

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

VII SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

PROPUESTA DE ESCALA DE INTENSIDAD DE DAÑOS DE MAREJADAS

RODRIGO CAMPOS CABA¹, JOSÉ BEYÁ MARSHALL² y MAURICIO MOLINA PEREIRA²

1. RESUMEN

Se realizó una recopilación exhaustiva de episodios de marejadas que generaron daños o impactos en las costas de Chile, entre los años 1823 y 2015. La búsqueda de información se llevó a cabo en organismos gubernamentales, archivos de prensa y publicaciones científicas. La base de datos generada permite identificar que el efecto registrado con mayor frecuencia debido a marejadas corresponde a los cierres de puertos, lo cual limitaría la operatividad de los recintos portuarios a lo largo de la costa chilena. Adicionalmente, se han analizado los porcentajes de ocurrencia simultánea de uno o más tipos de daños en los episodios, donde la mayor relación porcentual se encuentra para la alteración de condiciones de tránsito.

Finalmente, se propone una escala de intensidad de daños por marejadas, permitiendo la categorización de los episodios en base al nivel de daño ocurrido y registrado en las fuentes de información mencionadas anteriormente. La aplicación de la escala propuesta indica que los episodios con mayor intensidad de daños ocurrieron en los años 1965 y 2015, ambos en el mes de agosto. Se espera que la escala propuesta sea de utilidad para categorizar las marejadas futuras y tanto, de pronóstico como después de ocurridas.

¹Ingeniero Civil Oceánico, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. r.camposcaba@gmail.com

²Profesor auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. jose.beya@uv.cl, mauricio.molina@uv.cl

2. INTRODUCCIÓN

El uso sustentable del territorio costero debe garantizar la definición de las zonas potenciales de inundación y el diseño eficiente de las obras costeras, para esto es necesario considerar el comportamiento de las condiciones extremas de oleaje, con el fin de incorporarlas de manera íntegra en la definición de soluciones (Winckler et al., 2015).

Las costas de Chile han estado expuestas a eventos de marejadas a lo largo de su historia, presentando diferentes condiciones de oleaje que son capaces de provocar diversos niveles y tipos de daños (Araya-Vergara, 1979). Episodios recientes como los ocurridos el 3 de julio de 2013 y 8 de agosto de 2015 han dejado en evidencia la exposición de los emplazamientos costeros, la cual aumenta a medida que se construye sin atender a la naturaleza de las marejadas (Winckler et al., 2015; Campos-Caba, 2016).

En episodios de marejadas, los daños se producen principalmente por diferencias de presión, fuertes vientos y condiciones de oleaje que producen un aumento en el nivel de marea meteorológica. A esto se suma la sobre-elevación del nivel del mar en sectores con oleaje rompiente y el impacto de olas de gran altura sobre la infraestructura costera, que provocan sobrepasos y socavación en obras de protección, llegando a desplazar unidades de coraza o incluso destruyendo secciones de las estructuras. Durante las marejadas que producen daños generalmente se producen alturas de ola por sobre valores medios. Sin embargo, existen casos con condiciones de oleaje proveniente de direcciones menos frecuentes y alturas no excepcionales capaces de producir impactos significativos (Campos-Caba, 2016 *op.cit.*).

Las escalas de evaluación de fenómenos climáticos permiten categorizar cada uno de los eventos, ya sea respecto al daño que causan una vez ocurrido el episodio o para alertar a las comunidades que puedan resultar damnificadas y así tomar los resguardos necesarios. En países que constantemente son afectados por fenómenos climáticos, esto ha sido una gran herramienta para tener una visión clara de los posibles escenarios que se puedan presentar, como los son la escala de impactos por *storm-surge* en sectores costeros (Needham & Keim, 2011) y la escala Saffir-Simpson de vientos en huracanes (Schott et al., 2012), ambas en Estados Unidos.

Actualmente en Chile no se dispone de una escala para la evaluación de daños generados en episodios de marejadas. En esta contribución se presentan los resultados de una revisión exhaustiva de antecedentes históricos de sucesos de marejadas, lo cual ha permitido analizar los tipos de daños más frecuentes en estos episodios con el fin de plantear una escala que permita categorizar la intensidad de los daños una vez ocurrido el evento de marejada. Cabe destacar que el presente documento corresponde a mejora del trabajo realizado por Campos-Caba (2016), quien realizó un primer acercamiento a la propuesta de una escala de intensidad de daños por marejadas, la cual ha sido modificada para una mejor aplicación.

3. METODOLOGÍA

Los episodios de marejadas analizados corresponden a aquellos que hayan presentado algún tipo de daño o impacto en las costas de Chile. El territorio costero considerado para el estudio abarca desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Los Ríos, sin considerar sectores insulares, entre los años 1823 y 2015.

3.1 Identificación de episodios

Utilizando los registros de episodios de marejadas de 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, se seleccionaron los estados de mar cuyas alturas significativas (H_s) cumplen con los valores mínimos por rangos de dirección de eventos de marejadas que producen daños (Tabla 1). De esta forma, se obtienen fechas de posibles episodios de marejadas con daños y/o impactos dentro de la base de datos de la Armada de Chile. Los umbrales expuestos fueron definidos a partir de un análisis preliminar de episodios de marejadas identificados en periódicos *online* desde el año 2000, donde los valores de H_s expuestos en la Tabla 1 corresponden a las condiciones mínimas por región durante los episodios de marejada con impactos importantes.

Tabla 1: Valores mínimos de altura significativa de oleaje (2000-2015) por rangos de dirección para identificación de marejadas que producen daños.

Región	180 - 225 [°]	225 - 270 [°]	270 - 360 [°]
	H_s [m]	H_s [m]	H_s [m]
XV	2,10	-	-
I	2,20	1,50	-
II	2,60	2,00	2,00
III	2,70	2,00	1,96
IV	2,62	2,50	2,14
V	2,67	1,64	1,64
VI	2,89	-	2,00
VII	2,67	-	2,04
VIII	3,97	3,00	2,45
IX	4,70	-	3,30
XIV	4,18	2,39	2,10

Una vez seleccionadas las fechas más probables de ocurrencia de marejadas con efectos significativos dentro de la base de datos de la Armada de Chile, se revisaron reportes de prensa 3 días antes y 3 días después del evento para identificar si la marejada produjo daños. Este procedimiento fue realizado para fechas anteriores al año 2000, utilizando los archivos de periódicos impresos en la Biblioteca Nacional de Chile (Santiago) y Biblioteca Santiago Severín (Valparaíso) hasta el año 1979.

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Disponible en: [http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim]. Accesada 30 de agosto de 2016.

Cabe destacar que para la IX región no se cuenta con registro de marejadas dentro de la base de datos de la Armada de Chile, por lo tanto no se efectuó la revisión previa al año 2000 para dicha zona.

Los episodios previos al año 1979 fueron identificados con información disponible en diferentes sitios de internet, archivos de periódicos impresos y fuentes bibliográficas (Araya-Vergara, 1979; Brito, 2009; Rodríguez, 1937; Santibáñez, 1928).

3.2 Antecedentes históricos de daños por marejadas

Según la revisión de los medios de prensa y de fuentes bibliográficas, los daños y/o impactos en la costa producidos por marejadas se pueden clasificar en:

- Suspensión de actividades costeras (buceo, recolección de orilla y deportes náuticos)
- Cierres de puertos
- Daño a embarcaciones mayores y menores
- Sobrepasos
- Inundaciones en calles
- Alteración de tránsito vehicular
- Daños a la integridad física humana
- Daños a locales comerciales y viviendas
- Daños a infraestructura costera
- Otro tipo de daños (principalmente erosión de playas, impedimento de búsqueda de personas desaparecidas y comunidades aisladas)

En total se han identificado 201 sucesos de marejadas con algún tipo de daño en las costas de Chile, entre 1823 y 2015. En la Tabla 2 se exponen 34 episodios en base a la ocurrencia simultánea de los diferentes tipos de daños mencionados anteriormente, en una o más de las regiones consideradas para el estudio. Los episodios que han presentado una mayor cantidad de daños de forma simultánea corresponden a los ocurridos en agosto de los años 1965 y 2015, en los cuales se identificaron 10 de los 11 tipos de daños analizados. Otros episodios de marejadas en los cuales se encontraron registros de diversos tipos de daños ocurrieron en mayo de 1986, junio de 1997 y julio de 2013. Todos los sucesos mencionados presentaron daños en diversos sectores costeros a lo largo de la extensión territorial considerada, pero no han sido evaluados o categorizados en una base de datos que mida la intensidad de los daños en los episodios de marejadas.

Los casos en los cuales se identificó sólo cierre de puertos, daño a embarcaciones, daño a la integridad física humana u otro tipo de daños, se agruparon en la parte inferior de la Tabla 2 y en conjunto alcanzan una cifra de 114 episodios. Los 53 sucesos restantes que no son expuestos tuvieron efecto sólo en una de las regiones estudiadas y no presentaron daños a infraestructura costera o daño a locales comerciales y viviendas. El listado completo de todos los episodios identificados, junto con la descripción detallada de daños puede ser revisado en Campos-Caba (2016).

Tabla 2: Eventos seleccionados con mayor cantidad de daños.

	Regiones afectadas	Tipo de daño o impacto										
		Suspensión actividades costeras	Cierre de puertos	Daño embarcaciones menores	Daño embarcaciones mayores	Sobrepeso	Daño a infraestructura costera	Inundaciones en calles	Daño a locales comerciales y viviendas	Alteración de tránsito	Daño a integridad física humana	Otro
04-06-1924	XV; I; II; III; IV			+		+	+					
09-08-1929	II; III; V						+		+			
08-08-1965	XV; II; III; IV; V; VIII	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
25-07-1968	V	+		+		+	+	+	+			
02-02-1983	IV						+					+
09-03-1983	I; IV	+		+			+					+
27-05-1985	XV; I; II		+	+		+			+			+
01-05-1986	I; II; III; IV; V; VIII	+		+		+	+		+		+	+
20-05-1986	XV; II; IV; XIV		+				+					+
07-05-1987	V; XIV			+			+				+	
10-07-1987	V; VIII; XIV		+	+		+	+				+	
25-07-1987	XV; I; II; III; IV; VIII		+	+	+	+						
24-08-1992	I; II		+	+		+	+					
07-05-1993	VII; VIII					+	+					
20-06-1994	XV; XIV		+					+	+			
14-08-1996	XIV			+			+					
04-06-1997	IV; V; VII; VIII		+	+					+		+	+
20-06-1997	I; II; III; IV; V; VI; VII; VIII		+	+		+	+		+		+	+
18-08-1997	I; II; III; IV; V		+	+		+					+	
09-09-2000	V; VIII		+	+			+				+	
13-06-2003	II; IV; V; VII; VIII		+	+		+	+		+			
18-06-2003	V; VII; VIII; XIV		+				+					
03-01-2006	II; V								+		+	
08-06-2006	II; IV		+			+			+			
12-03-2011	IV; VI; VIII		+			+	+					
18-06-2011	V		+			+			+			
08-08-2011	XV; I; II; IV; V		+	+		+			+		+	+
16-08-2012	I; II; V		+		+	+		+	+			
28-05-2013	IV; V; IX		+				+		+			+
03-07-2013	XV; I; II; III; IV; V; VII; VIII; IX		+	+		+	+	+	+	+	+	+
31-01-2014	I; V		+			+	+					
01-07-2014	XV; I; II; VIII; IX		+	+			+					+
08-08-2015	XV; II; IV; V; IX; XIV	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
15-12-2015	V					+			+			
47*			+									
30**				+								
19***					+							
9****											+	
9*****												+

*Cantidad de episodios con ocurrencia sólo de cierre de puertos a partir de 1905.

**Cantidad de episodios con ocurrencia sólo de daño a embarcaciones menores a partir de 1847.

***Cantidad de episodios con ocurrencia sólo de daño a embarcaciones mayores a partir de 1827.

****Cantidad de episodios con ocurrencia sólo de daño a integridad física humana a partir de 1993.

*****Cantidad de episodios con ocurrencia sólo de otro tipo de daños a partir de 1972.

3.3 Propuesta de escala de intensidad de daños de marejadas

La Tabla 2 muestra que los episodios de marejadas se pueden presentar en uno o más sectores costeros y al mismo tiempo tienen la capacidad de generar uno o más tipos de daños simultáneamente. No obstante, esto no garantiza que un episodio de marejada haya presentado mayor intensidad de daños en comparación a otro sólo por registrar una mayor cantidad de tipos de daños. Junto con esto, la intensidad del oleaje en aguas profundas no siempre es proporcional a la intensidad de los efectos en la línea de costa, producto de la configuración geográfica, exposición del sitio afectado, niveles de marea del momento, características espectrales del oleaje, duración del evento, entre otros factores. Es por esto que, al igual que la escala de percepción sísmica de Mercalli (Wood & Neumann, 1931), es necesaria una escala que permita evaluar y categorizar la intensidad de los daños provocados por marejadas, utilizando información histórica de los registros de daños que se han presentado en las costas de Chile.

Se ha utilizado como referencia la escala modificada de Mercalli, la Escala Saffir-Simpson para vientos en huracanes y la escala de impactos por *storm-surge* en sectores costeros, las cuales se definen a continuación:

Escala modificada de Mercalli: es una escala de 12 grados que mide la intensidad de los terremotos a través de la observación empírica de los efectos y/o daños generados a estructuras (Wood & Neumann, 1931).

Escala Saffir-Simpson para vientos en huracanes: es una escala que categoriza de 1 a 5 la intensidad de los huracanes y los daños que puedan ocurrir. Ha sido una excelente herramienta para alertar a las comunidades sobre los posibles impactos dependiendo de la intensidad de este fenómeno. La escala indica ejemplos del tipo de daño e impactos en los Estados Unidos asociados con la intensidad del viento. La máxima velocidad del viento sostenida a 10 [m] de altura asociada con el huracán o ciclón es el factor determinante en cada categoría (Schott et al., 2012).

Escala de impactos por *storm-surge* en sectores costeros: consiste en índices que proveen información de los impactos potenciales por inundación mediante cuatro categorías, en las cuales van en aumento los impactos destructivos. Los diferentes niveles de daños dependen de la altura de marea meteorológica en la costa del golfo de Estados Unidos (Needham & Keim, 2011).

Es importante mencionar que la escala propuesta en este trabajo no correlaciona el proceso físico de las marejadas con los daños ocurridos, sino que se plantea desde el punto de vista de los daños identificados en la recopilación de hechos históricos. Debido a esto, la escala de intensidad de daños por marejadas no es análoga a las escalas Saffir-Simpson y de impactos por *storm-surge*, las cuales sí tienen asociado el factor físico dentro de su planteamiento, por lo tanto se han utilizado sólo como referencias bibliográficas.

Adicionalmente, se han analizado los porcentajes de ocurrencia de los tipos de daños en los episodios de marejadas identificados y la relación existente en la ocurrencia simultánea entre cada uno de los tipos de daños. Esto permite jerarquizar la ocurrencia y niveles de daños a medida que aumentan las categorías dentro de la escala propuesta. Cabe destacar que se ha

asumido que los daños registrados son netamente por marejadas, pero se debe considerar que existen variables que pueden propiciar la ocurrencia de daños, como son el viento, condiciones de operatividad de embarcaciones, tecnologías constructivas de infraestructura costera y el mantenimiento de estas. Debido a esto, dentro de la escala de intensidad de daños propuesta no se ha considerado el daño a la integridad física humana, ya que corresponde a un factor no necesariamente ligado a los efectos de las marejadas, sino que está influenciado por la decisión de las personas a exponerse ante estas condiciones adversas de oleaje. Tampoco se ha considerado la categoría "Otro tipo de daños", debido a que es información dispersa y con poco nivel de detalle, dificultando su categorización dentro de la escala.

En la Figura 1 se expone el porcentaje de casos identificados para cada tipo de daño o impacto considerado dentro de la elaboración de la escala de intensidad de daños. La mayor cantidad de registros se identificó para los cierres de puertos, con el 24% del total de episodios de marejadas con daños. En segundo lugar se encuentra el daño a embarcaciones menores, con el 20%. Con menores porcentajes de ocurrencia se encuentran daños a embarcaciones mayores y sobrepasos, con un promedio de 10%.

Dentro de los tipos de daños que se han registrado con menor frecuencia en las fuentes de información consultadas se encuentra la suspensión de actividades costeras, la cual se espera que sea el primer efecto en eventos de marejadas y por lo tanto el que se presente con mayor regularidad. Esto ya que para suspender faenas se buceo, recolección de orilla o deportes náuticos se necesitan condiciones de oleaje menos extremas en comparación a los demás tipos de daños analizados, pero esto no siempre es registrado por los medios de prensa u otras fuentes informativas.

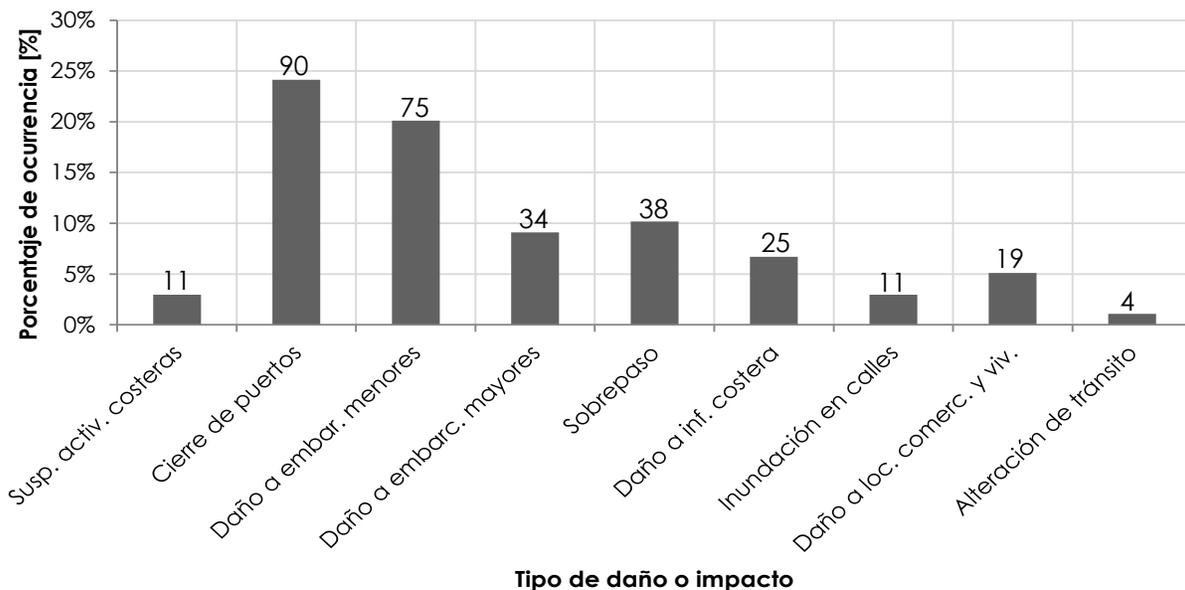


Figura 1: Porcentaje de ocurrencia de daños (valores sobre las barras indican cantidad de veces que se encontraron registros).

La Tabla 3 presenta las relaciones porcentuales de ocurrencia simultánea entre cada uno de los tipos de daños, determinada mediante probabilidad condicional. Los mayores valores se alcanzan en la comparación de cortes de tránsito con la ocurrencia conjunta de los demás tipos de daños, llegando a 100% de ocurrencia simultánea con inundaciones en calles. Es importante destacar que la alteración de tránsito vehicular en sectores cercanos a la línea de costa pueden ser decretados debido a condiciones de oleaje de gran intensidad que generan sobrepaso complicando el tránsito normal de vehículos² o como medida preventiva ante los avisos de eventos de marejadas generados por la Armada de Chile³.

Los menores valores porcentuales se presentan al comparar cada uno de los tipos de daños con el daño a embarcaciones mayores. Esto se debe principalmente a que bajo pronósticos de marejadas los buques y embarcaciones de mayor tonelaje reciben órdenes de salir a la gira para evitar posibles daños, mientras que en la línea de costa se presentan efectos como sobrepaso o incluso daño a infraestructura costera⁴.

Tabla 3: Relación porcentual de ocurrencia simultánea entre cada uno de los tipos de daños analizados.

		Tipo de daño o impacto								
		Suspensión actividades costeras	Cierre de puertos	Daño embarcaciones menores	Daño embarcaciones mayores	Sobrepaso	Daño a infraestructura costera	Inundación en calles	Daño a locales comerciales y viviendas	Alteración de tránsito
Tipo de daño o impacto	Suspensión actividades costeras	-	36%	45%	0%	45%	45%	27%	36%	18%
	Cierre de puertos	4%	-	27%	6%	26%	16%	6%	14%	3%
	Daño embarcaciones menores	7%	32%	-	12%	21%	20%	8%	13%	4%
	Daño embarcaciones mayores	0%	15%	26%	-	15%	0%	6%	3%	0%
	Sobrepaso	13%	61%	42%	13%	-	34%	16%	34%	8%
	Daño a infraestructura costera	20%	56%	60%	0%	52%	-	16%	36%	12%
	Inundación en calles	27%	45%	55%	18%	55%	36%	-	55%	36%
	Daño a locales comerciales y viviendas	21%	68%	53%	5%	68%	47%	32%	-	16%
	Alteración de tránsito	50%	75%	75%	0%	75%	75%	100%	75%	-

² Radio Biobio online. Disponible en: [<http://rbb.cl/54nc>]. Accesada 25 de agosto de 2016.

³ Radio Cooperativa online. Disponible en: [goo.gl/xupv28]. Accesada 25 de agosto de 2016.

⁴ Corporación ciudadana, red nacional de emergencia. Disponible en: [goo.gl/DgQ6QW]. Accesada 27 de agosto de 2016.

4. RESULTADOS

Los niveles de intensidad de los tipos de daños en cada una de las categorías de la escala se han considerado como: Ninguno (0), Menor (1), Mayor (2) y Grave (3). En la Tabla 4 se expone la aplicación de la intensidad para cada uno de los daños considerados:

Tabla 4: Intensidad de daños para cada tipo de efecto por marejadas.

Tipo de daño	Daño menor (1)	Daño mayor (2)	Daño grave (3)
Suspensión de actividades costeras	Realización con dificultades	Actividades realizables sólo por personas de muchas experiencias	Prohibición completa (Imposibilidad de realización)
Cierre de puertos	Cierre para embarcaciones menores	Cierre para embarcaciones menores y cese de actividades en embarcaciones mayores	Cierre para todo tipo de embarcaciones y embarcaciones mayores a la gira
Daño a embarcaciones	Daños leves fácilmente reparable o corte de amarras	Daños mayores reparables o varamiento de embarcaciones	Destrucción o naufragio de embarcaciones
Sobrepaso	Sólo un punto con sobrepaso ocasional	Sobrepaso intermitente en diversos puntos	Sobrepaso permanente en múltiples puntos
Daño a infraestructura costera	Daños leves Reparación opcional	Daños mayores Reparación obligada	Destrucción Requiere reconstrucción
Inundación en calles	Formación esporádica de pozas sólo en camino costero	Inundación de camino costero y propiedades contiguas	Formación de flujos que desplazan objetos hasta calles aledañas y propiedades
Daño a locales comerciales y viviendas	Daños leves sin compromiso estructural	Daños mayores con compromiso estructural	Destrucción Requiere reconstrucción
Alteración de tránsito	Reducción velocidades de tránsito	Interrupción de tránsito	Corte de tránsito

La escala propuesta ha quedado definida por 7 categorías de intensidad de daños por marejadas, con jerarquización de los tipos y nivel de daños a medida que aumentan las categorías (Tabla 5). Es importante destacar que la escala propuesta no evalúa la magnitud de daños en base a los pronósticos de parámetros de oleaje en las marejadas, sino que categoriza la intensidad de daños una vez que el episodio ya ha ocurrido en una determinada zona costera.

Se aprecia que en el primer nivel de intensidad sólo se presenta suspensión de actividades costeras, lo cual ocurre para condiciones de oleaje menos extremas. En la intensidad 2 se incluyen los cierres de puertos y los daños a embarcaciones menores, y desde la intensidad 4 comienzan los efectos sobre infraestructura costera con condiciones de oleaje que generan sobrepaso. Finalmente, la intensidad 7 considera todos los tipos de daños en los máximos niveles de daños expuestos en la Tabla 4.

En la jerarquización de daños se ha considerado como último efecto la alteración de condiciones de tránsito vehicular, ya que como se pudo ver en la Tabla 3 es el tipo de efecto que presenta el mayor porcentaje de ocurrencia conjunta con los demás tipos de daños.

Tabla 5: Escala de intensidad de daños de marejadas.

		Intensidad						
		1	2	3	4	5	6	7
Tipo de daño o impacto	Suspensión actividades costeras	1	2	3	3	3	3	3
	Cierre de puertos	0	1	2	3	3	3	3
	Daño embarcaciones mayores	0	1	2	3	3	3	3
	Daño embarcaciones menores	0	0	1	2	3	3	3
	Sobrepaso	0	0	0	1	2	3	3
	Daño a infraestructura costera	0	0	0	0	1	2	3
	Inundaciones en calles	0	0	0	0	1	2	3
	Daño a locales comerciales y viviendas	0	0	0	0	1	2	3
	Alteración de tránsito	0	0	0	0	1	2	3

4.1 Categorización de episodios históricos

La escala elaborada permite categorizar cada una de las zonas afectadas en un mismo episodio, logrando identificar las regiones que presentan registros de episodios de marejadas con los efectos más dañinos. En la Tabla 6 se exponen los cinco eventos más intensos según los registros encontrados y categorizados con la escala de intensidad de daños.

El episodio de agosto de 1965 avanzó de Sur a Norte, específicamente desde las regiones VIII a XV. Los registros de prensa de aquella época indican que fue uno de los temporales de viento y lluvia más violentos de las últimas décadas (El Día, 10/08/1965). Junto con esto, se menciona que los efectos fueron devastadores, estimándose sus daños superiores a los que causó el terremoto del 28 de marzo de aquel año (La Estrella de Valparaíso, 12/08/1965).

Con efectos similares, en agosto del año 2015 se vieron afectadas las zonas costeras desde la región del Biobío hasta la región de Coquimbo, presentando los mayores impactos en la región de Valparaíso. Alturas de ola de hasta 10 [m] provocaron diversos daños, incluyendo inundación de viviendas, personas fallecidas, suspensión de operaciones portuarias y daños a infraestructura costera pública y privada (Campos et al., 2015). Ambos episodios alcanzan intensidad 7 en la V región.

Tabla 6: Los cinco eventos con mayor nivel de daño categorizados con Escala de intensidad de daños por marejadas (números romanos indican regiones administrativas de Chile).

Fecha	Regiones afectadas y daños registrados	Intensidad de daños
10-08-1965	<p>XV: Cierre de puerto para embarc. menores y cese de actividades en embarc. mayores; II: Sobrepaso permanente en múltiples puntos, daños mayores a infraestructura costera, hundimiento de 7 embarc. menores; III: Daños leves a infraestructura costera, daños mayores y naufragio de embarc. menores, daños mayores a embarc. mayor; IV: Daño mayor y destrucción de infraestructura costera, cierre de puerto para todo tipo de embarc., destrucción y naufragio de embarc. menores, inundación de caminos costeros y propiedades contiguas; V: Sobrepaso permanente en múltiples puntos, destrucción de infraestructura costera, daños mayores a locales comerciales y viviendas, cierre de puertos para todo tipo de embarc., naufragio de embarc. menores, inundación de caminos costeros y propiedades contiguas, corte de tránsito; VIII: Sobrepaso permanente en múltiples puntos, destrucción infraestructura costera, destrucción de locales comerciales y viviendas, cierres de puertos para todo tipo de embarc., destrucción de embarc. menores y varamiento de embarc. mayores.</p>	<p>XV: 2; II: 6; III: 5; IV: 7; V: 7; VIII: 7</p>
08-08-2015	<p>XV: Suspensión de actividades costeras; II: Sobrepaso intermitente en diversos puntos, daños mayores a infraestructura costera, interrupción de tránsito; IV: Cierre de puerto para embarcac. menores y cese de operaciones para embarc. mayores, sobrepaso intermitente en diversos puntos, daños leves a infraestructura costera; V: Sobrepaso permanente en múltiples puntos, destrucción de infraestructura costera, múltiples daños a obras públicas y privadas entre Valparaíso y Viña del Mar, cierre de puertos para todo tipo de embarc., daños mayores a embarc. menores, daños mayores a locales comerciales, formación de flujos que desplazan objetos hasta calles aledañas y propiedades, corte de tránsito; IX: Daños mayores a infraestructura costera; XIV: Sobrepaso intermitente en diversos puntos y daño mayor a infraestructura costera.</p>	<p>XV: 3; II: 6; IV: 5; V: 7; IX: 5; XIV: 5</p>
03-07-2013	<p>XV: Sobrepaso intermitente, daños leves a infraestructura costera, reducción velocidades de tránsito; I: Sobrepaso intermitente, daños leves a locales comerciales, cierre de puerto para todo tipo de inundación, inundación de viviendas, interrupción de tránsito; II: Cierre de puerto para todo tipo de embarcaciones, sobrepaso permanente en múltiples puntos, formación de flujos que desplazan objetos, corte de tránsito, destrucción de infraestructura costera; III: Cierre de puerto para todo tipo de embarc.; IV: Cierre de puerto para todo tipo de embarcaciones; V: Sobrepaso permanente en diversos puntos, inundación y daños mayores a locales comerciales, cierre de puertos para todo tipo de embarc.; VII: Inundación y daños leves a viviendas, naufragio de embarc. menores, daño mayor a infraestructura costera; VIII: Sobrepaso intermitente e inundación de viviendas.</p>	<p>XV: 5; I: 6; II: 7; III: 4; IV: 4; V: 6; VII: 6; VIII: 5</p>
04-06-1924	<p>XV: Daño mayor a embarc. menores; I: Daño mayor y destrucción de embarc. menores; II: Destrucción de infraestructura costera; III: Destrucción de infraestructura costera, destrucción de embarc. menores; IV: Sobrepaso intermitente en diversos puntos, varamiento de embarc. menores.</p>	<p>XV: 4; I: 4; II: 7; III: 7; IV: 4</p>
09-08-1929	<p>II: Daño mayor a infraestructura costera; III: Daño mayor a infraestructura costera; V: Daños leves a viviendas.</p>	<p>II: 6; III: 6; V: 5</p>

Por otra parte, el episodio de julio del año 2013 alcanzó la máxima intensidad en la II región debido a severos daños en el molo de abrigo del puerto de Antofagasta. Los efectos para este suceso ocurrieron en las zonas costeras desde la región de Aysén hasta la región de Arica y Parinacota, llegando incluso hasta el límite con Perú⁵.

El episodio del 4 de junio de 1924 generó daños principalmente entre las regiones XV y IV, con daños en obras de protección y sitios de atraque en las regiones II y III, además de daños a una gran cantidad de embarcaciones en Arica (Santibáñez, 1928). El último suceso expuesto, ocurrido en agosto de 1929, tuvo las mayores consecuencias en la costa norte del país, con daños a infraestructura portuaria en las regiones II y III (Rodríguez, 1937), los cuales no alcanzan la máxima categoría en la escala de intensidad de daños propuesta.

5. DISCUSIÓN

A pesar de la búsqueda exhaustiva de episodios de marejadas en diferentes fuentes de información, es posible que existan sucesos que no hayan sido identificados, por lo cual se recomienda seguir recopilando información que permita continuar con futuros estudios. En relación a esto, la escala de intensidad de daños propuesta presenta un nivel de incertidumbre asociado a las descripciones de daños obtenidas en medios de prensa u otras fuentes informativas no especializadas en el área marítima.

Adicionalmente, los niveles de daños identificados a infraestructura costera están limitados a las tecnologías constructivas bajo las cuales se llevaron a cabo las obras a lo largo del periodo de tiempo considerado en este estudio. El mantenimiento de las estructuras también juega un rol importante, ya que el deterioro de estas las hace estar propensas a sufrir distintos niveles de daños sin que las condiciones de oleaje sean tan extremas.

Lo descrito anteriormente también es aplicable para el daño a embarcaciones, ya que en las descripciones de los registros de daños no se menciona en qué condiciones se encontraban las naves dañadas en los distintos episodios. Dado esto, se deja en claro que los daños a embarcaciones se encuentran condicionados al mantenimiento de las naves, las condiciones de operatividad y las maniobras realizadas al verse expuestas a condiciones extremas de oleaje.

En la elaboración de la escala propuesta se ha buscado considerar la relación existente en la ocurrencia jerárquica de los tipos de daños. Esto se visualiza en el inicio de inundación de calles cuando las condiciones de sobrepaso son mayores, las cuales pueden llegar a generar daño menor en locales comerciales y viviendas, dependiendo de la ubicación de este tipo de estructuras y la presencia o ausencia de obras de protección en la línea de costa. Los medios de prensa no registran esta sucesión de efectos regularmente y se centran principalmente en el daño de mayor impacto dentro de la comunidad afectada, sin atender a los mecanismos que generan este tipo de efectos. Debido a esto, con la escala propuesta se han jerarquizado los daños de modo que exista una visión más clara sobre la ocurrencia conjunta de estos, dejando en claro que existe una sucesión de efectos que pueden desencadenar en graves daños.

⁵ La Tercera online. [goo.gl/tMrhMz] Accesada 29 de agosto de 2015.

Los efectos en episodios de marejadas vinculados a la interacción con diferentes tipos de estructuras costeras dependen de los métodos constructivos y exposición del factor a evaluar, por ello no ha sido posible asociar parámetros de oleaje a la escala. Esto implica también que las relaciones entre uno u otro tipo de daño presenten cambios derivados de los avances de las tecnologías constructivas. De esta forma, es posible que a medida que transcurra el tiempo, condiciones de oleaje que actualmente generan daños a infraestructura disminuyan sus impactos, pero al mismo tiempo continúen generando otros tipos de efectos daño a embarcaciones o daño a integridad física humana (factor no incluido en la escala). Esto modificaría las relaciones de ocurrencia simultánea de daños expuestas en la Tabla 3.

Los efectos no considerados en la propuesta final de la escala adicionan un alto grado de incertidumbre al incluirlos en las categorizaciones. En el caso del daño a integridad física humana, dado que es un efecto que no depende completamente de las marejadas, resulta complejo asignar categorías de la escala, sin lograr cuantificar una subestimación o sobreestimación de la categoría asignada. En el caso de los efectos incluidos en "otro tipo de daños", el nivel de detalle de la información se ha considerado insuficiente para la aplicación de la escala. Dentro de este último grupo mencionado se han incluido los casos de erosión de playas, pero se encontraron pocos registros y con bajo nivel de detalle en las descripciones de terrenos afectados, lo que ha imposibilitado considerar este efecto específico en la escala.

Futuros desarrollos de la escala elaborada permitirían vincularla a pronósticos de condiciones de oleaje, unificando los avisos de eventos de marejadas emitidos por la Armada de Chile con la escala de intensidad de daños propuesta. Mediante esto, sería posible establecer los tipos y niveles de daños en las zonas potencialmente afectadas. Esta información sería de gran ayuda para las comunidades costeras, las cuales tendrían una visión más clara de los tipos de avisos que se generan, conociendo los posibles daños y facilitando los resguardos necesarios. Junto con esto, las entidades gubernamentales serían capaces de focalizar los esfuerzos de planes preventivos u obras de protección costera, haciendo más eficiente el desarrollo y uso del borde costero.

6. CONCLUSIÓN

Las fuentes de información consultadas han permitido generar una base de datos de episodios de marejadas en las costas de Chile entre los años 1823 y 2015, logrando identificar los diferentes tipos de daños generados por estas condiciones extremas de oleaje y permitiendo el planteamiento de una escala de intensidad de daños por marejadas. El efecto que se ha registrado con mayor frecuencia corresponde a los cierres de puertos (24% del total), seguido del daño a embarcaciones menores. Por otra parte, la alteración del tránsito vehicular presenta un alto porcentaje de ocurrencia conjunta con los demás tipos de daños, con valores entre 50% y 100%, excepto al vincularla con el daño a embarcaciones mayores.

Los tipos de daños fueron jerarquizados y se les asignaron niveles de gravedad, con lo cual se propone una escala que evalúa la intensidad de los daños una vez ocurridos los eventos de marejadas. Esto permite categorizar los sucesos identificados, logrando determinar que los episodios de mayor intensidad de daños ocurrieron en agosto de los años 1965 y 2015, ambos con categoría máxima de daños en la V región.

Para la validación de la escala propuesta en otros lugares del mundo se recomienda analizar información histórica de daños en el lugar de interés, esto permitiría identificar posibles modificaciones a la escala dependiendo del lugar geográfico en el cual se desee evaluar.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen la colaboración del Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y Dirección de Obras Portuarias (DOP).

8. REFERENCIAS

Araya-Vergara, J. 1979. Las Incidencias Cataclísmicas de las Bravezas en la Evolución de la Costa de Chile Central. Departamento de Geografía, Universidad de Chile.

Brito, J. L. 2009. Catástrofes Históricas Naturales y Causadas por el Hombre Ocurridas en el Territorio de San Antonio entre 1556 y el 2008.

Campos, R., Beyá, J. & Mena, M. 2015. Cuantificación de los Daños Históricos a Infraestructura Costera por Marejadas en las Costas de Chile. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Campos-Caba, R. 2016. Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Proyecto de título para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Chile.

Needham, H. & Keim, B. 2011. Storm Surge: Physical Processes and an Impact Scale. Recent Hurricane Research-Climatology, Dynamics and Societal Impacts.

Prensa nacional

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

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

Schott, T., Landsea, C., Hafele, G., Lorens, J., Taylor, A., Thurm, H., Ward, B., Willis, M., & Zaleski, W. 2012. The Saffir-Simpson Hurricane Scale.

Winckler, P., Contreras, M., Beyá, J. & Molina, M. 2015. El Temporal del 8 de Agosto de 2015 en la Bahía de Valparaíso. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

Wood, H. & Neumann, F. 1931. Modified Mercalli Intensity Scale of 1931.