

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**CUANTIFICACIÓN DE LOS DAÑOS HISTÓRICOS A INFRAESTRUCTURA
COSTERA POR MAREJADAS EN LAS COSTAS DE CHILE**

RODRIGO CAMPOS C.¹
JOSÉ BEYÁ M.²
MANUEL MENA P.³

RESUMEN

Las marejadas son fenómenos que afectan frecuentemente las costas de Chile causando sobrepasos, cese de operaciones portuarias, daños a infraestructura, naufragios, lesiones y pérdida de vidas humanas. Información sobre las características oceanográficas, comportamiento de largo plazo, efectos y costos de estos eventos extremos es de suma importancia para planificar futuras inversiones en infraestructura costera. En esta contribución se entrega una recopilación exhaustiva en medios de prensa y organismos públicos de eventos de marejadas ocurridos en Chile a partir del año 1924. Se analizan daños, costos y parámetros oceanográficos, lo que permite identificar que los daños son mayores para marejadas de períodos y direcciones medias que se encuentran sobre el promedio de largo plazo de dichos parámetros, y, que marejadas de relativamente baja altura significativa tienen una incidencia importante en los daños registrados. Se espera que esta información sea de utilidad para diseñadores y planificadores de infraestructura costera.

¹Alumno tesista, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso – rodrigo.camposc@alumnos.uv.cl

²Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso – jose.beya@uv.cl

³Encargado de presupuestos, GSI Ingeniería – mmena@gsi.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las marejadas o bravezas de mar se definen como eventos de olas de gran altura formadas por fuertes vientos en el área oceánica o en condiciones locales y que se propagan fuera de la zona de generación llegando a las costas de Chile (Paskoff, 2010). Los eventos de esta naturaleza se presentan con mayor frecuencia en comparación a catástrofes como terremotos y tsunamis, y al mismo tiempo tienen la capacidad de producir diversos efectos dañinos como inundación de zonas costeras, erosión costera en playas y acantilados, efectos en la cota de inundación en playas, efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas, aumento del daño durante inundaciones y tormentas, entre otros (Beyá y Winckler, 2012).

El oleaje en Chile se presenta según las siguientes componentes principales (Scott et al., 2002):

Mar de viento: Generado por condiciones de vientos locales, los cuales varían a lo largo del país.

Mar de fondo reinante: Generado en las latitudes medias del hemisferio Sur por el paso de sistemas ciclónicos. Este tipo de oleaje, en combinación con el mar de viento generado localmente, constituyen los eventos de mayor frecuencia que llegan a las costas de Chile.

Mar de fondo del Norte: Generado en las latitudes medias del hemisferio Norte, el cual se propaga por aproximadamente 15.000 [km] para llegar a la costa chilena. En ocasiones menos frecuentes se genera oleaje de ciclones tropicales que también incide desde el cuarto cuadrante en las costas de Chile.

En general, las condiciones de oleaje en aguas profundas frente a las costas chilenas provienen principalmente desde las direcciones SW y NW y con un menor porcentaje desde el W (Monárdez et al., 2008).

La altura de ola significativa promedio muestra que los valores para este parámetro varía entre 1,8 [m] para el extremo Norte (XV región) y 2,8 [m] Centro-Sur (XIV región). Esto concuerda con lo establecido por Cruz et al. (2009), quienes concluyen que el clima de oleaje en el Sur de Chile es más energético en comparación a la zona Norte.

Para las marejadas que producen daños se esperan alturas de ola por sobre los valores medios. Sin embargo, existen casos en los cuales oleaje proveniente de direcciones menos frecuentes y alturas no excepcionales, es capaz de producir impactos significativos.

Un episodio reciente con grandes perjuicios se presentó en Agosto del año 2015, el cual afectó las zonas costeras desde la región del Bio-Bío hasta la región de Coquimbo, presentando los mayores impactos en la región de Valparaíso. Alturas de ola de hasta 10 metros provocaron diversos daños incluyendo inundación de viviendas, personas fallecidas,

suspensión de operaciones portuarias, daños a infraestructura pública y estructuras costeras (latercera.com, 09/08/2015). En la Figura 1 se aprecian algunos de los daños producidos en distintos puntos de la V región para el evento mencionado.



Figura 1. (A) Valparaíso: Daños sector Caleta Portales(lapatilla.com, 08/08/2015), (B) Viña del Mar: Marejada azotando sector El Caleuche y daños en vía férrea (theclinic.cl, 08/08/2015), (C) Viña del Mar: Sobrepasso y daños restaurant Tierra de Fuego, sector Playa Acapulco (elepicentro.cl, 08/08/2015) y (D) Concón: Daños obras de protección club de yates de Higuierillas (revistanuestromar.cl, 08/08/2018), 8 de Agosto de 2015.

Otros casos relevantes para los que registran daños corresponden a las marejadas de Junio de 1924 (Santibáñez, 1928), Julio 1968 (Araya, 1979), Mayo 1986, Julio 1987, Junio y Julio 1994, Junio 1997, Agosto 2011 y Julio 2013 (prensa nacional). Todos ellos han contado con algún tipo de cobertura informativa en el cual se describe de manera cualitativa los efectos e intensidad de los eventos, aunque no existe un documento que compile toda esta información.

Antaño se pensaba que las marejadas se producían principalmente por efectos de la Luna y el Sol sobre la superficie del mar. Santibáñez (1928) hace referencia al padre Feuillé como la primera persona en estudiar el fenómeno con fines científicos en Chile, observando durante 3 meses en Ilo (ciudad al SW de Perú) las bravesas de mar. Feuillé concluye que éstas siempre ocurrían en los días cercanos a las sicigias de la Luna, cuando la diferencia de las declinaciones del Sol y la Luna es pequeña.

Rodríguez (1937) estudia y describe lo ocurrido en la costa Norte del país para los días 8 y 9 de Agosto de 1929. Los principales perjuicios se presentaron en el puerto de Antofagasta, provocándose la destrucción del molo de abrigo *debido a un fenómeno generado por la*

propagación de “ondas ciclónicas” desarrolladas por un gran temporal que azotó con mayor fuerza la costa Sur y Central del país. Menciona además la interferencia de las ondas de oleaje con las ondas de marea, concluyendo que esto produjo una onda resultante con mayor fuerza vibratoria, a esto se suma la acción de la fuerza de la corriente de Humboldt. Ésta última es destacada por el autor como una de las posibles causantes de daños en presencia de eventos extremos de oleaje en las costas chilenas.

Posterior al nacimiento de la Ingeniería de Costas (década de 1940), el entendimiento de las causas de la generación del oleaje estaba más claro y había sido científicamente estudiado. Araya (1979) señala que “la costa chilena ha sufrido de ataques episódicos e incidentales debido a bravesas de mar o marejadas”. En el estudio se toma como experiencia un evento que se presentó el 25 de Julio de 1968 y del cual se desprende que las marejadas en la costa Occidental Sur de Sudamérica se producen principalmente por tormentas lejanas en el Pacífico Sur, con situaciones favorables para su formación en presencia de frentes cuasi estacionarios a más de 3.200 [km] de la costa y con más de una situación frontal. Esto aseguraría campos de viento de grandes extensiones y larga duración, además de fuerzas suficientes detrás de los frentes para que estos no se debiliten.

Rojas (2001) realiza una recopilación y análisis de antecedentes históricos durante el siglo XX en la provincia de Valdivia. Dentro de los eventos analizados se encuentran las marejadas, las cuales se identificaron como “condiciones de oleaje aparentemente no vinculados a procesos tsunamigénicos”. Se encontró que los sectores más afectados fueron las comunas de Corral y Valdivia. En todos los casos estudiados el oleaje tuvo efectos bastante destructores sobre la infraestructura portuaria, defensas costeras y caminos.

Beyá y Winckler (2012) mencionan brevemente algunos eventos de inundaciones producidos por marejadas en Chile, indicando la escasa información sobre estos eventos y la necesidad de contar con mediciones y bases de datos de oleaje, en especial de eventos extremos.

2. METODOLOGÍA

Utilizando información de los eventos de marejadas identificados por la Armada de Chile entre los años 1979 y 2015, en conjunto con la base de datos de oleaje de aguas profundas ERA-Interim de ECMWF¹ que presenta una estadística desde 1979 a la fecha, se realizó una selección de fechas de posibles eventos de marejadas con daños. Los parámetros presentes en esta base de datos ERA-Interim corresponden a altura significativa (H_s), dirección media (D_m) y periodo medio (T_m) del oleaje en aguas profundas cada 6 horas. Los puntos de extracción de parámetros de oleaje se encuentran a la cuadra de las zonas consideradas, las cuales se mencionan más adelante.

Dada la disponibilidad de información en internet para fechas entre los años 2000 y 2015 se revisaron diversos periódicos electrónicos, principalmente El Mercurio, La Tercera y Radio Biobío, para recopilar información sobre los efectos de la marejadas. Para fechas anteriores

¹European Research Area-European Centre for Medium-Range Weather Forecast

al año 2000 se revisaron los archivos de periódicos impresos en la Biblioteca Nacional de Chile (Santiago) y Biblioteca Santiago Severín (Valparaíso) hasta el año 1979. Adicionalmente y en especial para eventos más recientes se revisó información gráfica y audiovisual de otras fuentes en internet para identificar los efectos de marejadas.

Las zonas costeras consideradas en este estudio están entre la región de Arica y Parinacota y la región de Los Ríos. Esto debido a que en otros sectores no hay presencia significativa de infraestructura costera en la costa abierta al oleaje oceánico, y por lo tanto, muy pocos registros de impactos y daños. El periodo de tiempo considerado es entre los años 1924 y 2015 debido a que el año 1924 presenta el registro histórico más antiguo encontrado (Santibáñez, 1928). Dado que la base de datos de oleaje ERA-Interim y la base de datos de marejadas de la Armada presentan información a partir de 1979, para fechas anteriores se han utilizado las descripciones de lo ocurrido en los eventos pero no se han considerado dentro de los análisis estadísticos de parámetros de oleaje. Cabe destacar que para fechas anteriores a 1979 el análisis es discontinuo.

Se consultó a la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y Superintendencia de Valores y Seguros (SVS) para obtener información de costos de los daños producidos por marejadas. Estas gestiones no fueron exitosas por lo que la información de costos para daños a infraestructura costera se obtuvo: 1) Consultando al Ministerio de Obras Públicas por medio de la Dirección de Obras Portuarias (DOP); 2) A partir de declaraciones de autoridades en sitios web gubernamentales o periódicos; y, 3) Mediante la estimación de costos por la reposición de los daños producidos en cada uno de los casos identificados, utilizando la descripción obtenida de los medios de prensa.

Para este último método, se revisaron las características de cada una de las estructuras afectadas, estimando el porcentaje de pérdida o daño provocado por las marejadas, para luego estimar los costos de reposición de las secciones dañadas en base a información de costos de proyectos de características similares realizados por la empresa GSI.

De las bases de datos ERA-Interim y Armada, se seleccionaron los estados de mar cuyas alturas significativas en aguas profundas fuesen superiores a 3 [m]. Este valor umbral se definió a partir de un análisis preliminar de eventos de marejadas identificados en periódicos online, donde dicho valor corresponde a la mínima altura significativa ocurrida durante los eventos de marejada con impactos importantes.

Una vez seleccionadas las fechas más probables de ocurrencia de marejadas con efectos significativos, se revisaron reportes de prensa 3 días antes y 3 días después del evento para identificar si la marejada produjo daños. También se revisaron aquellos casos en los que se mencionaban temporales de mal tiempo, ya que en gran parte de estos se encontró información sobre eventos de marejadas.

Los parámetros de oleaje para cada una de las fechas identificadas en la revisión de archivos de prensa, fueron obtenidos de la base de datos ERA-Interim en las fechas cercanas al máximo de la marejada. Se consideraron 10 días previos y posteriores a los

eventos, con el fin de analizar la evolución del oleaje dentro del periodo de tiempo en que comienza, se desarrolla y debilita.

Se realizaron cálculos de potencia mediante las ecuaciones (1) y (2) (Cahill & Lewis, 2014), donde P corresponde a la potencia por unidad de ancho de la cresta de ola, H_{m0} a la altura significativa de ola, T_E al periodo energético de ola, T_{02} al periodo medio de oleaje (equivalente a T_m de la base de datos ERA-Interim) y α_j a la relación T_E/T_{02} .

$$P = 0,49H_{m0}^2 T_E \quad (1)$$

$$T_E = \alpha_j T_{02} \quad (2)$$

El valor de α_j fue obtenido de Cahill & Lewis (2014) para el parámetro de forma $\gamma=4,2$ del espectro JONSWAP en las costas de Chile (Beyá y Beyá, 2013), obteniendo un valor de $\alpha_j=1,169$.

Con la información recopilada se elaboró una base de datos con fecha, lugar, información de oleaje, altura significativa espectral, período medio, dirección media, potencia, descripción del efecto, tipo de daño y costo. Esta base de datos fue utilizada para realizar análisis estadísticos geospaciales de tendencias, y correlaciones entre condiciones de oleaje, costos, efectos y daños.

Según la revisión de los medios de prensa y de la bibliografía, los impactos en la costa producidos por marejadas se pueden clasificar y cuantificar según los siguientes indicadores:

Sobrepasos: Número de sectores en los que ocurrió sobrepaso.

Daños a infraestructura costera: Descripción de los daños y costos aproximados de reparación de las estructuras afectadas.

Daños a locales comerciales y viviendas: No fue realizada una evaluación de modo cuantitativo debido a que las fuentes de información no indicaban específicamente cuántas viviendas o locales comerciales habían sido dañados o afectados en cada evento. Por lo tanto, la cuantificación se realizó con base en la ocurrencia o no ocurrencia de este tipo de impacto.

Para cuantificar los daños producidos por marejadas éstos han sido normalizados mediante un índice que consiste en la razón entre el nivel de daño ocurrido para cada evento y el valor máximo para el mismo tipo de daño y localidad. La cuantificación del nivel de daño corresponde a los indicadores de sobrepasos, daño a infraestructura costera y daños a locales comerciales y viviendas, por lo que algunos tipos de daños muestran escalones que se deben a la naturaleza discreta del indicador. Los eventos máximos corresponden a valores unitarios del índice normalizado.

Se definen parámetros normalizados de oleaje de la siguiente forma:

Altura normalizada: Altura significativa de ola máxima de la marejada sobre altura de ola de periodo de retorno de 50 años calculada para cada sub-cardinal en las direcciones y para cada región (H_S/H_{50}).

Periodo normalizado: Periodo medio de la marejada sobre el promedio de los periodos medios de todo el registro de la base de datos ERA por región ($T_m/T_{promedio}$).

Dirección normalizada: Diferencia entre dirección media de la marejada y el promedio de las direcciones medias de todo el registro de la base de datos ERA por región ($D_m - D_{promedio}$). Valores positivos y negativos indican condiciones de oleaje proveniente de direcciones más al Norte o más al Sur en comparación al promedio de las direcciones medias para cada región.

Potencia normalizada: Potencia máxima de la marejada sobre el promedio de las potencias de todo el registro de la base de datos ERA por región ($P_m/P_{promedio}$).

Finalmente se presentan tablas y figuras con el análisis de la información incluyendo, incidencia estacional de las marejadas, tabla de parámetros de oleaje por región y de eventos importantes con sus respectivos costos en daño a infraestructura costera y gráficos de índices de daños versus parámetros normalizados del oleaje.

3. ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS DE MAREJADAS

Se logró identificar una totalidad de 117 eventos de marejadas con algún tipo de efecto en las costas chilenas. Del total mencionado, cuatro ocurridos en los años 1924, 1929, 1965 y 1968 corresponden a los registros de marejadas más antiguos encontrados (Santibáñez, 1928; Rodríguez, 1937, Araya 1979 y La Estrella de Valparaíso, 10/08/1965 respectivamente). Para dichos eventos no se encontró información sobre las condiciones de oleaje pero sí sobre los efectos. Posterior a los cuatro años mencionados, el salto cronológico en la investigación es hacia el año 1979, esto debido a que la disponibilidad de información de fechas proporcionada por la Armada de Chile para episodios de marejadas tiene su comienzo en aquella fecha.

En cuanto a la distribución mensual de marejadas, la Figura 2 muestra que la mayor cantidad de eventos ocurren entre los meses de Mayo y Agosto, alcanzando su máximo el mes de Junio. Esto se debe a la presencia de ciclones extratropicales de mayor intensidad generados en latitudes medias del hemisferio sur, los cuales están compuestos por sistemas de baja presión que durante el invierno son más activos e intensos mientras más al Sur se encuentren (Reyes y Romero, 1977; NOAA, 2004). En Chile, principalmente en la zona central, se producen temporales de mal tiempo típicos de estaciones lluviosas que presentan distintas intensidades de viento y en ocasiones pueden ser muy destructivos, con marejadas en las costas e inundaciones en ciudades y campos (MINVU, 1996).

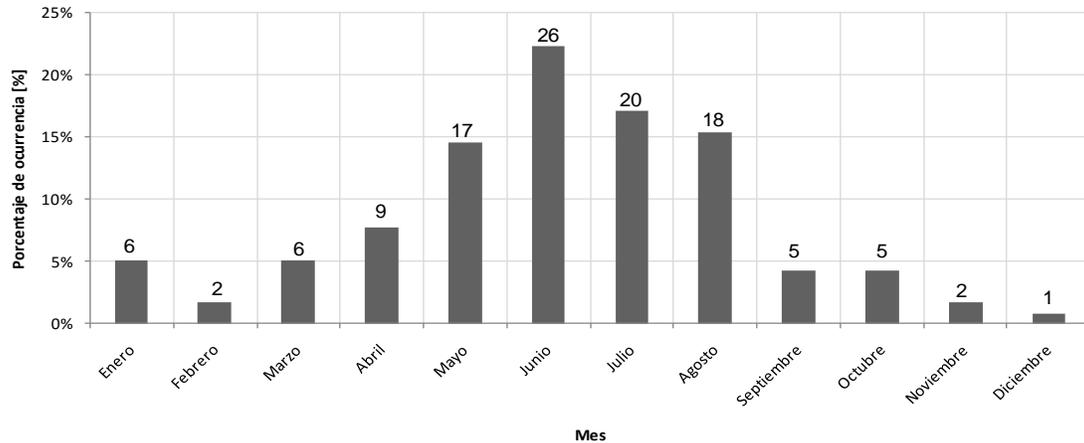


Figura 2. Distribución mensual eventos de marejadas que produjeron daños (valores sobre las barras indican la cantidad de eventos identificados para cada mes).

Considerando la información a partir de 1979 se encontró un total de 113 eventos que produjeron daños, con un promedio de 3,0 eventos por año. En la Tabla 1 se exponen los resultados para valores promedios, máximos y mínimos de los parámetros de oleaje y potencia de las marejadas que producen daños para cada una de las regiones en estudio. Cabe destacar que los valores máximos y mínimos de H_S no son asociados a los máximos y mínimos de T_m .

Los valores más altos de H_S y potencia se alcanzan en la zona Centro y Sur del país, específicamente en las regiones IV, V, IX y XIV, presentándose el mayor promedio en la IX región con 4,65 [m] de altura significativa y 169 [W] de potencia. Para las regiones mencionadas los máximos valores de altura significativa y potencia se alcanzan para los eventos de Agosto 2015 (regiones IV y V), Mayo de 2013 (IX región) y Junio de 1994 (XIV región). Sólo en la IX región cambia el máximo valor de potencia, el cual se presenta para el evento de Julio del año 2013.

Tabla 1. Promedio y rango máximo y mínimo de H_S , T_m , D_m y Potencia de marejadas que produjeron daños por región.

| Región | H_S [m] | T_m [s] | D_m [°] | Potencia [W] |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Media (Máx. – Mín) |
| XV | 3,03 (4,10 – 2,12) | 14,1 (16,6 – 11,7) | 220 (229 – 203) | 79 (144 – 31) |
| I | 2,81 (3,49 – 1,56) | 13,6 (16,4 – 10,7) | 225 (241 – 214) | 68 (113 – 15) |
| II | 3,01 (5,00 – 2,01) | 13,5 (16,4 – 9,6) | 226 (262 – 215) | 77 (229 – 30) |
| III | 2,93 (4,26 – 1,92) | 11,4 (15,7 – 9,1) | 242 (281 – 213) | 63 (138 – 24) |
| IV | 3,41 (6,20 – 2,14) | 11,3 (15,0 – 8,9) | 236 (284 – 205) | 84 (330 – 27) |
| V | 3,56 (7,40 – 1,64) | 11,2 (15,3 – 7,6) | 260 (343 – 203) | 91 (408 – 17) |
| VI | 2,98 (3,07 – 2,89) | 10,1 (10,4 – 9,8) | 219 (221 – 218) | 51 (53 – 50) |
| VII | 4,02 (5,30 – 2,04) | 12,4 (15,8 – 9,2) | 259 (323 – 232) | 131 (244 – 25) |
| VIII | 4,01 (5,68 – 2,45) | 11,1 (15,7 – 7,5) | 269 (342 – 221) | 109 (246 – 35) |
| IX | 4,65 (6,24 – 3,35) | 12,9 (15,6 – 10,5) | 248 (272 – 213) | 169 (305 – 83) |
| XIV | 4,11 (7,77 – 2,10) | 10,5 (13,9 – 8,3) | 268 (338 – 215) | 117 (423 – 22) |

En la zona Norte (regiones XV, I, II y III) los mayores T_m se encuentran entre 15 y 17 [s] y las máximas D_m entre SW y WNW. Para la zona Centro (regiones IV, V, VI y VII) se obtienen T_m máximos entre 10 y 16 [s] y D_m máximas entre SW y NNW. Finalmente, en la zona Sur (regiones VIII, IX y XIV) los máximos T_m se presentan en un rango entre 14 y 16 [s] y D_m máximas para el intervalo W a NNW. Estos resultados revelan que en la zona Centro las marejadas con daños alcanzan T_m máximos en un rango mayor a los demás sectores, y que para la zona Centro-Sur estos eventos alcanzan direcciones menos frecuentes en comparación a las condiciones normales de oleaje en Chile.

En la Figura 3 se exponen las condiciones bajo las cuales ocurren sobrepasos, daños a infraestructura costera y daño a locales comerciales o viviendas. El máximo valor del índice normalizado se alcanza en el evento de Agosto del 2015, es por esto que se aprecian los tres tipos de daño superpuestos y con valor unitario. Junto con esto, el valor de H_{50} es superado en este evento en las regiones II, IV y V. Sin embargo, es importante mencionar que la información de oleaje obtenida para dicha marejada coresponde al modelo de pronóstico Wavewatch III de NOAA² que tiende a estimar alturas de olas mayores a la base de datos ERA-Interim durante eventos extremos.

Para la relación H_s/H_{50} se obtiene que la mayor cantidad de daños por marejadas ocurre en un intervalo entre 0,4 y 1, con un promedio de 0,65. Los efectos de sobrepasos se encuentran para un valor mínimo de 0,27 en la relación y daño a locales comerciales o viviendas desde 0,41. Los daños a infraestructura costera se presentan para valores superiores a 0,5 indicando que este tipo de daño ocurre para mayores alturas de ola. Estos valores muestran que los efectos de las marejadas se pueden producir para condiciones bastante menos energéticas que las utilizadas típicamente para el diseño de estructuras costeras.

En general, la mayor cantidad de daños se producen para valores superiores a 2 en la relación $P_m/P_{promedio}$. Los mayores valores de este indicador se alcanzan en el evento de Agosto 2015 en las regiones IV y V, alcanzando valores superiores a 10 veces la potencia promedio en las regiones mencionadas.

La relación elaborada para las direcciones y periodos medios del oleaje indica que gran parte de los daños se producen para condiciones con valores superiores al promedio de largo plazo de dichos parámetros para cada zona. A pesar de esto, para todos los tipos de daños existen casos con valores menores a 1 en la relación $T_m/T_{promedio}$.

La influencia de la dirección del oleaje sobre los impactos de las marejadas se debe a que las obras marítimas que se encuentran abrigadas para la dirección reinante están generalmente diseñadas para niveles energéticos menores que las estructuras expuestas al oleaje más frecuente. Un claro ejemplo de esto es la ubicación de algunos de los recintos portuarios del país, los cuales se encuentran orientados hacia el Norte quedando abrigados del mar de viento y fondo del Sur pero expuestos al oleaje del Norte (Scott et al., 2002).

² Datos obtenidos de www.windguru.cz

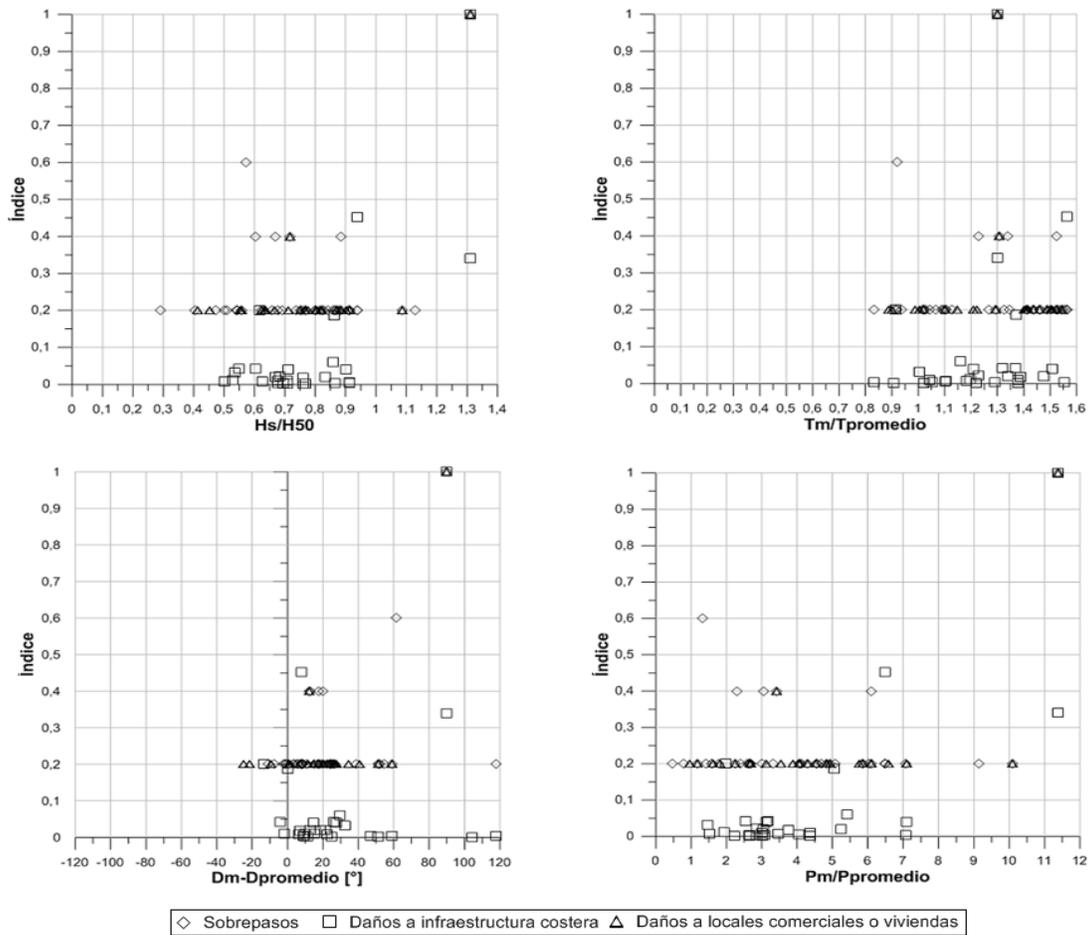


Figura 3. Relación de los parámetros de oleaje paramarejadas con los tipos e índices normalizados de daños.

La recopilación de información sobre los costos estimados para la reposición de las obras costeras dañadas expuesta en la Tabla 2 permite establecer que la V región presenta el mayor costo asociado a reparación de infraestructura, principalmente en infraestructura de paseos costeros en Viña del Mar y Reñaca junto con obras portuarias en Valparaíso.

El 8 de Agosto del 2015, se produjeron grandes daños en diferentes puntos a lo largo de la zona costera entre Valparaíso y Concón. Los costos para reparar todos perjuicios fueron declarados con un valor aproximado de 5.000 millones en el sector público y 1.830 millones de pesos en sector privado (El Mercurio de Valparaíso, 12/08/2015), haciendo de este el caso de daño a infraestructura costera con el mayor impacto económico dentro de los eventos identificados, el que presenta el mayor valor en las relaciones H_s/H_{50} y $P_m/P_{promedio}$ dentro de los daños a obras y proveniente de una dirección cercana al NW. Otros casos destacados se presentaron en Antofagasta (3 de Julio de 2013), Chañaral (9 de Agosto de 1929) y Coquimbo (13 de Marzo de 2011), en todos ellos los costos asociados superan los mil millones de pesos.

| Día | Mes | Año | Hs [m] | Tm [s] | Dm [°] | Región | Lugar | Efecto | Costo estimado [M\$] |
|--------------|--------|------|--------|--------|--------|--------|---------------------------|---|----------------------|
| 4 | Junio | 1924 | | | | II | Pisagua | Destrucción total muelle 4 perteneciente a la compañía salitrera Aguada. | 250.000 |
| 4 | Junio | 1924 | | | | II | Antofagasta | Destrucción de 30 [m] de parapeto en molo del puerto. | 160.000 |
| 8 | Junio | 1924 | | | | III | Chañaral | Destrucción malecón y mitad muelle Casa Francesa. | 400.000 |
| 9 | Agosto | 1929 | | | | III | Chañaral | Destrucción del malecón fiscal del puerto. | 1.200.000 |
| 9 | Agosto | 1929 | | | | II | Antofagasta | Destrucción de obras marítimas del puerto. | 600.000 |
| 10 | Agosto | 1965 | | | | V | Viña del Mar/Valparaíso | Sobrepaso y daños en Av. Perú. Socavón en Av. La Marina. Destrucción cuartel de 4ª cía de bomberos. Daños en muros de sanatorio en 15 Norte. Destrucción de defensas balneario Recreo. | Sin Información |
| 25 | Julio | 1968 | | | | V | Viña del Mar | Daños en Av. Perú y La Marina. | 7.000 |
| 9 | Marzo | 1983 | 2,56 | 13,7 | 243 | I | Iquique | Destrucción de 50 metros del muelle del recinto naval. | 105.000 |
| 1 | Mayo | 1986 | 3,78 | 13,4 | 238 | V | Valparaíso | Defensas costeras dañadas en Av. Altamirano. | 104.000 |
| 20 | Mayo | 1986 | 3,56 | 12,9 | 246 | IV | La Serena | Oleaje erosionó base de Faro Ornamental de La Serena y en la madrugada los dos torreones que dan hacia el poniente cedieron hundiéndose varios centímetros. | 15.000 |
| 7 | Mayo | 1987 | 3,01 | 10,0 | 258 | V | Valparaíso | Daños menores en costanera de Valparaíso. | 160.000 |
| 12 | Julio | 1987 | 4,45 | 8,3 | 343 | V | Valparaíso | Diversos daños en parque costero Juan de Saavedra, algunas veredas destruidas. | 17.000 |
| 13 | Julio | 1987 | 3,90 | 9,1 | 329 | V | Valparaíso | Daños en asfalto de muelle Pratt. | 3.000 |
| 24 | Agosto | 1992 | 3,42 | 14,6 | 219 | I | Iquique | Daños en los avances de emisario. | 936.000 |
| 7 | Mayo | 1993 | 4,46 | 10,7 | 248 | VIII | Llico | El fuerte oleaje derribó un muro de contención. | 50.000 |
| 12 | Agosto | 1994 | 4,24 | 13,7 | 237 | XIV | Corral | Construirán enrocado en el sector La Aguada-Corral. En uno de los últimos temporales ocurridos en la zona, la fuerza de las olas barrió con el terraplén del camino, sacando piedras y material. | 208.000 |
| 14 | Agosto | 1996 | 4,84 | 11,5 | 263 | XIV | Corral | Destrucción de una parte del muelle que se encontraba en construcción. | 42.000 |
| 21 | Junio | 1997 | 5,68 | 11,9 | 263 | VIII | Caleta El Maule | Fisuras en muro de contención. | 300.965 |
| 13 | Junio | 2003 | 3,41 | 13,7 | 251 | V | Valparaíso | En caleta El Membrillo se dañó el muelle e inundaron obras de remodelación. | 210.000 |
| 18 | Junio | 2003 | 2,83 | 11,8 | 231 | V | Valparaíso y Viña del Mar | Socavones en calles y avenidas. | 40.000 |
| 14 | Junio | 2010 | 4,48 | 10,9 | 280 | VIII | Coronel | Inclinaciones de tierra. | 20.000 |
| 13 | Marzo | 2011 | 3,52 | 9,1 | 208 | IV | Coquimbo | Daños en costanera. | 1.000.000 |
| 18 | Junio | 2011 | 4,79 | 11,0 | 284 | V | Maitencillo | Destrucción de borde costero y locales comerciales en playa El Abanico. | 25.000 |
| 10 | Agosto | 2011 | 3,36 | 14,6 | 228 | II | Antofagasta | En el sector de Villa Azul, las olas derribaron un muro de contención. | 90.000 |
| 16 | Agosto | 2012 | 4,03 | 10,2 | 276 | V | Reñaca | Daños en restaurant Terrazas de Alfredo. | 5.000 |
| 17 | Agosto | 2012 | 4,02 | 12,1 | 253 | V | Viña del Mar | Pérdidas en daños municipales. | 200.000 |
| 29 | Mayo | 2013 | 3,92 | 12,2 | 237 | V | Viña del Mar | Daños en Av. Perú. | 10.000 |
| 3 | Julio | 2013 | 4,71 | 14,8 | 244 | V | Reñaca | Daños públicos en Reñaca. | 100.000 |
| 4 | Julio | 2013 | 4,16 | 16,4 | 229 | II | Antofagasta | Daños en molo de abrigo: deslizamiento de rocas, socavamiento de material y caída de muro de contención de olas en el brazo perpendicular a la costanera y de bloques en el sector del faro. Pérdida de roca en escollera de protección y desalineamiento de su eje longitudinal. | 2.264.734 |
| 4 | Julio | 2013 | 5,30 | 15,2 | 248 | VII | Constitución | Daños en muelle Maguelines. | 200.000 |
| 4 | Julio | 2013 | 3,82 | 16,6 | 226 | XV | Arica | La fuerza del mar envió las protecciones costeras hacia el pavimento del camino. | 19.000 |
| 31 | Enero | 2014 | 2,68 | 8,4 | 215 | V | Viña del Mar | Olas derriban poste de luz en Av. Perú. | 3.800 |
| 1 | Abril | 2014 | 3,10 | 12,1 | 231 | VII | Pelluhue | Memorial del 27F cae en Pelluhue. | 55.000 |
| 2 | Julio | 2014 | 4,69 | 14,2 | 243 | VIII | Cobquecura | Daño a puente camino costero en Cobquecura. | 50.000 |
| 2 | Julio | 2014 | 4,69 | 14,2 | 243 | VIII | Coronel | Embarcación golpea muelle peatonal produciendo daños. | 12.000 |
| 6 | Agosto | 2015 | - | - | - | XIV | Lago Ranco | Marejadas destruyeron costanera. | 100.000 |
| 8 | Agosto | 2015 | 7,4 | 13,0 | 315 | V | Viña del Mar | Desplazamiento de unidades de coraza en protección club de yates de Recreo, destrucción de club de submarinistas de Valparaíso. Colapso de rompeolas principal en 3 secciones en club de yates de Higuierillas. Daños en restaurant Tierra de Fuego, Amura y Chez Gerald. | 1.830.000 |
| 8 | Agosto | 2015 | 7,4 | 13,0 | 315 | V | Valparaíso y Viña del Mar | Diversos daños a infraestructura costera en caleta Portales, Laguna Verde, caleta El Membrillo, paseo Juan de Saavedra, Paseo Wheelwright, paseo costero de Viña del Mar (entre muelle Vergara y playa del Deporte), Av. La Marina y playa Las Torpederas. | 5.000.000 |
| TOTAL | | | | | | | | | 15.792.499 |

Tabla 2. Fecha, parámetros de oleaje, lugar, efecto y costo estimado por daños a infraestructura costera.

Los costos estimados de daños por marejadas identificados para el año 2015 alcanzan una cifra de \$6.830.000.000. Al comparar esto con la inversión realizada por la Dirección de Obras Portuarias para el año 2014, la cual es cercana a 56 mil millones de pesos (DOP-MOP, 2014), se obtiene que los daños generados corresponden a un 12%.

4. CONCLUSIONES

Los análisis estadísticos para los eventos de marejadas con daños identificados muestran que éstos se presentan con mayor frecuencia durante los meses de Mayo y Agosto, con ocurrencia máxima en el mes de Junio. Los mayores promedios de altura de ola significativa de marejadas que producen daños se presentan en la zona Sur del país (regiones VII, VIII, IX y XIV) con valores sobre los 4 [m], periodos medios de 10 a 13 [s] y direcciones medias entre WSW y W.

Los índices de daños elaborados muestran que no existe una clara relación entre las alturas de ola, la mayor generación de daños y los costos estimados para reparación de infraestructura costera. Por otra parte, la relación de los índices de daños y la diferencia entre la dirección media de cada evento de marejadas y el promedio de las direcciones medias, indica que el oleaje produce más impactos cuando proviene de direcciones más hacia el Norte que el promedio, pero no necesariamente mayores costos asociados a reparaciones de infraestructura dañada.

Los daños generados por marejadas se producen para un amplio rango de valores de la potencia del oleaje donde se puede alcanzar valores que superan 10 veces la potencia promedio y la mayor cantidad de daños se producen para potencias superiores a 2 veces el promedio. Como es de esperarse, la relación de los índices de daños con las alturas y potencias normalizadas presentan tendencias similares.

La V región presenta un mayor registro en la cantidad de infraestructura costera dañada y los mayores costos asociados a la reparación de obras. En la zona Norte, específicamente en Antofagasta, Chañaral y Coquimbo, también se presentan costos elevados por daños a infraestructura, en los cuales los perjuicios económicos superan los mil millones de pesos. El porcentaje obtenido entre los costos por daños el año 2015 y la inversión realizada por la Dirección de Obras Portuarias el año 2014 representa un valor considerable tomando en cuenta que es un costo que se debe asumir junto con todas las demás obras que se pretenden ejecutar.

Cabe destacar que existe incertidumbre en los parámetros de oleaje, ya que estos dependen de la base a datos a utilizar. Mediciones de largo de la costa que permitan contrastar los valores de las bases de datos y en lo posible constituir una base de datos de oleaje confiable y de largo plazo permitirían reducir significativamente dicha incertidumbre.

Adicionalmente, también existe incertidumbre en la identificación de las marejadas. Es posible que algunos impactos no hayan podido ser detectados a pesar del análisis exhaustivo realizado para las bases de datos de marejadas de la Armada y Era-Interim y la

búsqueda de artículos de prensa. La estimación de costos también constituye una aproximación que tiene una incertidumbre asociada.

El presente trabajo corresponde a un primer esfuerzo en la cuantificación de los impactos de las marejadas en Chile. Para investigaciones futuras se recomienda continuar realizando análisis con bases de datos de oleaje que representen mejor las condiciones extremas. La inclusión de mediciones de boyas, características espectrales y otros fenómenos que puedan aportar daños como marea meteorológica y astronómica, junto con una continuación en la recopilación de información contribuiría a mejorar este estudio. Esto es posible en la medida de obtener una mayor colaboración en la entrega de información por parte de las instituciones pertinentes con el fin de ampliar y mejorar los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al equipo del proyecto Fondef-Idea “Un Atlas de Oleaje para Chile” y a CONICYT por su financiamiento, Armada de Chile, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), Ministerio de Obras Públicas-Dirección de Obras Portuarias (MOP-DOP), GSI ingenieros consultores y Empresa Portuaria de Valparaíso (EPV).

REFERENCIAS

Araya, J. 1979. Las incidencias cataclísmicas de las bravesas en la evolución de la costa de Chile central. Departamento de Geografía, Universidad de Chile.

Beyá, I. y Beyá, J. 2013. Variación del parámetro de acentuación del máximo del espectro sintético JONSWAP ajustado a mediciones de oleaje frente a las costas de Chile central. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXI Congreso Chileno de Hidráulica.

Beyá, J. y Winckler, P. 2012. Inundaciones costeras, más allá de los tsunamis. XII Jornadas Francisco Javier Domínguez. SOCHID, Chile.

Cahill, B. & Lewis, T. 2014. Wave period ratios and the calculation of wave power. Proceedings of the 2nd Marine Energy Technology Symposium.

Cruz, J. 2008. Ocean wave energy, current status and perspectives. Springer Series in Green Energy and Technology.

Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas (DOP-MOP) 2014. Balance de gestión integral año 2014.

Empresa Portuaria de Antofagasta (EPA) 2013. Memoria anual año 2013.

Latercera.com, (09/08/2015). <http://www.latercera.com/noticia/nacional/2015/08/680-642196-9-temporal-deja-dos-fallecidos-y-marejadas-son-las-mas-violentas-de-ultimos-35.shtml> [accesada el 29 de Septiembre de 2015].

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) 1996. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos.

National Oceanic & Atmospheric Administration, Hurricane Research Division (NOAA) 2004. ¿Qué es un ciclón extratropical? http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A7_esp.html [accesada 8 de Agosto de 2015].

Monárdez, P., Acuña, H. y Scott, D. 2008. Evaluation of the Potential of Wave Energy in Chile. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2008. Estoril, Portugal.

Paskoff, R. 2010. Capítulo 9.1: Geomorfología de la costa de Chile. En. Geología marina de Chile. Díaz-Naveas, J., Frutos, J. (2010).

Prensa Nacional.

Reyes, E. y Romero, H. 1977. Climatología e interacción océano-atmósfera en la bahía de Valparaíso. Revista Biología Marina, Departamento de Oceanología, Universidad de Chile, 16 (2): 125-159.

Rodríguez, J. A. 1937. Fenómeno oceánico ocurrido en la costa Norte. Anuario Hidrográfico Marítimo de Chile n°36: 169-179.

Rojas, C. 2001. Eventos naturales extremos durante el siglo XX en la provincia de Valdivia, Sur de Chile. Instituto de Geociencias, Universidad Austral de Chile.

Santibáñez, J. 1928. Una braveza de mar en la costa de Chile. Anuario Hidrográfico Marítimo de Chile n°34: 615-656.

Scott, D., Resio, D. y Pantoja, C. 2002. Swell Propagation and Nearshore Wave Climate. Documento de la base de datos del Coastal Hydraulics Laboratory (CHL) USACE.

Servicio de Empresas (SEP), Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. <http://www.sepchile.cl> [accesada 11 de Agosto de 2015].