas sinópticas comprendidas entre a) el 7 de agosto a las 12 UTC y f) el 8 de agosto de 2015 a las 18 UTC, adaptadas de DGAC (2016). En círculos amarillos y línea roja se ilustra la trayectoria de la presión atmosférica mínima para los 6 instantes. Las líneas negras representan las isóbaras, en Hpa. El frente frío (cálido) se señala en línea gris dentada (bordeada de semicírculos). En verde se muestra el continente.

Se usaron los datos de nivel del mar registrados mediante sensores de presión cada un minuto en los mareógrafos de Bucalemu, San Antonio, Valparaíso, Quintero, Pichidangui y Coquimbo (Fig. 1c). Estos registros, disponibles originalmente en el sitio del Sea Level Station Monitoring Facility (IOC-UNESCO, 2016), fueron sometidos a un control de calidad y luego proporcionados a estos autores por el Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENHDOC) del SHOA. Como en Valparaíso la serie de nivel del mar presentaba datos faltantes, en este trabajo se reconstituyó la serie mediante un *proxy* con el sensor de radar y los registros denominados Valparaíso 2 y Valparaíso 3, según se presenta en el Anexo 2. Las series de tiempo fueron re-muestreadas cada una hora, obteniendo registros medios horarios referidos a la hora local de las cinco localidades. Al utilizar valores re-muestreados cada hora, se excluyen del análisis las variaciones de alta frecuencia en el nivel del mar asociadas a fluctuaciones rápidas del viento y la presión atmosférica, denominadas meteotsunamis (e.g., Vilibić *et al.*, 2014).

A modo de síntesis, el análisis se centró en la estación de Valparaíso, por estar ubicada en la zona de mayor daño en la infraestructura costera. La Figura 3a

muestra el registro reconstruido del mareógrafo y la marea meteorológica (o residuo meteorológico) obtenida a partir de un filtro pasa-bajo para eliminar la marea astronómica (Godin, 1972).

El estudio de oleaje se orientó a correlacionar sus parámetros representativos con el tipo de daño en las bahías de Quintero, Valparaíso y San Antonio.

Con objeto de evaluar estos parámetros en la zona costera, se recurrió a registros de oleaje en aguas profundas, no perturbados por efectos del fondo, efectuándose una propagación espectral mediante el modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999; Ris *et al.*, 1999) durante el estado de mar más crítico ocurrido durante el temporal. Asimismo, se efectuó un análisis de valores extremos en aguas profundas a partir de diversas fuentes de datos disponibles en la actualidad, con el objeto de calcular el período de retorno de la altura significativa del evento del 8 agosto 2015.

Los registros de oleaje con una resolución temporal de 3 horas se obtuvieron de la boya Watchkeeper del SHOA (32°59'11"S, 71°49'18"W, Fig. 1b), que se encuentra instalada a ~10 km al oeste de Punta Ángeles y a 480 m de profundidad, que garantiza que períodos inferiores a 24 s no se encuentran alterados por efectos de fondo.

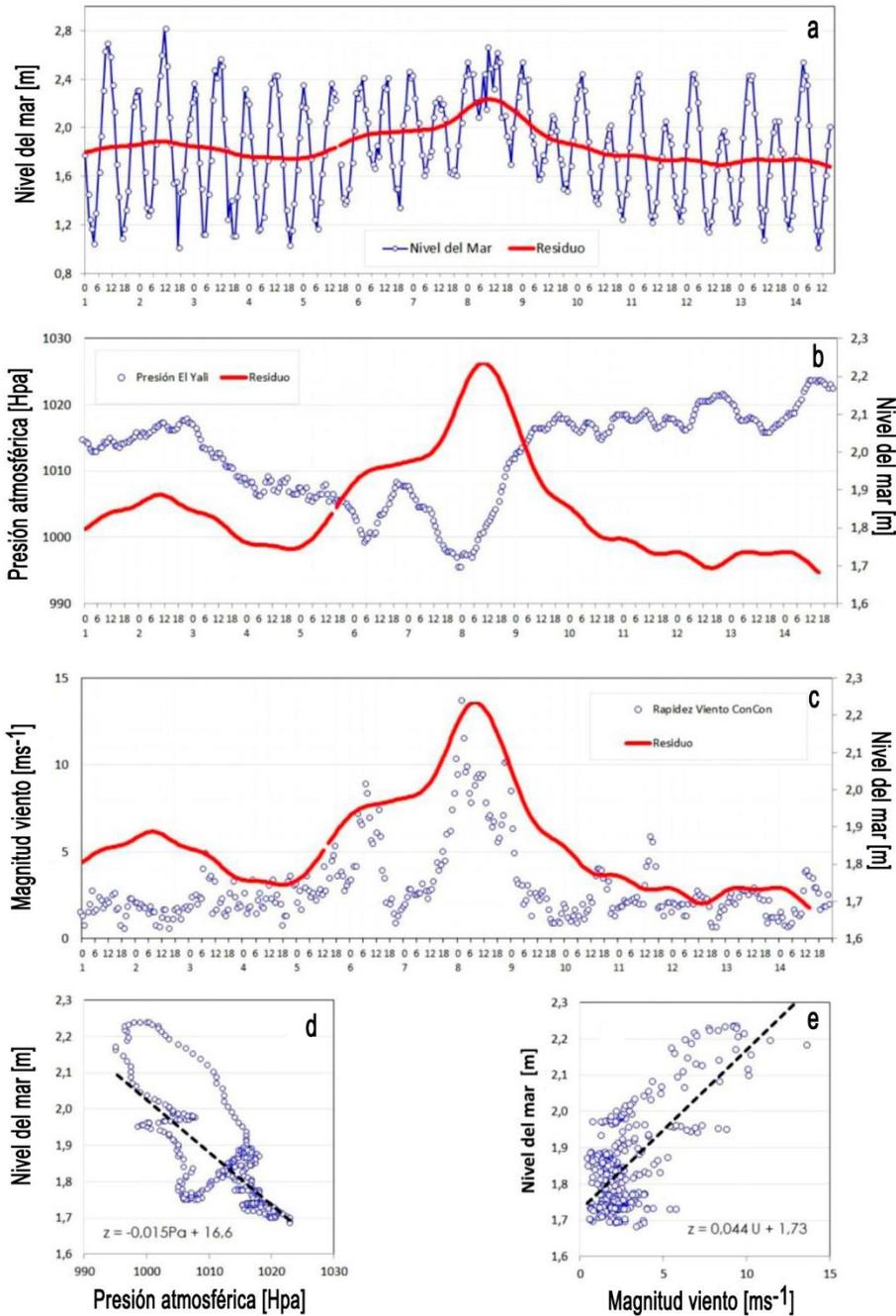


Figura 3. Variables meteoceanográficas para el temporal del 8 de agosto de 2015. a) Registro del nivel del mar y la marea meteorológica en Valparaíso, b) marea meteorológica versus presión atmosférica en El Yali, c) marea meteorológica versus rapidez del viento en Concón, d) correlación entre la marea meteorológica y la presión atmosférica, y e) correlación entre la marea meteorológica y la rapidez del viento.

Para establecer el período de retorno de este evento, se analizaron las bases de datos de oleaje de largo plazo de libre disposición que provienen de los modelos numéricos globales ERA Interim (Dee *et al.*, 2011), NOAA-WW3 (Tolman, 2014), NOAA-CFSR (Saha *et al.*, 2010) e IFREMER Arduin *et al.*, 2011. Cabe mencionar que NOAA-CFSR es una base de datos de oleaje

obtenida a partir de WW3, con forzamiento de vientos reanalizados CFSR, en tanto que NOAA-WW3 es una base de datos compuesta de las salidas del modelo operacional WW3. Además, se utilizó la base de datos FUGRO-OCEANOR obtenida de un proyecto de investigación orientado a la evaluación del recurso energético asociado a oleaje (CORFO-INNOVA 09CN14-5718)

Tabla 1. Información sobre bases de datos de oleaje y del método de análisis de valores extremos sobre un umbral aplicado a éstas. En todos los ajustes, la mejor distribución de valores extremos corresponde a Weibull, con el parámetro k . R^2 corresponde al coeficiente de determinación del mejor ajuste. 1) Para la base de datos FUGRO-OCEANOR, sólo se contó con datos en cuatro puntos. Se desconoce la resolución de la versión del modelo numérico utilizado.

Base de datos	Inicio	Término	Resolución	k	R^2	Umbral [m]	N° datos	Probabilidad excedencia
FUGRO-OCEANOR	1989-09-09	2013-09-30	4 puntos ⁽¹⁾	1,0	0,99	5,75	70296	$2,86 \times 10^{-4}$
ERA Interim	1979-01-01	2014-12-31	$0,78^\circ \times 0,78^\circ$	1,4	0,99	4,99	52592	$3,81 \times 10^{-4}$
IFREMER	1990-01-01	2014-12-31	$0,5^\circ \times 0,5^\circ$	1,4	0,98	4,81	73040	$2,74 \times 10^{-4}$
NOAA CFSR	1979-01-01	2010-12-31	$0,5^\circ \times 0,5^\circ$	1,4	0,94	5,48	93496	$2,14 \times 10^{-4}$
NOAA WW3	1997-01-01	2010-12-31	$1,25^\circ$ y 1°	1,0	0,93	4,83	40896	$4,91 \times 10^{-4}$
DOP	1980	2013	-	-	-	-	70296	$2,86 \times 10^{-4}$

y una serie de valores extremos anuales proporcionada por la Dirección de Obras Públicas (DOP), utilizada ampliamente en diseño de obras marítimas en Chile. Se efectuó un análisis de valores extremos mediante el método de máximos sobre el umbral (Goda, 1988), cuyo umbral se definió para seleccionar un máximo de 20 eventos por sitio, con una independencia de a lo menos cuatro días de diferencia entre eventos sucesivos. Luego, se probaron distribuciones de probabilidad para valores extremos (Weibull, Gumbel, Frechet y Log-Normal) y se escogió la de mejor ajuste. La Tabla 1 muestra información de los ajustes, además del análisis de la DOP que se basa en el método de los máximos anuales.

Para establecer las características de oleaje en la costa se efectuó una propagación del estado de mar extremo mediante el modelo SWAN, que resuelve las ecuaciones de balance de acción (Booij *et al.*, 1999; Ris *et al.*, 1999). Este modelo permite caracterizar los procesos de asomeramiento, refracción y rotura, pero no resuelve en forma adecuada la difracción y reflexión generadas por obras marítimas y accidentes geográficos abruptos. Por esta razón, y debido también a la escasa información batimétrica disponible en la zona costera, los resultados obtenidos son representativos de profundidades superiores a 10 m y lejos de bordes costeros rocosos.

La malla batimétrica utilizada en el modelo de propagación se generó a partir de las cartas náuticas del SHOA (4000, 4320, 4321, 4322, 5000, 5100, 5111, 5115) mediante interpolación con el método Triangulación de Delaunay. Se utilizaron tres grillas numéricas con elementos de resolución 200×200 , 50×50 y 10×10 m, disminuyendo en tamaño hacia la costa y en las bahías donde se registraron los mayores daños (Quintero, Valparaíso y San Antonio). La condición de borde en aguas profundas se definió a partir del espectro registrado por la boya Watchkeeper durante el *peak* del temporal. Esta condición se asumió

como representativa de aguas profundas frente a las tres bahías de interés, lo que se observó en las condiciones del borde homogéneas en el límite exterior del modelo. El espectro se discretizó en 127 frecuencias comprendidas entre 0,005 y 0,64 Hz, con un intervalo de 0,005 Hz, y 120 direcciones cubriendo de 0° a 360° , cada 3° . Las modelaciones se realizaron en modo estacionario, incluyendo los efectos de disipación del oleaje por *whitecapping*, rotura y fricción. Se efectuaron modelaciones preliminares con el objeto de evaluar la sensibilidad del modelo al nivel de marea, usando valores entre 0 y +1,8 m NRS; este último valor corresponde a la envolvente superior de combinación entre marea astronómica y meteorológica el 8 agosto 2015.

RESULTADOS

Borde costero de San Antonio al sur

En la Playa El Convento, ubicada en la Reserva Nacional El Yali (Fig. 4a), la anteduna costera fue completamente sobrepasada y erosionada por el oleaje, alcanzando la laguna costera e ingresando unos 300 m sobre la línea de más alta marea. Esto fue grabado por una cámara trampa que muestra cómo a partir de la mañana del 8 agosto 2015, el mar comienza paulatinamente a ascender (Figs. 4b-4c).

Más al norte, en el Puerto de San Antonio, no se registraron daños relevantes en la infraestructura portuaria, de acuerdo al Departamento de Coordinación de Ingeniería de la Empresa Portuaria de San Antonio (J. Aldunate-Rivera, *com. pers.*).

Borde costero de Valparaíso

En la zona portuaria se observó un sobrepaso intenso en el sector Costanera (Fig. 5a-5b), causando el desplazamiento de contenedores y la pérdida de equipamiento menor. No se registraron daños mayores a los muros marginales, de carácter gravitacional. El sobrepaso tam-

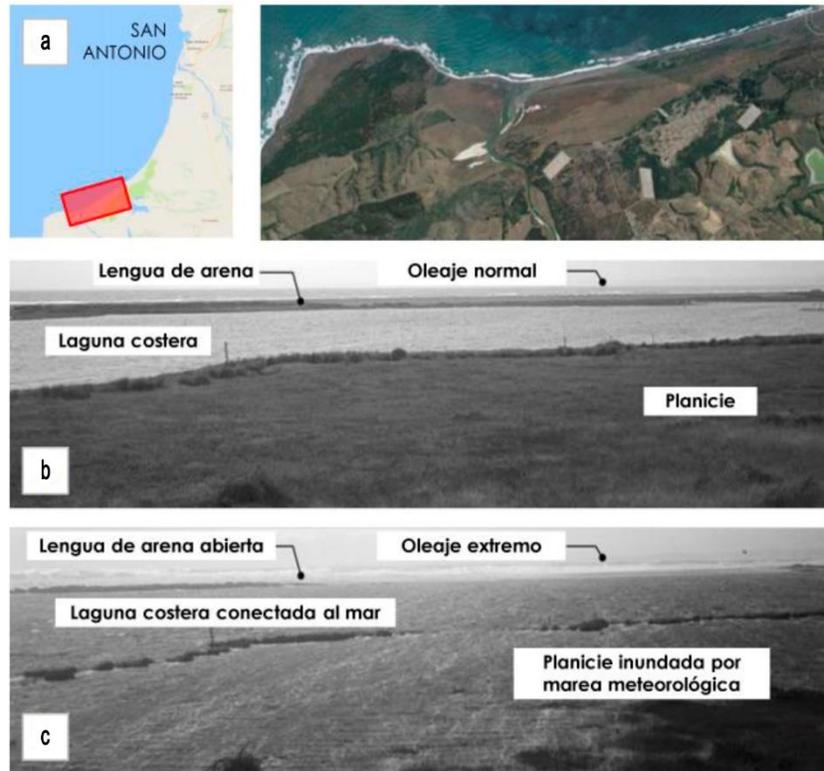


Figura 4. Reserva Nacional El Yali. a) mapa de ubicación, b) cámara apuntando al NW el 3 mayo 2015, y c) cámara apuntando al NW el 8 agosto 2015 (adaptada de Contreras-López *et al.*, 2016).

bién fue importante en el arranque del molo de abrigo del Puerto de Valparaíso (Fig. 5c), causando el fallo de los mareógrafos del SHOA ubicados en la parte interior del codo de la obra. En los últimos 240 m del extremo del molo se registró un sobrepaso significativo debido a que ese tramo no cuenta con un parapeto, como el resto del molo. En Avenida Altamirano, entre Playa San Mateo y Caleta El Membrillo (Fig. 5d), el oleaje causó daños severos a varios laboratorios en la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. En Avenida Altamirano se generó una socavación de 140 m², con una extensión de 15 a 20 m cuya reparación implicó una inversión de US\$443.000 en 2015 (Proyecto BIP 30098003-0 de la DOP). En general, los daños a la infraestructura portuaria en este sector son menores, a excepción de una fisura en el codo de molo del puerto de Valparaíso cuya extensión se desconoce y que debiera ser estudiada. En el centro de eventos ubicado en el cabezo el Muelle Barón se registraron destrozos en los ventanales, debido al sobrepaso.

La Figura 6 ilustra los efectos del temporal en el tramo de costa que abarca desde el Muelle Barón hasta Caleta Portales, en una longitud de ~1.700 m. El Paseo Wheelwright, construido entre los años 2005-2008 con

una inversión de más de US\$2.87, perdió prácticamente toda la terraza (Fig. 6b) y sufrió daños en sombraderos, escaños y luminarias. Las pérdidas ascienden a US\$604.000) según la evaluación de la DOP (diario El Mercurio). La Playa Placeres, ubicada al pie del Paseo Wheelwright, experimentó un descenso de 2,8-4,5 m, un retroceso de 18-22 m y la remoción de 35.000 m³ de la zona expuesta de la playa, según se desprende de mediciones *in situ* (Molina *et al.*, 2015) y de la comparación de la playa antes y después del temporal (Figs. 6c-6d).

En Caleta Portales hubo daños en el muelle nuevo, inaugurado en 2005, y en la edificación principal que acoge 128 boxes, 18 puestos de venta y 5 restaurantes. (Fig. 7a). El daño en el muelle se produjo por las cargas de impacto del oleaje actuando sobre la superestructura (Fig. 7b). Como consecuencia, cinco losas fueron removidas y dos completamente dañadas en la unión perimetral con las vigas (Fig. 7c). Se observaron asimismo arrostramientos y vigas transversales deflecionadas. La reparación de las obras en la caleta alcanzó a US\$624.000 en 2015 (Proyecto BIP 30098003-0, DOP). En la Playa Portales, el fuerte oleaje fue responsable del retroceso de la línea de costa del orden de 20 m, descensos verticales de 3 m por el norte a

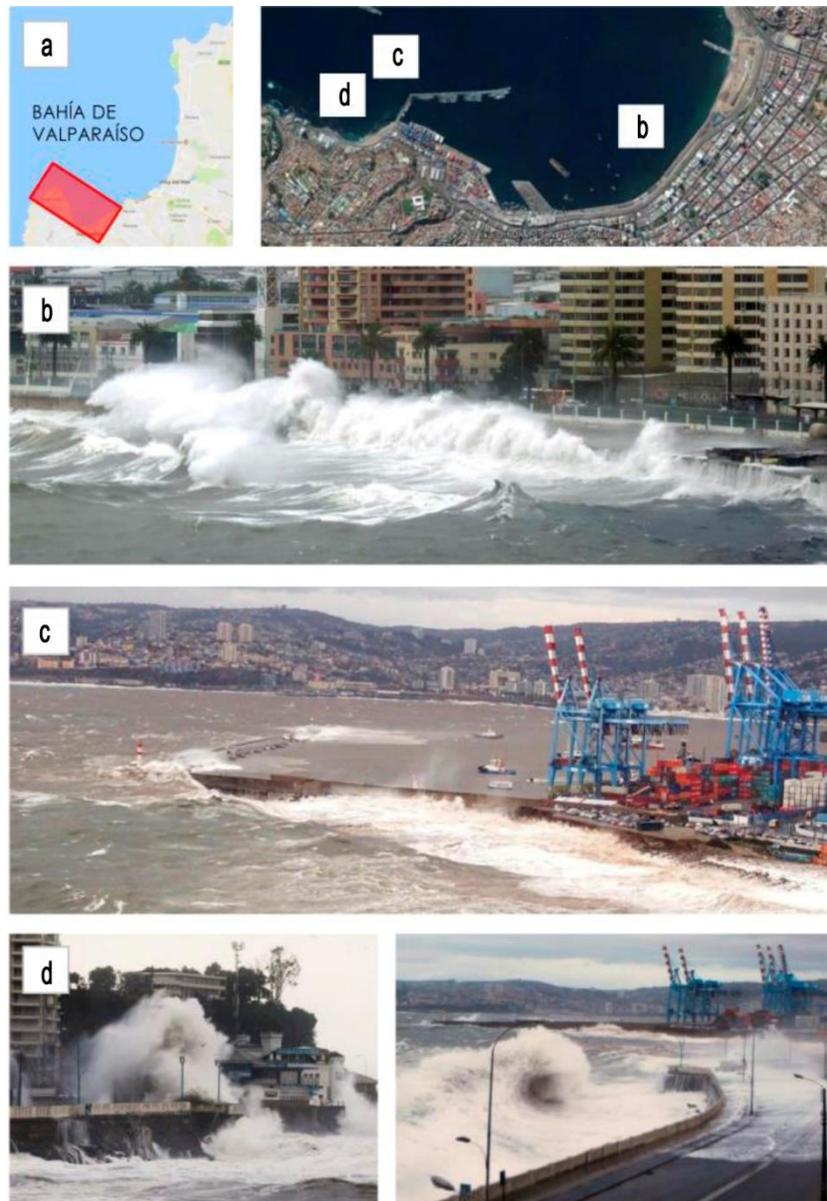


Figura 5. Sector recinto portuario, Valparaíso. a) mapa de ubicación, b) sector Costanera, c) Playa San Mateo, y d) Avenida Altamirano.

4 m por el sur de la playa, con una erosión de 38.510 m³.

Debido a la nula protección al oleaje proveniente desde el NW, las obras de defensa costera y las edificaciones ubicadas en el sector comprendido entre el Paseo Juan de Saavedra y la Curva de los Mayos fueron las más afectadas por el temporal. El sobrepaso generó el arrastre de más de 2.000 m³ de escombros en la vía férrea del Metro de Valparaíso, Merval alcanzando incluso la Avenida España, donde la barrera central fue desplazada del eje central de la calzada (Figs. 8a-8b). El oleaje causó el desplazamiento de los tetrápodos y la pérdida del material de relleno que da

soporte al Paseo Juan de Saavedra (Fig. 8c). Luego del temporal se observó la socavación generalizada de la defensa, causada por el desplazamiento de los tetrápodos y pérdida del material de relleno.

Las instalaciones del Centro de ex-Cadetes y Oficiales de la Armada, “El Caleuche”, fueron completamente destruidas (Fig. 8d), con pérdidas estimadas del orden de US\$863.000, de acuerdo a su Brigadier Mayor (H. Winckler, *com. pers.*). El daño se debió a la socavación de la subestructura sobre la cual se ubican los edificios y al sobrepaso de agua por sobre el roquerío donde se encuentra el Faro. La casa de yates de la Escuela Naval, colindante a El Caleuche experi-

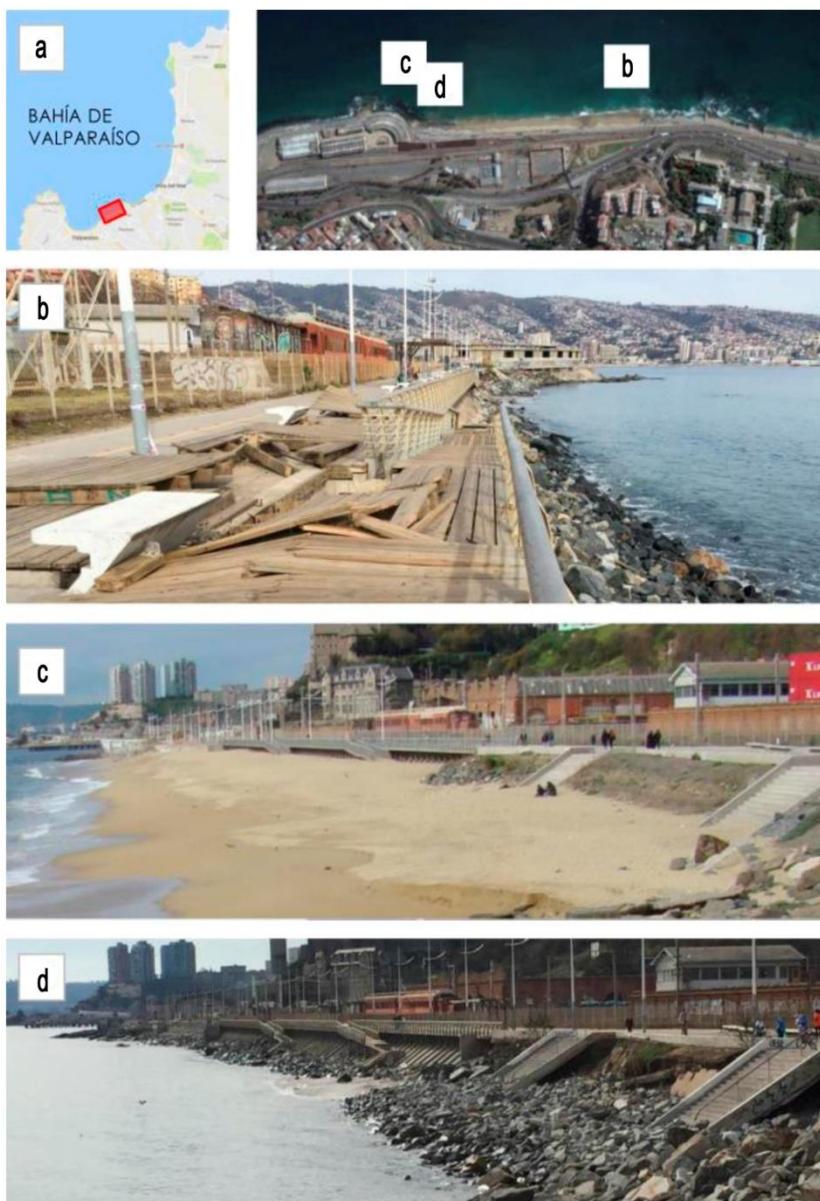


Figura 6. Sector Paseo Wheelwright, Valparaíso. a) mapa de ubicación, b) Paseo Wheelwright, c) Playa Yolanda antes del temporal, y d) Playa Yolanda después del temporal.

mentó daños menores debido a la mayor distancia a la zona de impacto (Fig. 9).

Las sedes de la Hermandad de la Costa y del Círculo de Submarinistas, emplazadas sobre terrenos ganados al mar, resultaron completamente destruidas (Fig. 9b). La recuperación de la primera edificación alcanzaría US\$143.000 (El Mercurio de Valparaíso, 22 agosto 2015), valor que no considera la restitución de la defensa costera que albergaba ambas instalaciones. Esta defensa costera de 260 m de longitud, estaba constituida por un muro gravitacional de sección trapezoidal y una protección de tetrápodos al pie, que

ya presentaba efectos de socavación antes de este temporal. Aparentemente, el muro, tetrápodos y otros elementos voluminosos hallados en el terreno no se concibieron como una sola obra, sino que provienen de una serie de actuaciones progresivas en el tiempo, que no garantizaban un adecuado desempeño.

En el Club de Yates de Recreo se hundió una embarcación, la piscina fue completamente destruida y el Club House experimentó daño parcial, alcanzando pérdidas del orden de US\$ 3 millones (D. Schiappacasse, *com. pers.*). El material de relleno de las explanadas y algunos elementos de protección de hasta 10 ton que

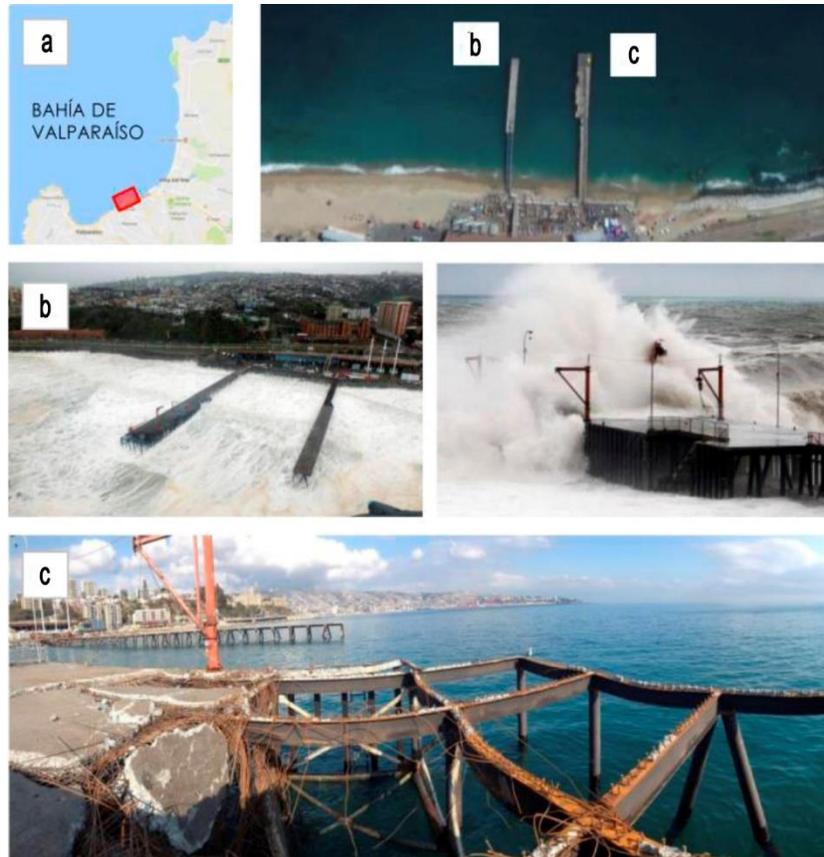


Figura 7. Sector Caleta Portales, Valparaíso. a) mapa de ubicación, b) muelles en Caleta Portales durante el temporal, y c) daños en la losa del muelle nuevo de Caleta Portales.

sustentaban a la Hermandad de la Costa y del Círculo de Submarinistas fueron desplazados ~300 m hacia el este, alcanzando el rompeolas del club y formando una playa en un sector donde previo al temporal habían varios metros de profundidad (Fig. 9c). El material más fino arrastrado por las corrientes litorales ingresó a la dársena, reduciendo sustancialmente su calado. El núcleo del rompeolas resultó colmatado, disminuyendo su porosidad y por ende su eficiencia a disipar la energía. En el talud expuesto al oleaje se formó una playa, en tanto que bloques del orden de 40 ton ubicados en el cabezo fueron desplazados hacia la entrada de la dársena (Fig. 9d).

Borde costero de Viña del Mar

En la Playa Caleta Abarca la erosión se presentó con mayor magnitud hacia el norte de la playa, dejando al descubierto los cimientos del antiguo muelle. El descenso vertical medido *in situ* fue de 3,8 m, disminuyendo en magnitud hacia el sur a valores entre 3 y 2 m. El retroceso horizontal fue mayor hacia el norte, con valores cercanos a los 25 m, bajando progresivamente hasta llegar a un mínimo cercano a 5 m en el

extremo sur. El volumen total erosionado se estimó en 31.000 m³.

En el sector comprendido ente Recreo y la desembocadura del Estero Marga Marga se registraron daños comparables a los observados en temporales anteriores. En la Avenida Marina se registró un socavón cuya reposición implicó una inversión de US\$187.000 en 2015 (Proyecto BIP 30098003-0, DOP). El subsuelo del Hotel Sheraton Miramar quedó completamente inundado debido a su baja cota. En la Avenida Perú se registraron pérdidas debidas al sobrepaso (Fig. 10). A partir de las 10:00 h del 8 de agosto, el oleaje comenzó a inundar departamentos y calles aledañas incluso hasta la Avenida San Martín, arrastrando vehículos, destrozando el restaurant Tierra del Fuego y causando daños menores al restaurant Chez Gerald.

Debido a la masiva remoción de arenas, en la Playa Acapulco se perdió una pasarela de madera que conectaba Avenida Perú y el Muelle Vergara. En la Playa El Sol, ubicada entre el Muelle Vergara y el ex Sanatorio Marítimo (calle 15 Norte), el lecho arenoso descendió entre 3 y 5 m, destruyendo 350 m de paseo costero que no contaban con defensa costera (Fig. 10c).



Figura 8. Sector entre Caleta Portales y Curva de los Mayos, Viña del Mar. a) mapa de ubicación, b) sector Curva de los Mayos durante el temporal, c) defensa costera destruida en Paseo Juan de Saavedra, y d) edificaciones destruidas en las instalaciones de El Caleuche.

Hacia el norte, en la denominada recta Las Salinas, el temporal destruyó muros de contención, mobiliario urbano, alumbrado y dos kioscos (Fig. 10d). En playas ubicadas al norte, como Las Salinas y Reñaca no se registraron daños.

Borde costero de Concón

Como consecuencia del temporal, el camino costero entre Reñaca y Concón mostró signos de sobrepaso y socavación puntuales. Se registraron pérdidas impor-

tantes en las obras del Club de Yates de Higerillas (Fig. 11), en tanto que la caleta de pescadores colindante no experimentó daños de infraestructura.

Cuatro embarcaciones resultaron hundidas, una quinta destruido y se produjo el deceso de un arquitecto al intentar rescatar su embarcación. Los muelles flotantes ubicados en la dársena exterior de la marina fueron destruidos y una grúa para el izado de embarcaciones resultó dañada. El rompeolas exterior experimentó el fallo de su coraza exterior en 40 m en el



Figura 9. Sector de la Curva de los Mayos, Viña del Mar. a) mapa de ubicación, b) defensa costera destruida con el temporal, c) acumulación de arena en el rompeolas del Club de Yates de Recreo, y d) daños en el cabezo del Club de Yates de Recreo.

tramo central, desprendimiento de rocas en su arranque y daño parcial en el cabezo. La losa del coronamiento resultó completamente destruida. El gerente del Club, estimó las pérdidas en US\$11.124 (J.L. Biotti, *com. pers.*). El Hotel Radisson, ubicado al norte de la bahía de Concón, resultó con daños en su planta baja.

La Playa la Boca fue afectada por erosión importante y se evidenció sobrepaso en los estacionamientos. Material de 50 mm de diámetro medio y de canto redondeado se depositó a lo largo de toda la playa.

Borde costero de Quintero

La Bahía de Quintero experimentó impactos moderados debido a su configuración relativamente protegida por la presencia de Punta Ventanilla por el norte y la península Los Molles, donde se emplaza la

ciudad de Quintero, por el sur. El sector afectado corresponde a la zona de playa en el tramo más expuesto al oleaje, que abarca aproximadamente desde Loncura al sur del Puerto de Ventanas. En este tramo se observó una socavación del terraplén que subtiende al camino costero y varias tuberías expuestas y dañadas. Tanto en el borde costero de Quintero, ubicado al interior de la bahía, como en Ventanas no se registraron daños. En el balneario de Maitencillo, la Playa Grande fue erosionada y la Avenida Costanera experimentó sobrepaso, inundándose varios restaurantes.

Región de Coquimbo

Los pescadores artesanales en Los Molles y Puerto Manso afirman que la marejada fue más intensa que el tsunami que ocurrió el 16 de septiembre, testimonio que se repite en la mayoría de las caletas de pescadores

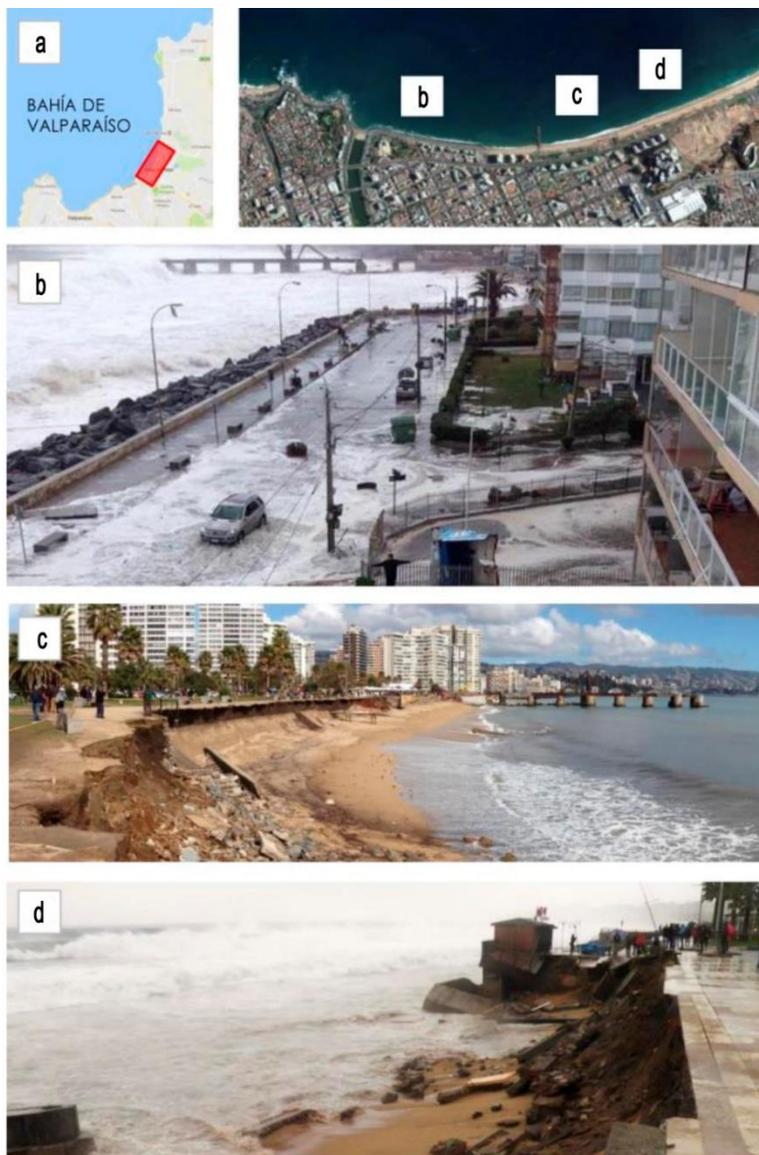


Figura 10. Sector Avenida Perú y recta Las Salinas, Viña del Mar. a) mapa de ubicación, b) sobrepaso en Avenida Perú, c) Playa Acapulco después del temporal, y d) Playa Los Marineros durante el temporal.

hasta Coquimbo. De acuerdo a la información proporcionada por los testigos, los runup de la marejada superaron los 3 m. Sólo en las inmediaciones de Caleta Talcura al sur de Punta Lengua de Vaca, los testigos afirmaron que el tsunami fue más importante que la marejada. En La Serena, el mar se salió decenas de metros en el sector del Faro Monumental. Gran parte de la playa frente a la Avenida del Mar fue arrasada, destruyendo locales comerciales, infraestructura costera e instalaciones pesqueras artesanales. La Caleta Peñuelas, en el límite entre Coquimbo y La Serena, fue también afectada y su conservación implicó un gasto de US\$608.000 (Proyecto BIP 30098003-0, DOP).

Presión atmosférica

La Figura 12a muestra la serie de tiempo horaria de presión atmosférica en 30 estaciones costeras, donde se han destacado cuatro de ellas. Se apreciaron inestabilidades durante los días 4 y 5 que corresponden al sistema frontal del 3 agosto 2015. El día 6 se pudo apreciar un descenso de la presión atmosférica en algunas estaciones del sector sur de la región de Valparaíso (*e.g.*, El Yali, Las Cruces, Montemar), que no se apreció en las estaciones emplazadas en la región de Coquimbo (*e.g.*, Universidad Católica del Norte (UCN), en Guayacán). Entre las últimas horas del 7 y primeras horas del 8 de agosto, se apreció un abrupto



Figura 11. Sector Higuerrillas, Concón. a) mapa de ubicación, y b) sobrepaso en rompeolas del Club de Yates de Higuerrillas.

descenso de la presión atmosférica, que correspondió al registro más bajo de toda la estadística histórica en la mayoría de las estaciones.

Viento

La Figura 12b muestra el registro de la velocidad del viento medio horario en 38 estaciones meteorológicas, donde se han destacado cuatro de ellas. Se aprecia que el día 8 las estaciones cercanas a Valparaíso (*e.g.*, Montemar) registraron vientos de hasta 37 m s^{-1} , mientras que estaciones al norte (*e.g.*, UCN Guayacán) y sur (*e.g.*, El Yali, Las Cruces) los vientos fueron menores. En estaciones localizadas al sur de la región de Valparaíso se encuentran magnitudes que superaron 25 m s^{-1} aun en horas de la tarde del 8 de agosto. Debido a que estos registros fueron realizados durante el paso de un sistema frontal, la dirección del viento experimentó severas variaciones, rolando entre NNW-S, cuyo análisis escapa a los propósitos de este trabajo.

Nivel del mar

La marea meteorológica alcanzó valores de 0,3 a 0,4 m, que son comparables con los niveles de marea astronómica predicha en las tablas de marea (SHOA, 2014) para la mañana del 8 de agosto, que corresponden a una pleamar de +1,42 m NRS a las 05:03 h y una bajamar de +0,59 m NRS a las 11:38 h. La Figura 3b compara la marea meteorológica con el registro de la presión atmosférica de El Yali, donde se apreció que el denominado efecto del barómetro invertido (Jeffreys, 1916) asociado al descenso de cerca de 10 a 20 Hpa, permitió explicar del orden de 0,1 a 0,2 m de aumento

en el nivel del mar. Se observó asimismo un retardo de 3 a 6 h entre la ocurrencia de la presión más baja y el máximo de marea meteorológica. En el gráfico de dispersión de la Figura 3d se observa la proporcionalidad inversa entre la presión atmosférica y la marea meteorológica. Naturalmente, esta relación no es perfecta debido a posibles errores instrumentales y los supuestos del efecto barómetro invertido (*e.g.*, balance de fuerzas de tipo estacionario y sin la presencia de viento), entre otros efectos. Además, en las Figuras 3c y 3e, se visualiza la proporcionalidad directa entre la marea meteorológica y la magnitud del viento del registro en Concón, escogida en forma arbitraria entre las 38 estaciones de viento. Al igual que para la presión atmosférica, el nivel del mar responde a la intensificación de los vientos con un retardo de algunas horas. Estos resultados permitieron conjeturar que la presión atmosférica y el viento jugaron un rol preponderante en el nivel del mar.

Oleaje en aguas profundas

La serie horaria mostró un estado de mar crítico registrado a las 09:25 h local, que se caracterizó por una altura significativa espectral de $H_s = 7,23 \text{ m}$, una altura máxima de ola individual de $H_{\text{max}} = 10,23 \text{ m}$ (Fig. 13a), un período *peak* de $T_p = 13,3 \text{ s}$ y una dirección *peak* de 310° (Fig. 13b). Esta boya sufrió la interrupción de las mediciones en la tarde del 8 de agosto, por lo que no fue posible saber si se presentaron estados de mar más energéticos durante la marejada. No obstante, la máxima altura significativa obtenida de la boya (Figs. 13a, 13c), coincidió con la máxima obtenida del

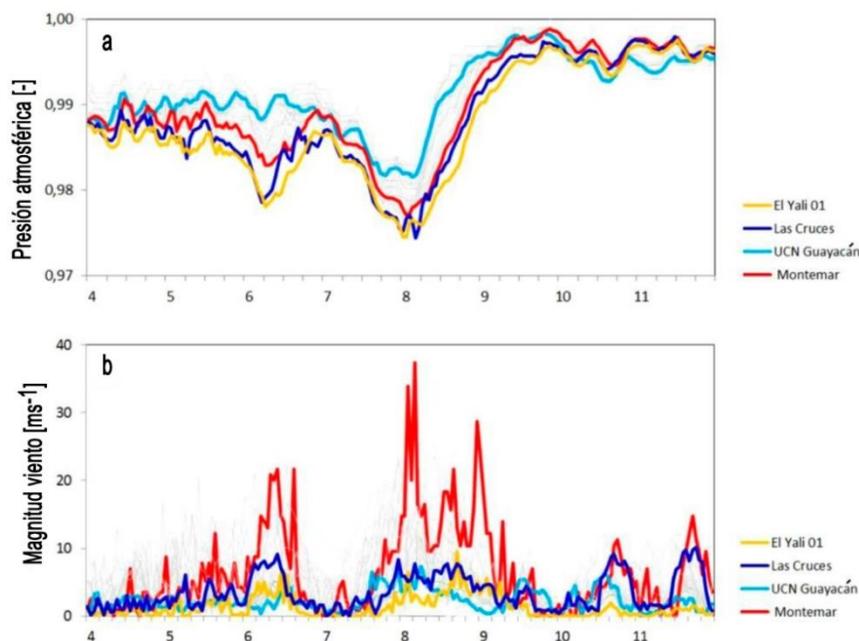


Figura 12. Serie de tiempo horaria de a) presión atmosférica adimensionalizada respecto del mayor del registro para 30 estaciones costeras, y b) magnitud del viento equivalente a 10 msnm para 38 estaciones costeras, entre el 4 y 11 agosto 2015 en Chile Central.

modelo de pronóstico de NOAA-WW3 (Windguru, 2016).

Por otra parte, cabe notar que en la medición anterior al *peak* del temporal (06:25 h), la boya registró una altura significativa de $H_s = 4,74$ m, significativamente inferior a la máxima de $H_s = 7,23$ m; por lo tanto la resolución temporal de 3 h parece insuficiente para caracterizar posibles variaciones abruptas que pudieren haber ocurrido entre éstas y las mediciones siguientes.

La Figura 13c mostró la velocidad del viento a 10 msnm, registrada en las estaciones de Concón (ENAP) y Ventanas, además de la altura significativa en aguas profundas frente a Valparaíso pronosticada por NOAA-WW3 (Windguru, 2016). Se observó que entre el 7 y 8 de agosto, la altura creció y decreció siguiendo la forma de la magnitud del viento local, con un máximo de ~6 h después del viento máximo. La Figura 13d, mostró el espectro bidimensional obtenido de la boya para el *peak* de la tormenta (Beyá, 2016), donde se observó una componente de gran energía proveniente de dirección W-NNW con un período *peak* de $T_p = 13,2$ s, pero cubriendo un rango amplio de períodos entre 6 y 16 s. El contenido energético de otras direcciones fue comparativamente menor. Ambas figuras sugieren que, en su condición extrema, el oleaje del 8 de agosto presentó una componente de generación local (*seas*), que se superpuso con frecuencias más bajas provenientes del NW, probablemente asociadas a puntos de generación alejados dentro de la zona de baja

presión (Fig. 2). El espectro de este estado de mar es esencialmente unimodal, pero con gran distribución de frecuencias y direcciones, lo que indica la cercanía a la zona de generación.

La Figura 14 indicó una rosa de altura significativa y las curvas de período de retorno vs altura significativa espectral para todas las bases de datos analizadas, sin discriminar por dirección y para direcciones agrupadas entre $292,5^\circ$ (WNW) y $337,5^\circ$ (NNW) en aguas profundas. La agrupación de datos por direcciones en aguas profundas es una práctica común en ingeniería (Molina, 2016) y permite un análisis más fino desde la perspectiva del diseño de obras marítimas. La altura del estado de mar *peak* de $H_s = 7,23$ m registrada por la boya es una de la más extremas para la estadística adireccional (Fig. 14a) y bastante mayor que los escasos eventos provenientes de dirección WNW-NNW (Fig. 14b). Aún más, a excepción de la base de datos de la DOP, el valor registrado por la boya fue mayor que todas las bases de datos, independiente de la dirección de incidencia en aguas profundas. Se observó asimismo, una gran diferencia en la estimación del período de retorno entre las bases de datos sin considerar dirección (Fig. 14c) y para direcciones WNW-NNW (Fig. 14d). Por ejemplo, la curva de valores extremos de la base de datos DOP para el análisis adireccional indicó que la marejada tiene una recurrencia promedio cercana a 6 años, lo que difiere de otras bases de datos que indican períodos de retorno superiores a 1.000 años.

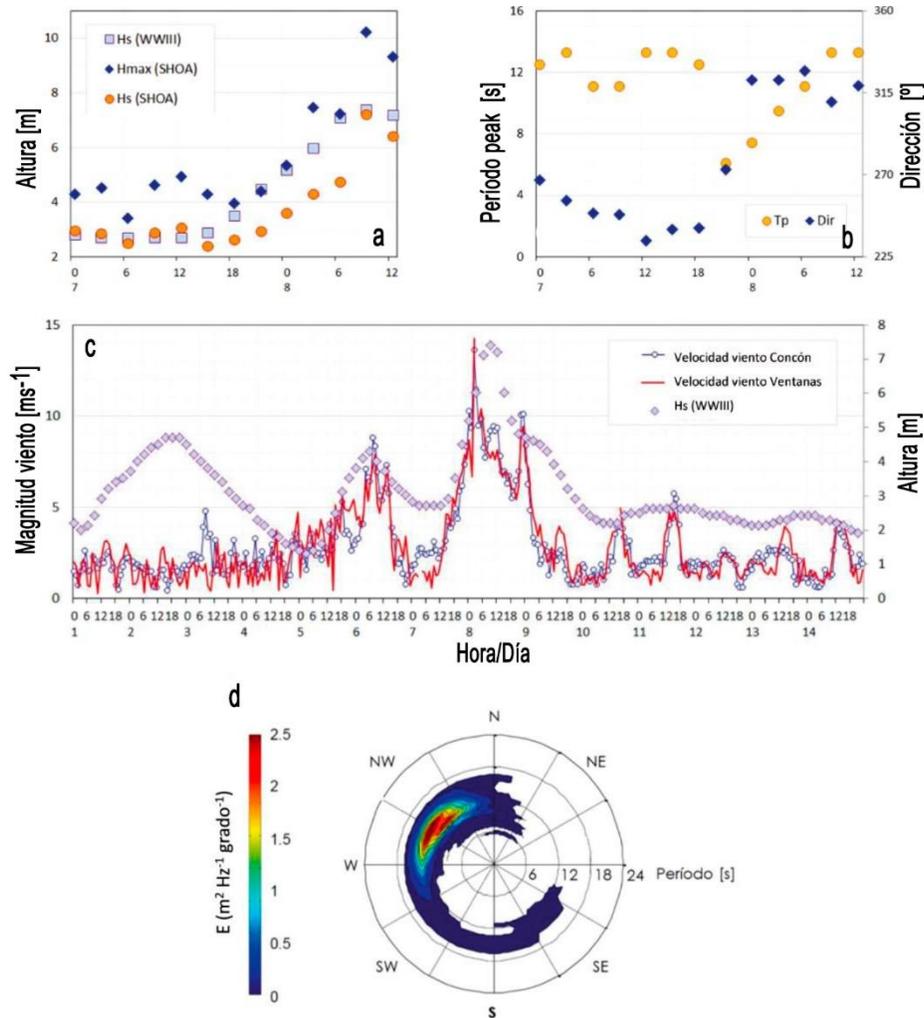


Figura 13. Datos de oleaje en el temporal del 8 agosto 2015 en aguas profundas frente a Valparaíso. a) Serie de tiempo de altura significativa [Hs (SHOA)] y altura máxima de la boya Watchkeeper [Hmax (SHOA)]. Se incluye también la altura significativa obtenida mediante hindcasting [Hs (WWIII)], disponible en windguru.com, b) serie de tiempo de período peak T_p y dirección del oleaje obtenida de la boya, c) velocidad del viento en Concón y altura significativa en aguas profundas frente a Valparaíso, y d) espectro bidimensional de la boya Watchkeeper (Beyá *et al.*, 2016).

Oleaje en sectores costeros

Los resultados indicaron diferencias despreciables de la altura significativa a profundidades >20 m, con valores mayores de hasta 2 m para la modelación con marea +1,8 m NRS en sectores puntuales y muy bajos. Por otra parte, se comparó un caso sin forzante de viento con uno correspondiente a un viento de 10 m s^{-1} , proveniente del W. Cabe notar que la dirección y magnitud del viento se caracterizaron por: i) alta variabilidad temporal en cada estación meteorológica, y ii) gran diferencia entre estaciones costeras, razón por la cual estos resultados no son concluyentes. No obstante, se constató que el modelo no es tan sensible al viento, puesto que se registraron alturas significativas

superiores a 5 m en sectores muy puntuales para el modelo con viento. A falta de datos de oleaje en las tres bahías de interés, no se pudo efectuar un proceso de calibración y validación, pero los patrones ilustrados en estas figuras ofrecen una aproximación a la realidad.

Los patrones de propagación de oleaje para la condición extrema en aguas profundas, un nivel de marea de +1,8 m NRS y vientos de 10 m s^{-1} provenientes del W, se indican para las bahías de Quintero, Concón y el tramo comprendido entre Horcón y la Playa de Ritoque (Fig. 15). Además, se muestran los resultados para la Bahía de Valparaíso y la zona costera de San Antonio para las mismas condiciones (Fig. 16).

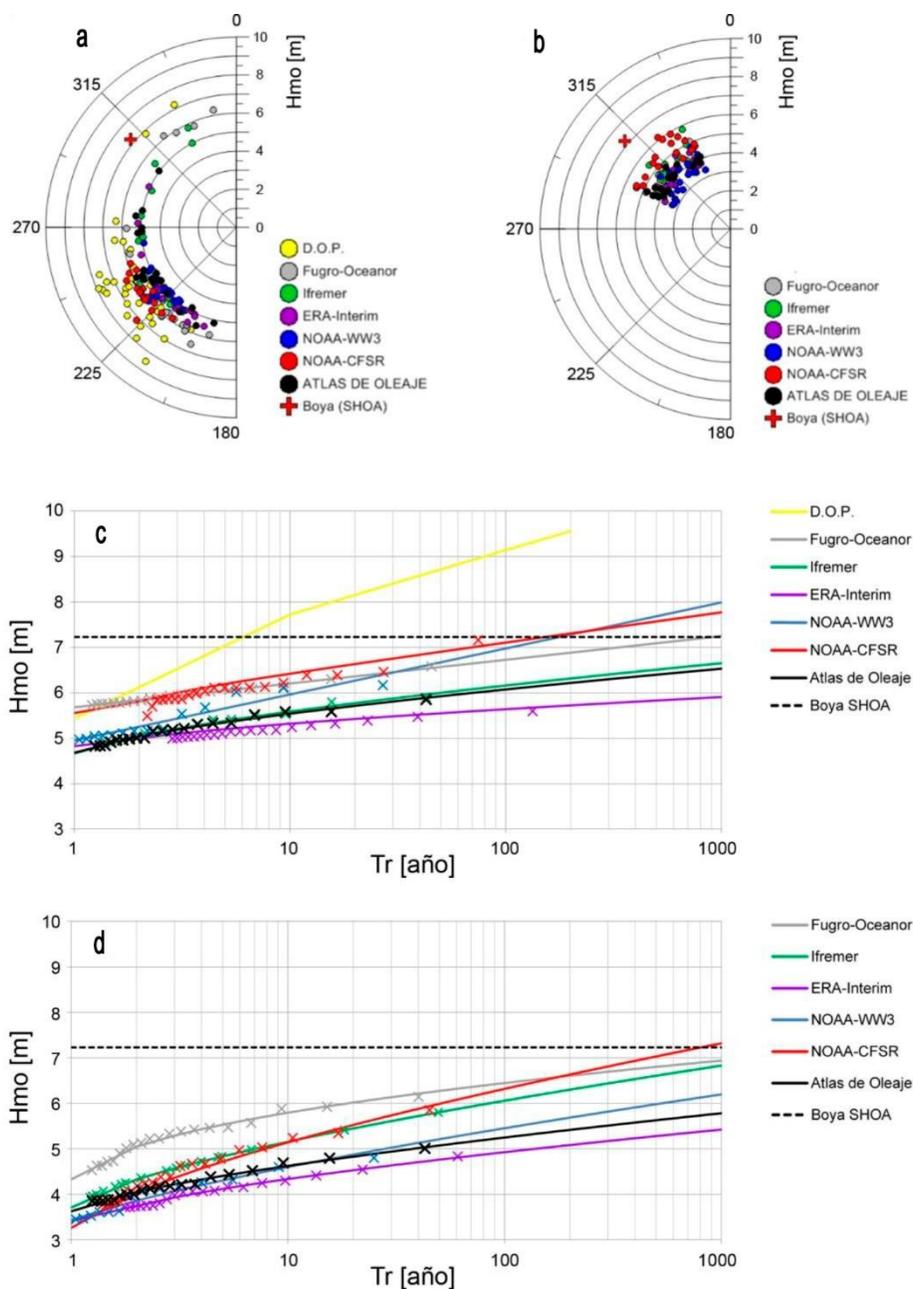


Figura 14. Estadística de altura significativa extrema en aguas profundas frente a Valparaíso. Rosa de altura significativa a) adireccional y b) para direcciones entre 292,5° y 337,5°. El estado de mar de $H_s = 7,23$ m, $T_p = 13,3$ s y 310° se incluye con una cruz roja. Curvas de altura significativa y período de retorno para diferentes bases de datos. c) Sin dirección y d) para direcciones entre 292,5° y 337,5°.

DISCUSIÓN

Sobre la recurrencia del temporal del 8 agosto 2015

Las distintas bases de datos de oleaje incluidas (Fig. 13) presentan gran variabilidad en la estimación del período de retorno de la altura significativa asociada a esta tormenta, que cubre desde valores <10 años a valores >1.000 años (NOAA-WW3, IFREMER y FUGRO-

OCEANOR). La estimación de los períodos de retorno, asimismo, es muy sensible a la agrupación por direcciones, en aguas profundas (Molina, 2016). La diferencia en los valores extremos se explica en el origen de los campos de vientos, en los parámetros de ajuste de cada modelo de generación de oleaje (Álvarez *et al.*, 2016). Otra fuente de incertidumbre se asocia a la falta de mediciones de oleaje de largo plazo, que im-

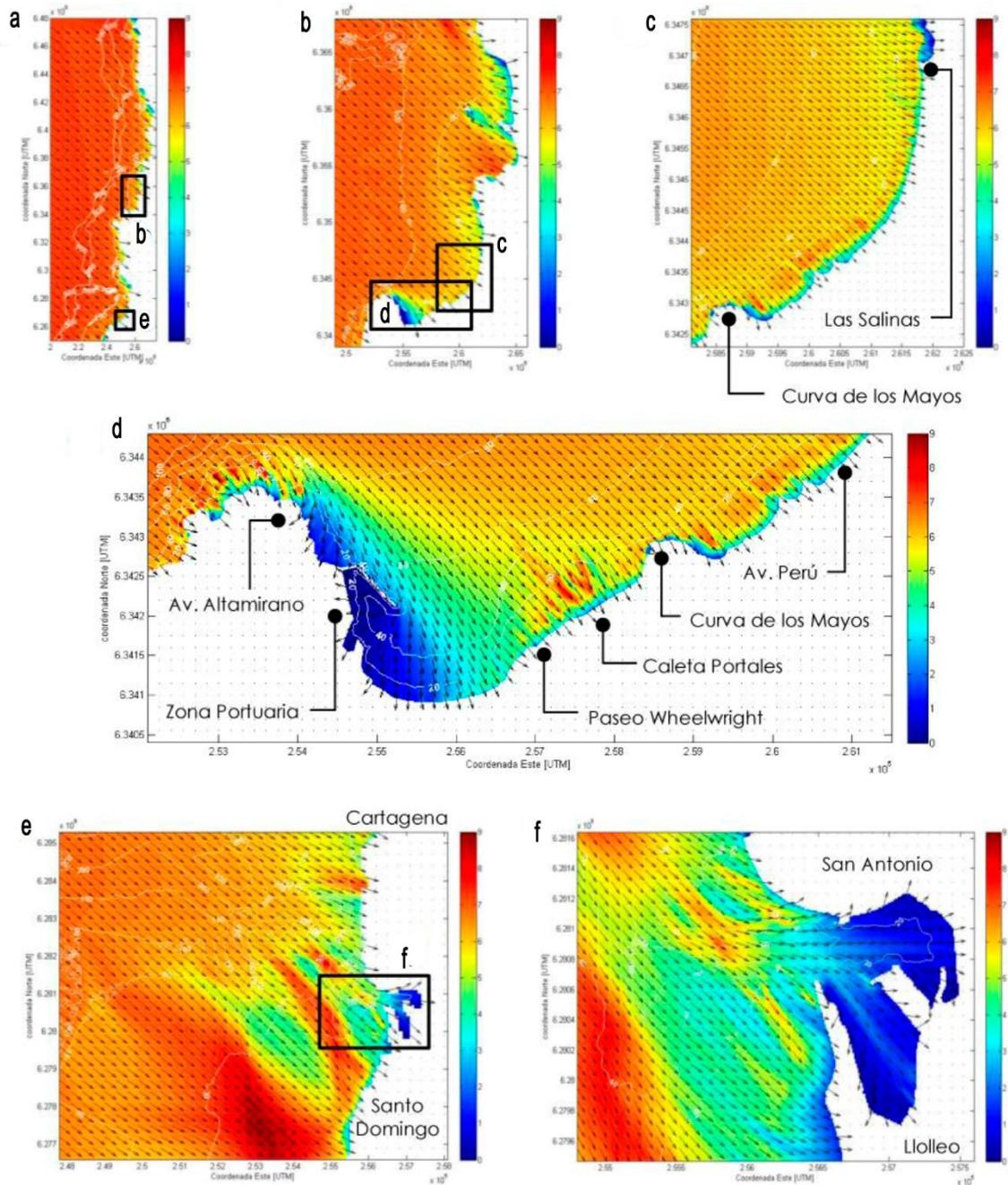


Figura 15. Modelo de propagación de oleaje desde aguas profundas a someras. Se muestra la altura de la ola significativa (m), para el estado de mar en aguas profundas de $H_s = 7,23$ m, $T_p = 13,3$ s y dirección 310° en a) todo el dominio de integración, b) bahías de Concón y Valparaíso, c) sector comprendido entre Las Salinas (Viña del Mar) y Curva de los Mayos (Valparaíso), d) Bahía de Valparaíso, e) San Antonio a Santo Domingo, y f) Puerto de San Antonio.

posibilita validar los modelos numéricos durante eventos extremos. La precisión de los modelos para dichos eventos es menor que la asociada a eventos de clima medio, debido a que la validación se realiza con altimetría satelital cuya disponibilidad, tanto espacial como temporal, no necesariamente coincide con la ocurrencia de las tormentas (Gallardo *et al.*, 2017).

Por otra parte, las bases de datos no abarcan eventos ocurridos antes de 1979, como el evento extremo del 10 de agosto 1965 (Campos-Caba *et al.*, 2015), que dada la baja recurrencia de estos eventos, limita la estimación del período de retorno. Dicho evento es de particular interés en el análisis histórico, dada su similitud con el temporal del 8 agosto 2015 (Caviedes

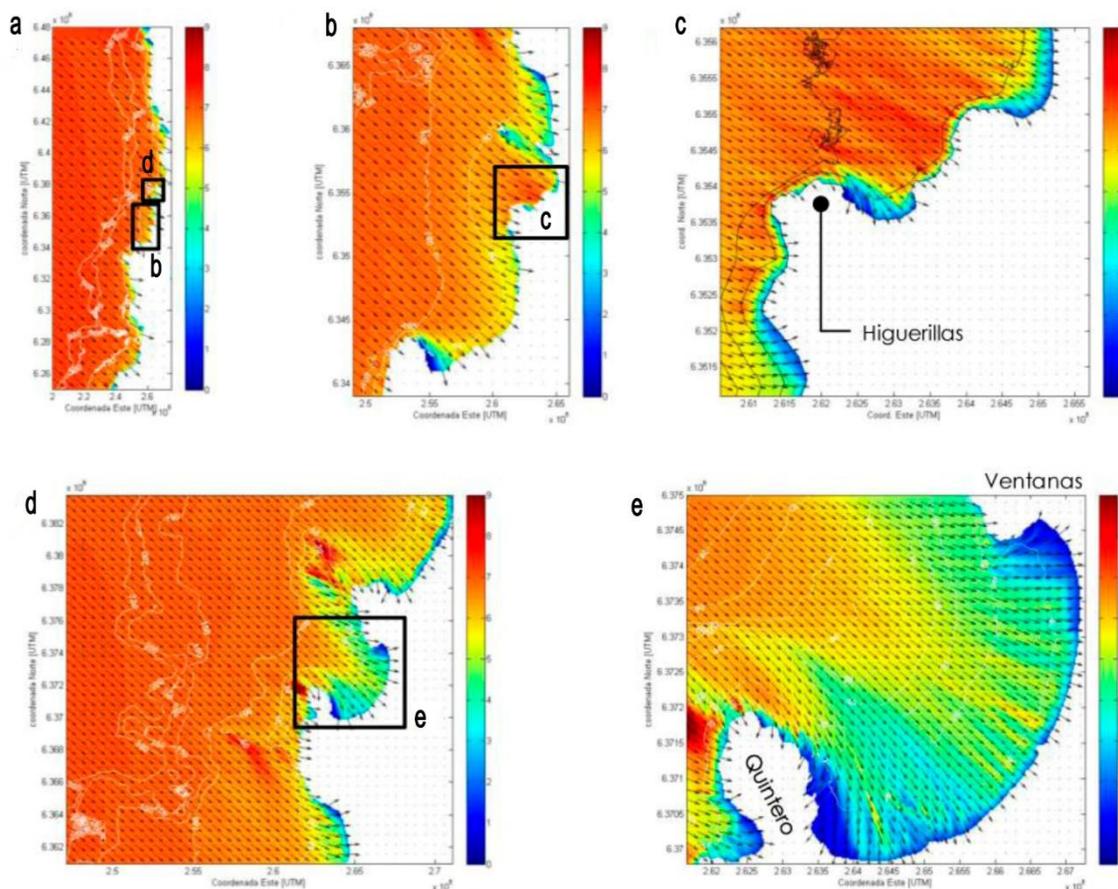


Figura 16. Modelo de propagación de oleaje desde aguas profundas a someras. Se ilustra la altura de ola significativa, en metros para estado de mar en aguas profundas de $H_s = 7,23$ m, $T_p = 13,3$ s y dirección 310° en: a) todo el dominio de integración, b) bahías de Concón y Valparaíso, c) Bahía Concón, d) Horcón a Ritoque, e) Bahía Quintero.

& Águila, 1969; Reyes & Romero, 1977; Araya-Vergara, 1979; Brito, 2009). En la Bahía de Valparaíso, por ejemplo, en agosto 2015 se registraron daños en sitios coincidentes a los arrasados en 2015, donde la Avenida Altamirano fue cubierta por el oleaje, cortando el tránsito. En Caleta El Membrillo, que hoy tiene otra configuración debido a la construcción de nuevas instalaciones, se destruyeron casetas para implementos de pesca y 14 botes de pesca artesanal. Se produjeron socavones en la vía ferroviaria que une Valparaíso y Viña del Mar, daños en la Avenida Marina e inundación en el Hotel Miramar. Los destrozos en la Avenida Perú y la consecuente inundación hasta calle San Martín fueron ampliamente difundidos en la prensa. Entre Las Salinas y Concón, hoteles, restaurantes y caletas de pescadores fueron destruidos. Las playas en este sector fueron severamente erosionadas, mostrando rocas que normalmente estaban ocultas bajo la arena.

Una línea de investigación orientada a mejorar la incertidumbre de los modelos de oleaje en condiciones extremas consiste en evaluar en forma cuantitativa los

temporales que han afectado la zona central de Chile, de modo de extender la estadística disponible en la actualidad. En esta línea, algunos autores (*e.g.*, Brito, 2009; Campos-Caba, 2016), identifican más de 200 temporales con algún tipo de efecto entre Valdivia y Arica para el período 1823-2015. Esta estadística constituye una buena fuente de información para correlacionar la información obtenida mediante los modelos de reanálisis de variables meteo-oceanográficas con los daños registrados en la costa.

Por otra parte, el análisis del período de retorno (Fig. 14b), considera como única variable la altura significativa para definir el período de retorno del evento del 8 de agosto. No obstante, debido al hecho de que el daño surge de una combinación de oleaje y nivel del mar (dependiente a su vez de la marea astronómica, el viento y la presión atmosférica), sería conveniente considerar de forma probabilística todas las variables que definen estos agentes, para estimar el período de retorno del evento como la ocurrencia conjunta de ellas (Beyá *et al.*, 2013). Finalmente, el análisis de valores

extremos, basado en el supuesto de que el comportamiento pasado de la variable altura significativa se repetirá en el futuro, no considera el hecho que la estadística puede haber experimentado cambios debido a efectos a largo plazo. Metodologías de análisis no estacionarias, como la propuesta por Cofré & Beyá (2016), aportan a una mejor estimación de la recurrencia de este tipo de fenómenos.

Análisis de daños en el borde costero al sur de San Antonio

El oleaje proveniente del NW fue significativamente alterado por el cañón submarino de San Antonio (Fig. 15e), concentrando la energía del oleaje frente a Santo Domingo y reduciendo la agitación al interior del Puerto de San Antonio. En las cercanías de la dársena, el cañón fue responsable de deflectar los frentes de oleaje hacia la defensa costera ubicada inmediatamente al norte de la bocana de acceso debido a la refracción (Fig. 15f). Al sur de ésta, en los bajos fondos de arena nutridos por el Río Maipo, el oleaje disipó su energía por rotura en una gran extensión, que se evidencia por un descenso gradual de la altura significativa frente al molo sur. Se observa asimismo, una concentración de energía dirigida al sur de Santo Domingo (Fig. 15e), que explicaría la inundación en la Reserva Nacional El Yali (Fig. 4b). La dirección del oleaje en aguas profundas durante el estado de mar crítico del temporal explicaría por qué, a pesar de estar frente a uno de los temporales más energéticos de los últimos 36 años de estadística (1979-2015), no se reportaron daños en la zona portuaria. Esto difiere de lo ocurrido durante el temporal de junio de 2013, caracterizado por oleaje proveniente del SW de menor altura y alto período ($H_s = 6,4$ m, $T_p = 20,0$ s y dirección 233° (Álvarez *et al.*, 2016) que causó daños en la escollera del molo sur (Campos-Caba, 2016). A partir de la comparación de estos eventos se concluye que el oleaje costero, y por tanto en el nivel de daño esperable en las obras portuarias de San Antonio, es muy sensible tanto al período como a la dirección en aguas profundas debido a la presencia del cañón submarino de San Antonio.

Análisis de daños en el borde costero de Valparaíso

En la zona portuaria, el modelo de oleaje indica un relativo abrigo debido a la presencia de Punta Ángeles y del molo de abrigo del Puerto de Valparaíso, cuyo efecto alcanza al sector de Barón (Fig. 15d). Cabe notar que el malecón ubicado entre el Muelle Barón y Bellavista (Fig. 5b) y el sector de Avenida Altamirano entre el Puerto y Caleta El Membrillo experimentaron episodios de sobrepaso significativos (Fig. 5d), que no se explican mediante la modelación. Una razón de esta deficiencia radica en que el modelo SWAN no consi-

dera reflexión y sólo modela (no resuelve) la difracción; fenómenos que dominan el patrón de propagación de oleaje en la zona portuaria y que podrían ser caracterizados de mejor forma con modelos que resuelven la fase (*e.g.*, Losada & Liu, 2000).

Hacia el norte de la bahía, el modelo muestra una concentración de energía de oleaje en la cercanía de Caleta Portales, Curva Los Mayos y frente al Hotel Miramar, donde también se registraron daños. Frente a Caleta Portales, el oleaje rompió a considerable distancia de la costa debido a los bajos fondos, promoviendo un aumento del orden de 1 a 2 m en el nivel medio del mar por *wave setup*, según se desprende del cálculo mediante una metodología simplificada (USACE, 2003). La batimetría somera en esta playa se explica por la presencia del Bajo Ester y por los aportes sedimentarios de la Quebrada Cabritería y la quebrada que desemboca en Portales, obstruida actualmente por asentamientos urbanos. La Figura 15d muestra concentración del oleaje de altura significativa del orden de $H_s = 9$ m y una amplia rompiente excediendo incluso el cabezo de los muelles de Caleta Portales (Fig. 7b), que sumados al aumento del nivel medio del mar por *wave setup* y marea meteorológica, explicarían el nivel de daño observado en este sector costero.

Las edificaciones en el sector comprendido entre el Paseo Juan de Saavedra (Fig. 8d) y Curva de los Mayos (Fig. 9b) fueron las más afectadas por el temporal. A diferencia de la zona de los muelles de la Caleta Portales, el oleaje rompe muy cerca de la línea de costa debido a las mayores profundidades, promoviendo el daño de las defensas costeras y el sobrepaso que habría dañado la línea del Merval (Fig. 15d). Los resultados del modelo en las inmediaciones de la Curva de los Mayos, no son precisos en este sector debido a la alta reflexión y rotura impulsiva del oleaje en los roqueríos (Fig. 8b). Estos resultados indican que el comportamiento del oleaje fue muy diferente entre Playa Portales, donde una playa de baja pendiente permitió la disipación de energía en varios cientos de metros, y la Curva de los Mayos a sólo 600 a 900 m de los muelles, donde un oleaje rompiente de carácter impulsivo generó daños en edificaciones costeras.

Análisis de daños en el borde costero de Viña del Mar

Aparentemente, las razones del sobrepaso excesivo en Avenida Perú (Fig. 10b), la socavación en Playa Acapulco (Fig. 10c) y la pérdida de infraestructura costera en Playa Los Marineros provienen de una misma causa (Fig. 10d). La Avenida Perú se ubica en sectores arenosos y bajos producto de la acumulación de arenas provenientes del Estero Marga Marga, en un cono de deyección que se proyecta varias decenas de

metros mar adentro (INH, 1999). Los bajos fondos generan una zona de rompiente bastante amplia y, como en Playa Portales, el desarrollo del *wave setup*, que aumenta el nivel medio del mar. La cota de coronamiento de la obra de +5,5 m NRS aproximadamente, es también baja para eventos donde se combinan un nivel del mar alto y oleaje intenso. Por otra parte, la defensa cuenta con una escollera de un talud bastante inclinado y compuesto por roca granítica de peso <10 ton, que durante su construcción se dispuso en forma aleatoria y directamente sobre la arena de la playa existente (Repetto, 2011). La escollera no cuenta con capas de filtro de granulometría más pequeñas que promuevan la disipación de la energía del oleaje. En el extremo más cercano a la desembocadura del Estero Marga Marga, esto ha causado la fisura de las losas de la calle, recientemente reemplazadas por pavimento nuevo. Asimismo, en algunas zonas de la defensa se observan desplazamientos de elementos de la coraza donde se canaliza el agua. Todos estos factores explican que el sobrepaso sea frecuente durante los temporales, y particularmente en el temporal del 8 agosto 2015, que tuvo características extremas. El daño experimentado en las playas fue importante en las cercanías de la Avenida Perú y se redujo gradualmente hacia el norte por la reducción paulatina de la altura de la ola (Fig. 15c).

Análisis de daños en el borde costero de Concón

En la Bahía de Concón (Fig. 16c) se observa una concentración de energía que explica los daños en el Club de Yates de Higuierillas (Fig. 11b) y la pérdida de arena en las playas del sector. La Playa la Boca resultó afectada por una erosión importante y se evidenció sobrepaso en los estacionamientos. Material de ~50 mm de diámetro medio y de canto redondeado se depositó a lo largo de la playa, probablemente debido al arrastre de sedimentos provenientes del Río Aconcagua, que fueron transportados al SW por el oleaje causado por el temporal. Este acorazamiento de la playa pudo haber ayudado a limitar la erosión y proteger las precarias defensas costeras de los estacionamientos.

Análisis de daños en el borde costero de Quintero

La presencia de bajos fondos al NW de la bahía, conocidos como Farellones de Quintero, además de la forma de concha propia de la bahía, promovieron la reducción de la energía del oleaje en los extremos norte y sur de la bahía durante la condición más extrema del temporal (Fig. 16d). El sector afectado corresponde a la zona de playa en el tramo más expuesto al oleaje, en el centro de la bahía, que abarca la zona industrial desde Loncura al sur del Puerto de Ventanas (Fig. 16e). Las

instalaciones portuarias en este tramo, como los muelles se caracterizan por estructuras metálicas constituidas por pilotes esbeltos y tableros altos, “transparentes” el oleaje, que explican el nulo daño reportado. Los efectos del oleaje en la porción central de la bahía, se restringieron a la zona alta de la playa, producto de la socavación, quedando expuestas tuberías de aducción utilizadas en las faenas portuarias.

CONCLUSIONES

El temporal del 8 agosto 2015 se caracterizó por la ocurrencia conjunta de varios efectos meteo-oceanográficos que causaron la destrucción de infraestructura costera y edificaciones en varias localidades costeras de Chile central. El oleaje, cuya altura significativa costa afuera de la Bahía de Valparaíso fue de $H_s = 7,2$ m, se sumó a rachas de vientos de hasta 110 km h^{-1} provenientes del noroeste y una mínima presión atmosférica de 991 Hpa en la superficie, asociada al sistema frontal. La marea de origen astronómico, aun cuando no extrema, hizo su contribución para peraltar el nivel del mar sobre el cual el oleaje rompió con violencia sobre el borde costero. La comparación de este evento con otros reportados a partir de diferentes bases de datos en la zona central, indican que: i) es uno de los más grandes reportados históricamente, y ii) que aun cuando está relativamente bien caracterizado en cuanto a las variable meteo-oceanográficas, existe una gran incertidumbre al evaluar el período de retorno.

Debido a la falta de instrumentos de medición de oleaje en los sectores de estudio, no fue posible calibrar ni validar la transferencia espectral de oleaje desde aguas profundas siguiendo metodologías utilizadas para estudios oceanográficos (SHOA, 2015). Esta deficiencia metodológica se basa en la escasa calidad, cantidad y disponibilidad espacio-temporal de datos de oleaje tanto en aguas profundas como en sectores costeros. A objeto de estimar la amenaza futura de estos eventos extremos, se debieran complementar los esfuerzos de caracterización del oleaje en aguas profundas (Beyá *et al.*, 2016a), mediante: i) la implementación de redes permanentes de medición de oleaje en aguas profundas y frente a los principales puertos, ii) la mejora de los modelos de pronósticos de oleaje en sectores costeros (*e.g.*, Beyá *et al.*, 2016b), y iii) la profundización de los estudios del comportamiento del oleaje futuro bajo diferentes escenarios de cambio climático (*e.g.*, Cofré & Beyá, 2016) y de sus efectos en la infraestructura costera (*e.g.*, Campos-Caba *et al.*, 2015). La densificación de la red sismológica nacional (CSN, 2017), ocurrida como consecuencia del terremoto del 27 de febrero de 2010, debe tomarse

como un ejemplo de inversión en instrumental meteorológico.

Eventos recientes acaecidos en nuestro país, como los tsunamis 2010, 2014 y 2015 (An *et al.*, 2014; Aránguiz *et al.*, 2015; Catalán *et al.*, 2015; Contreras-López *et al.*, 2016) o los temporales de julio de 2013 y agosto de 2015, dejan en evidencia la vulnerabilidad de los emplazamientos costeros, que crece a medida que se construye en terrenos bajos sin atender a la naturaleza de uno de los entornos más dinámicos de la tierra. Para garantizar el uso sustentable del territorio costero, tanto la definición de las zonas potenciales de inundación como el diseño de las obras costeras, se debe considerar cómo han sido y cómo serán los temporales en el futuro. Este estudio apunta justamente a registrar uno de los eventos más importantes en la serie histórica de temporales en la zona central de Chile, de modo de aportar a un mejoramiento de la base estadística disponible para tales efectos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al SHOA por proporcionar el registro de oleaje de la boya Watchkeeper frente a Valparaíso, a la Escuela de Ciencias del Mar y al Laboratorio de Meteorología del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, a la Estación Costera de Investigaciones Marinas de la Pontificia Universidad Católica, a la Estación Montemar de la Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales de la Universidad de Valparaíso, a la Secretaría Regional Ministerial de Medio Ambiente de Valparaíso, a la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas, a la Corporación Nacional Forestal Región Valparaíso, a SOPRAVAL, a AGROSUPER, al Capitán Deportivo Costero Francisco Ghisolfo y al Sr. Luis Araya López por compartir registros instrumentales y proporcionar antecedentes para el desarrollo de este trabajo. El Fondo de Desarrollo Disciplinario de Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Playa Ancha, financió la instalación de tres estaciones meteorológicas usadas en este trabajo. Se agradece al programa Fondef-IdeA de CONICYT por el financiamiento del proyecto IT13I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile” y al equipo del proyecto conformado por Ariel Gallardo, Héctor Hidalgo, Javier Valdivia y Marco Álvarez por la recopilación y proceso de datos de oleaje. Se agradece al Proyecto Corfo-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz” por la adquisición de la base de datos Fugro-Oceanor. Finalmente a los revisores anónimos del manuscrito

cuyas valiosas sugerencias permitieron mejorar su calidad.

REFERENCIAS

- Álvarez, M., J. Beyá & A. Gallardo. 2016. Comparación de análisis extremo uni y bivariado para marejadas recientes en Chile. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú, 28 al 30 septiembre 2016, 8 pp.
- An, C., I. Sepúlveda & P.L.-F. Liu. 2014. Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile, earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 41(11): 3988-3994.
- Aránguiz, R., G. González, J. González, P.A. Catalán, R. Cienfuegos, Y. Yagi, R. Okuwaki, L. Urra, K. Contreras, I. Del Rio & C. Rojas. 2015. The 16 September 2015 Chile tsunami from the post-tsunami survey and numerical modeling perspectives. *Pure Appl. Geophys.*, 173(2): 1-16.
- Araya-Vergara, J.F. 1979. Las incidencias cataclísmicas de las bravesas en la evolución de la costa de Chile central. *Inform. Geogr. Chile*, 26: 19-42.
- Ardhuin, F., J. Hanafin, Y. Quilfen, B. Chapron, P. Queffeuilou, M. Obrebski, J. Sienkiewicz & D. Vandemark. 2011. Calibration of the “IOWAGA” global Wave Hindcast (1991-2011) Using ECMWF and CFSR Winds. 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawaii, HI, 2011. [http://www.jcomm.info/images/stories/2011/12thWaves/Papers/ardhuin_et_al_hindcast_whf2011.pdf]. Reviewed: 22 May 2017.
- Beyá, I. 2016. Estimación del clima de oleaje en la V Región: consideraciones de diseño. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. San Antonio, Chile, 26 al 28 de octubre de 2016, (J. Beyá, *com. pers.*).
- Beyá, J., M. Álvarez, A. Gallardo, H. Hidalgo, C. Aguirre, J. Valdivia, C. Parra, L. Méndez, F. Contreras, P. Winckler & M. Molina. 2016a. Atlas de Oleaje de Chile. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 169 pp.
- Beyá, J., M. Álvarez, A. Gallardo, H. Hidalgo, C. Aguirre, J. Valdivia, C. Parra, L. Méndez, F. Contreras, P. Winckler & M. Molina. 2016b. Pronóstico de oleaje en aguas profundas. Valparaíso, Chile. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. [www.oleaje.uv.cl/pronostico.html]. Reviewed: 30 January 2017.
- Beyá, J., P. Winckler & M. Molina. 2013. Inundaciones costeras, más allá de los tsunamis. *An. Inst. Ing. Chile*, 125(2): 63-81.
- Booij, N., R. Ris & L. Holthuijsen. 1999. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model

- description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104(C4): 7649-7666.
- Brito, J.L. 2009. San Antonio: nuevas crónicas para su historia y geografía. Salesianos Impresores, San Antonio, 412 pp.
- Campos-Caba, R.V. 2016. Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Memoria de Título de Ingeniero Civil Oceánico, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 136 pp.
- Campos-Caba, R., J. Beyá & M. Mena. 2015. Cuantificación de los daños históricos a infraestructura costera por marejadas en las costas de Chile. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Santiago, 22 y 23 de octubre de 2015, 14 pp.
- Catalán, P.A., R. Aránguiz, G. González, T. Tomita, R. Cienfuegos, J. González, M.N. Shrivastava, K. Kumagai, C. Mokrani, P. Cortés & A. Gubler. 2015. The 1 April 2014 Pisagua tsunami: observations and modeling. *Geophys. Res. Lett.*, 42(8): 2918-2925.
- Caviedes, C. & I. Águila. 1969. Los estados de tiempo típicos de Valparaíso, Chile central. *Rev. Geogr. Valparaíso*, 3(1-2): 3-21.
- Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA). 2012. Red de estaciones CEAZA-Met. Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) ULS-UCN-INIA. [www.ceazamet.cl]. Reviewed: 11 December 2016.
- Centro Sismológico Nacional (CSN). 2017. La red sismológica nacional. [http://www.csn.uchile.cl/red-sismologica-nacional/introduccion/]. Reviewed: 30 January 2017.
- Cofré, C. & J. Beyá. 2016. Proyecciones y tendencias en el clima de oleaje en las costas chilenas bajo escenarios de cambio climático. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. San Antonio, 26 al 28 de octubre de 2016, 15 pp.
- Contreras-López, M., P. Winckler, I. Sepúlveda, A. Andaur, F. Cortés, C. Guerrero, C. Mizobe, F. Iguait, W. Breuer, J. Beyá, H. Vergara & R. Figueroa. 2016. Field survey of the 2015 Chile tsunami with emphasis on coastal wetland and conservation areas. *Pure Appl. Geophys.*, 173(2): 349-367.
- Dee, D., S. Uppala, A. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, *et al.* 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137(656): 553-597.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). 2016. Dirección General de Aeronáutica Civil. Dirección Meteorológica de Chile [www.meteochile.gob.cl]. Reviewed: 11 December 2016.
- Dominey-Howes, D., L. Dengler, P. Dunbar, L. Kong, H. Fritz, F. Imamura & J. Borrero. 2014. International tsunami survey team (ITST) post-tsunami survey field guide, UNESCO-IOC, Paris, 108 pp.
- Fuenzalida, H. 1983. La atmósfera inconstante: circulación general de la atmósfera. Fascículos para la comprensión de la ciencia, las humanidades y la tecnología. Editorial Universitaria, Santiago, 47: 107 pp.
- Gallardo, A., J. Valdivia & J. Beyá. 2017. Incertidumbre en los valores extremos del oleaje en Chile. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 45(4): 649-658.
- Goda, Y. 1988. On the methodology of selecting design wave height. *Coast. Eng. Proc.*, 1(21): 899-913.
- Godin, G. 1972. The analysis of tides. University of Toronto Press, Buffalo, 264 pp.
- Instituto Nacional de Hidráulica (INH). 1999. Mejora de las desembocaduras del Estero Margamarga y de los ríos Mataquito, Carampangüe y Queule (Manuscrito no publicado).
- Intergovernmental Oceanographic Commission-United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (IOC-UNESCO). 2016. Sea level station monitoring facility [www.ioc-sealevemonitoring.org]. Reviewed: 11 December 2016.
- Jeffreys, H. 1916. Causes contributory to the annual variation of latitude. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 76: 499-524.
- Losada, I. & P.L. F. Liu. 2000. Modelos matemáticos y numéricos para el estudio de agitación portuaria. *Estud. Invest. Mar.*, 1(1): 47-67.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2015. Sistema de información nacional de calidad del aire. (http://sinca.mma.gob.cl). Reviewed: 11 December 2016.
- Molina, M. 2016. Eventos extremos de oleaje para el diseño de obras ¿evaluar en aguas profundas o en el sitio? VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. San Antonio, Chile, 26 al 28 de octubre de 2016, 14 pp.
- Molina, M., M. Contreras-López, P. Winckler, S. Salinas & M. Reyes. 2011. Consideraciones sobre las variaciones de mediano y largo plazo del oleaje en el diseño de obras marítimas en Chile central. *An. Inst. Ing. Chile*, 123(1): 77-88.
- Molina, M., R. Campos-Caba, D. Manosalva, D. Becerra, B. Gálvez, G. Frías & P. Winckler. 2015. Efectos de la marejada del 8 de agosto de 2015 en las playas de la Bahía de Valparaíso. XXII Congreso Chileno de

- Ingeniería Hidráulica. Santiago, 21 al 23 de octubre de 2015, 16 pp.
- Oficina Nacional de Emergencias Ministerio del Interior (ONEMI). 2015. Boletín estadístico de emergencias periodo del 01 al 31 de agosto de 2015. Oficina Nacional de Emergencias Ministerio del Interior, División de Protección Civil, Boletín N°8, Santiago, 27 pp. [<http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bits/tream/handle/2012/1735/BoletinEstad%C3%AdsticoN8Agosto2015.pdf?sequence=1>]. Reviewed: 13 April 2016.
- Paskoff, R. 2010. Geomorfología de la costa de Chile. In: J. Díaz-Naveas & J. Frutos (eds.). Geología Marina de Chile. Comité Oceanográfico Nacional de Chile-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso-Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, Valparaíso, pp. 76-79.
- Puelma, A., J. Vásquez & F. Guerrero. 2016. Marejadas costa afuera, pronósticos de oleaje local y cierres de puerto. VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. San Antonio, Chile, 26 al 28 de octubre de 2016, 13 pp.
- Repetto, A. 2011. Metodología para la simulación aleatoria de temporales. Aplicación al cálculo del sobrepaso en Av. Perú, Viña del Mar, Chile. Memoria para obtener el título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, 101 pp.
- Reyes, E. & H. Romero. 1977. Climatología e interacción océano-atmósfera en la bahía de Valparaíso. *Rev. Biol. Mar.*, 16(2): 125-159.
- Ris, R., L. Holthuijsen & N. Booij. 1999. A third-generation wave model for coastal regions 1. Verification. *J. Geophys. Res.*, 104(C4): 7667-7681.
- Saha, S., S. Moorthi, H.-L. Pan, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, *et al.* 2010. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010. Recuperado el 03 de 2015, de Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. [<http://dx.doi.org/10.5065/D6513W89>]. Reviewed: 15 April 2016.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). 2014. Tablas de marea de la costa de Chile 2015. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, Valparaíso, 232 pp.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). 2015. Pub. 3201. Instrucciones oceanográficas N° 1. Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, Valparaíso, 30 pp.
- Terrero, E., A. Legrá & A. Lamorú. 2014. Método de inverso de la potencia de la distancia para estimar la velocidad del viento. *Ing. Energ.*, 35(3): 263-273.
- Tolman, H.L. 2014. User manual and system documentation of wave Watch III, version 4.18. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch. NOAA, Maryland, 218 pp.
- United Kingdom Met Office (UKMO). 2010. Fact sheet 6 -The Beaufort scale. National Meteorological Library, Devon, 22 pp.
- United States Army Corps of Engineers (USACE). 2003. Coastal Engineering Manual. Part II, Chapter 4: Surf Zone Hydrodynamics. Department of the Army (EM 1110-2-1110), Washington, 42 pp.
- Vilibić, I., S. Monserrat & A.B. Rabinovich. 2014. Meteorological tsunamis on the US East Coast and in other regions of the World Ocean. In: Meteorological Tsunamis: the US East Coast and Other Coastal Regions, Springer International Publishing, pp. 1-9.
- Winckler, P., M. Contreras, J. Beyá & M. Molina. 2015. El temporal del 8 de Agosto de 2015 en la Bahía de Valparaíso. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, 22 y 23 de octubre de 2015, 14 pp.
- Windguru. 2016. Wave forecast Chile-Viña del Mar-Reñaca beach. [www.windguru.cz]. Reviewed: 11 December 2016.

Received: 18 April 2016; Accepted: 14 October 2016

Anexo 1. Resumen de estaciones meteorológicas.

Nº	Estación	Latitud	Longitud	Altura [m]	Fuente	Año inicio registro	Resol. temporal	Mínima presión (Hpa)	Mínimo histórico	Max. viento medio (ms ⁻¹)	Max. viento ráfaga (ms ⁻¹)	Factor Zo (Terrero <i>et al.</i> , 2014) x10
1	Capitanía de Puerto Los Vilos	-31,909	-71,514	0,61	Armada	2014	Irregular	999	Si	26,8	27,3	0
2	Faro Punta Angeles	-33,000	-71,633	58	Armada	2014	Irregular	1001	Si	23,7	SD	0
3	Estación Montemar	-32,957	-71,550	23	Armada	2013	Irregular	1000	Si	20,1	29,1	0
4	Algarrobo Bajo [INIA]	-30,633	-71,451	80	CEAZA	2011	Horaria	SD	SD	8,2	16,9	0
5	Caleta Toro	-30,740	-71,700	23	CEAZA	2010	Horaria	1001	Si	14,0	23,7	-1
6	Camarico	-30,699	-71,322	290	CEAZA	2011	Horaria	975	Si	6,5	12,0	-1
7	Canela	-31,390	-71,410	350	CEAZA	2013	Horaria	961	Si	7,9	16,4	0
8	Coquimbo [El Panul]	-30,000	-71,400	122	CEAZA	2004	Horaria	989	Si	15,4	21,4	0
9	El Palqui [INIA]	-30,775	-70,927	504	CEAZA	2011	Horaria	SD	SD	4,3	6,3	0
10	Gabriela Mistral	-29,979	-71,080	198	CEAZA	2004	Horaria	981	Si	5,5	11,5	-1
11	Huintil	-31,573	-70,998	360	CEAZA	2010	Horaria	SD	SD	3,9	11,1	-1
12	Illapel [INIA]	-31,648	-71,197	275	CEAZA	2009	Horaria	SD	SD	4,6	12,5	0
13	Islote Pájaros	-29,585	-71,538	39	CEAZA	2011	Horaria	SD	SD	22,6	28,6	-3
14	Las Cardas	-30,251	-71,257	282	CEAZA	2012	Horaria	972	Si	6,7	13,9	-1
15	La Serena - CEAZA	-29,915	-71,242	90	CEAZA	2014	Horaria	SD	SD	6,1	13,1	0
16	La Serena - Cerro Grande	-29,938	-71,224	513	CEAZA	2015	Horaria	SD	SD	18,8	26,6	0
17	La Serena [El Romeral]	-29,755	-71,258	162	CEAZA	2004	Horaria	985	Si	8,7	19,6	0
18	Mincha Sur	-31,590	-71,420	50	CEAZA	2013	Horaria	994	Si	7,0	13,0	0
19	Ovalle [Talhuén]	-30,592	-71,248	292	CEAZA	2013	Horaria	968	Si	11,4	17,7	-1
20	Pan de Azúcar [INIA]	-30,067	-71,233	135	CEAZA	2004	Horaria	990	Si	7,6	11,9	-1
21	Pelambres - Caimanes	-31,931	-71,139	445	CEAZA	2005	Horaria	SD	SD	8,6	SD	-1
22	Peñablanca	-30,901	-71,554	370	CEAZA	2013	Horaria	959	Si	17,8	23,4	0
23	Pichasca	-30,413	-71,903	670	CEAZA	2013	Horaria	925	Si	5,6	10,8	-1
24	Pichidangui	-32,131	-71,531	40	CEAZA	2014	Horaria	994	Si	18,1	28,2	0
25	Punta Colorada	-29,354	-71,033	379	CEAZA	2013	Horaria	962	Si	9,1	16,3	0
26	Punta de Choros	-29,246	-71,469	1	CEAZA	2011	Horaria	1004	Si	15,0	18,6	-2
27	Quebrada Seca	-30,496	-71,491	111	CEAZA	2012	Horaria	SD	SD	15,5	23,9	-1
28	Rapel	-30,723	-70,773	862	CEAZA	2012	Horaria	905	Si	2,4	8,7	0
29	Salamanca [Chillepín]	-31,890	-70,750	840	CEAZA	2013	Horaria	901	Si	5,0	14,5	-1
30	Tilama	-32,080	-71,160	0	CEAZA	2013	Horaria	943	Si	5,5	12,2	-1
31	UCN Guayacan	-29,967	-71,353	1	CEAZA	2011	Horaria	1003	Si	6,7	7,3	0
32	Vicuña [INIA]	-30,038	-70,697	634	CEAZA	2004	Horaria	932	Si	4,2	8,1	0
33	Colmo	-32,922	-71,442	10	SINCA	2004	Horaria	SD	SD	8,2	SD	-1
34	Concón ENAP	-32,925	-71,516	10	SINCA	2005	Horaria	SD	SD	13,6	SD	0
35	Junta de Vecinos	-32,935	-71,526	10	SINCA	2006	Horaria	SD	SD	8,5	SD	0
36	Las Gaviotas	-32,918	-71,482	10	SINCA	2005	Horaria	SD	SD	8,4	SD	0
37	Puchuncaví	-32,719	-71,407	10	SINCA	2009	Horaria	SD	SD	8,9	SD	0
38	Campiche	-32,736	-71,451	10	SINCA	2002	Horaria	SD	SD	6,7	SD	0
39	La Greda	-32,748	-71,474	10	SINCA	2009	Horaria	SD	SD	7,8	SD	-1
40	Los Maitenes	-32,764	-71,455	10	SINCA	2009	Horaria	SD	SD	6,3	SD	-1
41	Ventanas	-32,742	-71,481	10	SINCA	2013	Horaria	SD	SD	9,2	SD	0
42	Meteorologica Principal	-32,766	-71,484	10	SINCA	2012	Horaria	994	Si	10,4	SD	0
43	Quintero Centro	-32,788	-71,532	10	SINCA	2012	Horaria	SD	SD	7,0	SD	0
44	Loncura	-32,795	-71,496	10	SINCA	2012	Horaria	995	Si	8,6	SD	0
45	Quintero	-32,788	-71,528	10	SINCA	2012	Horaria	SD	SD	9,2	SD	0
46	Quintero Sur	-32,801	-71,483	10	SINCA	2000	Horaria	SD	SD	5,8	SD	0
47	Valle Alegre	-32,808	-71,436	10	SINCA	2000	Horaria	SD	SD	5,1	SD	0
48	Viña del Mar	-33,020	-71,550	10	SINCA	2004	Horaria	993	Si	4,2	SD	0
49	Las Salinas	-33,002	-71,547	20	DGA	SD	15 min	999	Si	16,6	SD	0
50	Santo Domingo	-33,654	-71,612	77	DGAC	1957	Horario	993	Si	12,9	SD	-2
51	Valparaíso	-33,044	-71,612	9	PUCV	SD	5 min	999	Si	35,2	SD	0
52	Viña del Mar	-33,024	-71,550	30	PUCV	SD	5 min	1003	SD	SD	8,0	0
53	Las Cruces	-33,502	-71,634	20	PUC	SD	10 min	996	SD	8,4	15,9	0
54	Qubradilla	-32,388	-71,328	SD	SOPRAVAL	SD	4 min	991	SD	12,5	SD	-1
55	Mariano Alfonso	SD	SD	SD	SOPRAVAL	SD	4 min	988	SD	13,0	SD	-1
56	Rodelillo	SD	SD	SD	DGAC	SD	Diario	SD	SD	SD	SD	-2
57	El Yali 01	-33,750	-71,702	10	UPLA	2013	Horaria	999	Si	SD	SD	-3
58	El Yali 02	-33,749	-71,702	10	UPLA	2014	1 min	1004	Si	SD	SD	-3
59	La Campana	-32,988	-71,143	350	UPLA	2015	10 min	1006	Si	SD	SD	-1
60	Andacollo	-30,228	-71,086	3	SINCA	2009	Horaria	SD	SD	SD	SD	-1
61	Cuncumen	-31,889	-70,629	3	SINCA	2012	Horaria	SD	SD	SD	SD	-1
62	Playa Ancha 01	-33,023	-71,633	60	Ghisolfo	SD	Continuo	996	Si	SD	SD	0
63	Playa Ancha 02	-33,026	-71,633	30	Araya	SD	Continuo	987	Si	SD	SD	0
64	Nicolasa	SD	SD	SD	AGROSU.	SD	Horaria	NO	SD	SD	SD	-1

Anexo 2. Reconstitución de serie de nivel del mar en Valparaíso.

De acuerdo a los datos disponibles en el sitio del Sea Level Station Monitoring Facility (IOC-UNESCO, 2016) en la bahía de Valparaíso, existen tres estaciones operadas por el SHOA para medir el nivel del mar con una frecuencia de 1 min de registro. Cada una de estas estaciones consta de dos sensores de presión y radar para medir las variaciones en la columna de agua. Durante el evento del 8 de agosto de 2015, la estación Valparaíso 1 experimentó un fallo completo en su sensor de presión y un fallo parcial en el sensor de radar, mientras que la estación Valparaíso 2 experimentó una pérdida menor de datos y pudo registrar parte del evento con el sensor de presión. La estación Valparaíso 3 experimentó una pérdida marginal de datos en su registro, pero en general logró un registro casi completo del evento.

Para reconstruir la señal del sensor de presión en la estación 1, se corroboró la coherencia de los registros entre las tres estaciones y sus sensores, mediante el cálculo de correlaciones entre las señales. Se encontraron los siguientes coeficientes de determinación:

- Entre señal de presión de la estación 1 y señal de radar de la estación 1 ($R^2 = 0.977$).
- Entre señal de presión de la estación 1 y señal de presión de la estación 2 ($R^2 = 0.946$).
- Entre señal de presión de la estación 1 y señal de presión de la estación 3 ($R^2 = 0.913$).

En la Figura 1 se muestran los gráficos de dispersión entre cada par de series de datos, la regresión lineal estimada y coeficiente de determinación calculado. Como todos los coeficientes de determinación resultaron cercanos a 1, se usaron las rectas de regresión entre cada serie para superar los datos faltantes en la señal de presión de Valparaíso 1. En la Figura 2 se muestra la señal original (en azul) y la serie reconstruida (en rojo).

Finalmente, el análisis se realizó muestreando cada una hora los registros de nivel del mar, para contar con series equiespaciadas horarias de nivel del mar, presión atmosférica y viento.

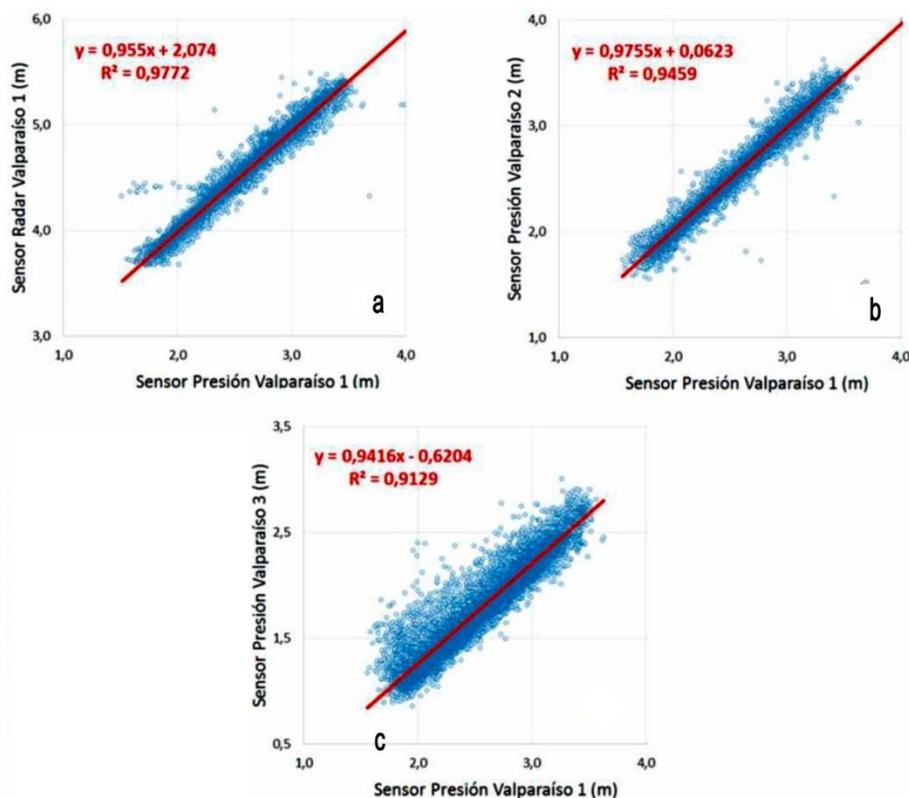


Figura 1. Gráficos de dispersión y regresión lineal de los registros simultáneos para a) sensor de presión y sensor de radar en la estación Valparaíso 1, b) sensores de presión Valparaíso 1 y Valparaíso 2, c) sensores de presión Valparaíso 1 y Valparaíso 3.

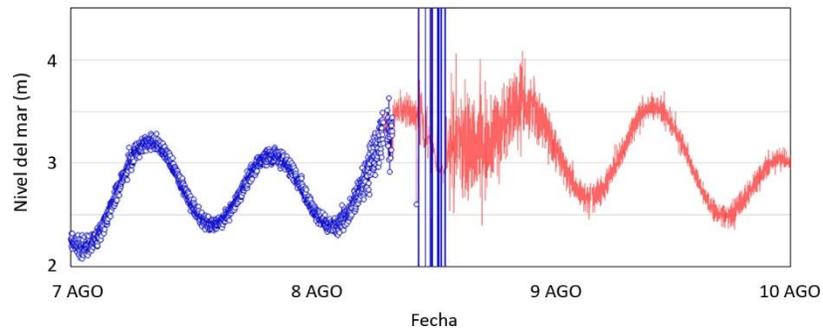


Figura 2. En color azul se muestra la serie original del sensor de presión en la estación Valparaíso 1, que registra el nivel del mar cada 1 min. Se aprecian importantes desnivelaciones que ocurrieron durante el 8 de agosto 2015. La señal original termina en la mañana del día 8. En rojo se muestra la señal reconstruida a partir de sensores cercanos.