

ANÁLISIS DE MAREJADAS HISTÓRICAS Y RECIENTES EN LAS COSTAS DE CHILE

RODRIGO V. CAMPOS CABA

Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico
Agosto 2016



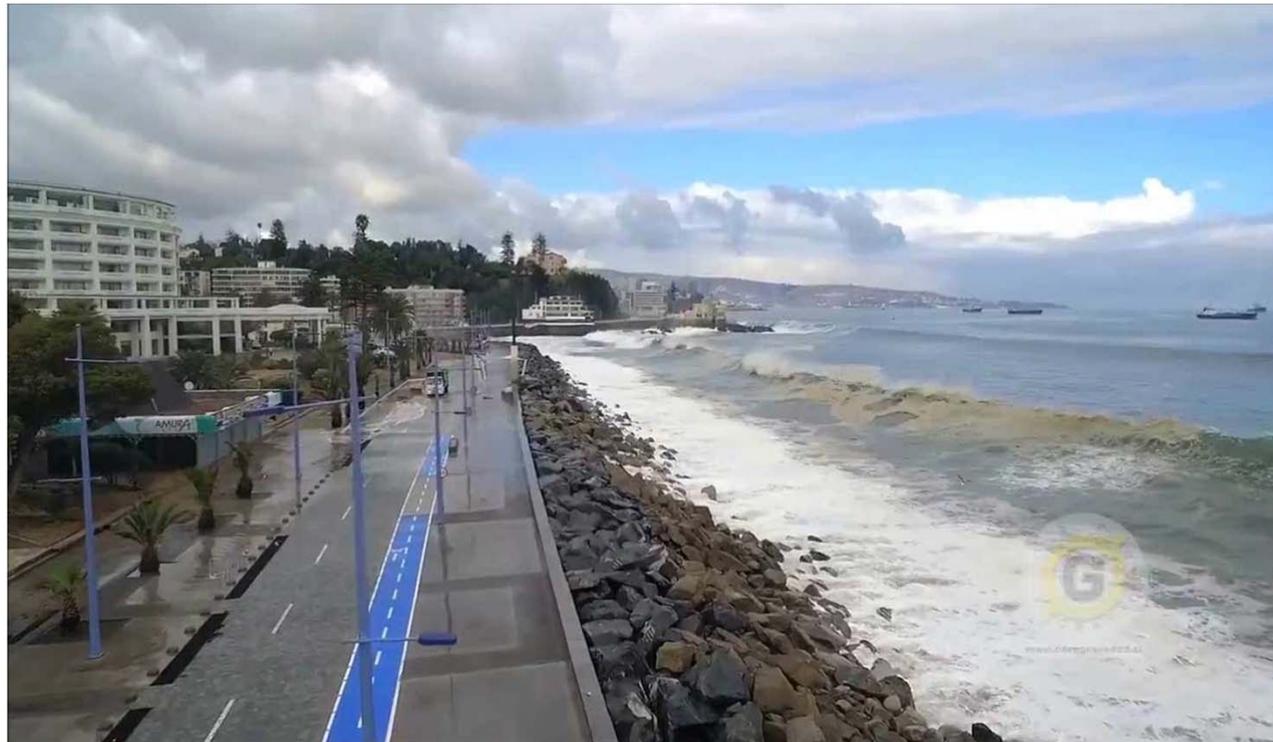
RESUMEN

Estudio consiste en una recopilación, análisis y caracterización de eventos de marejadas con daños y/o impactos en las zonas costeras de Chile, entre los años 1823 y 2015.

- Recopilar registros de eventos de marejadas que hayan producido daños y/o impactos a lo largo del tiempo en las costas de Chile.
- Recopilar y caracterizar parámetros de oleaje en aguas profundas para los eventos identificados.
- Determinar relaciones entre daños y parámetros de oleaje en aguas profundas.
- Cuantificar los daños y/o impactos producidos por los eventos de marejadas identificados.
- Analizar influencia de oscilaciones climáticas en la intensidad de las marejadas y daños.
- Analizar tendencias de largo plazo en la ocurrencia de marejadas y daños.

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 los sectores costeros.



Video 1: Marejada enero 2016, Viña del Mar (Fuente: www.youtube.com)

METODOLOGÍA

IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS DE MAREJADAS CON DAÑOS



Figura 1: Registros de marejadas en periódicos online 4
(emol.cl , 14/06/2003; biobiochile.cl, 30/09/2010 y latercera.com, 05/07/2013)

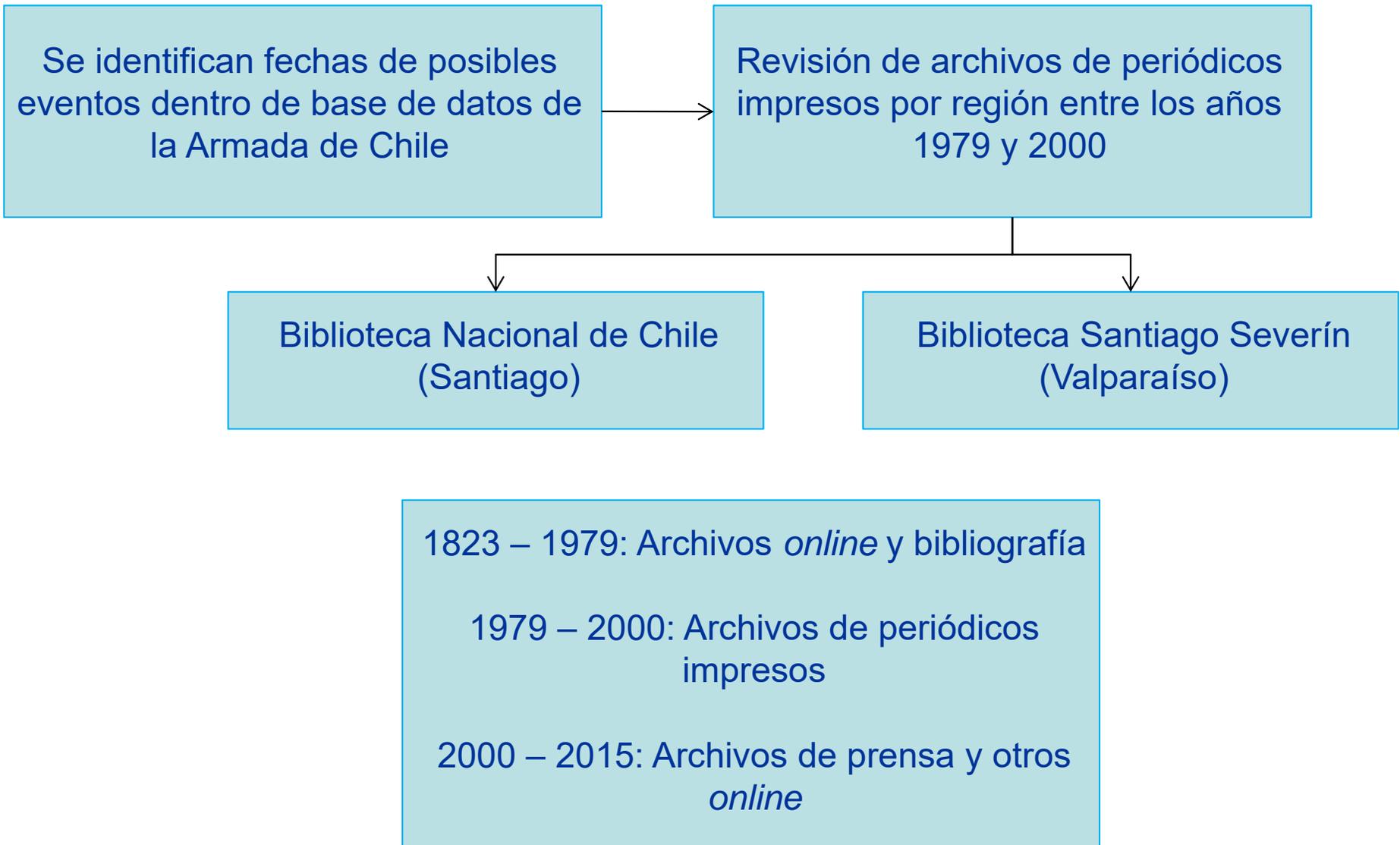




Figura 2: Reportes de marejadas en archivos de periódicos impresos (Biblioteca Nacional de Chile y Biblioteca Santiago Severín)

COMPARACIÓN MEDICIÓN Y MODELOS DE OLAJE

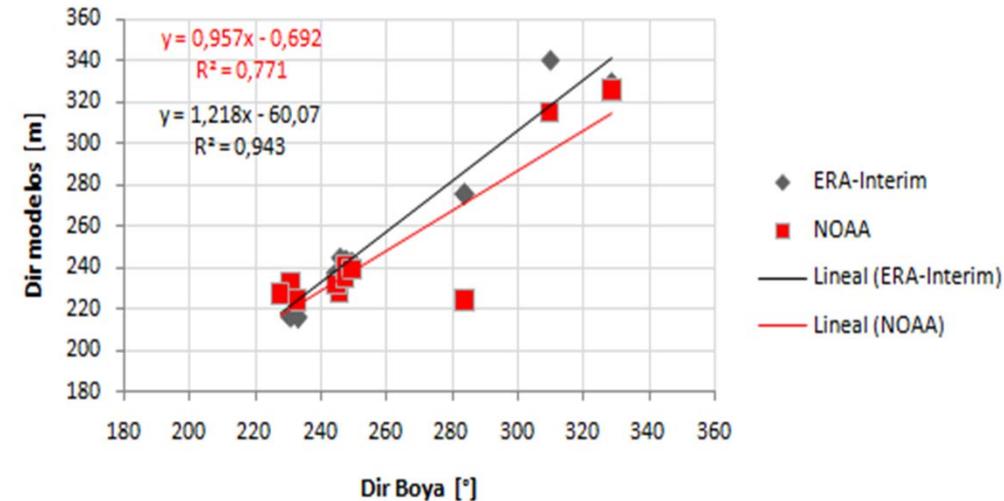
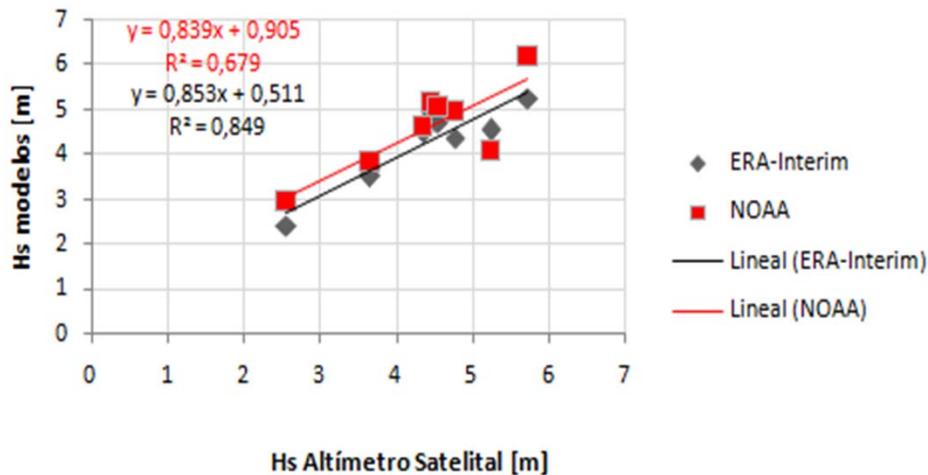
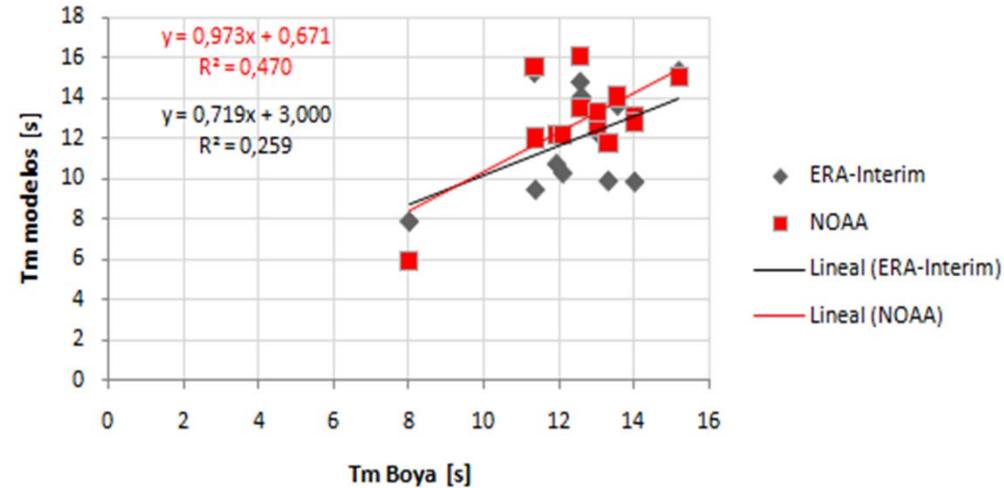
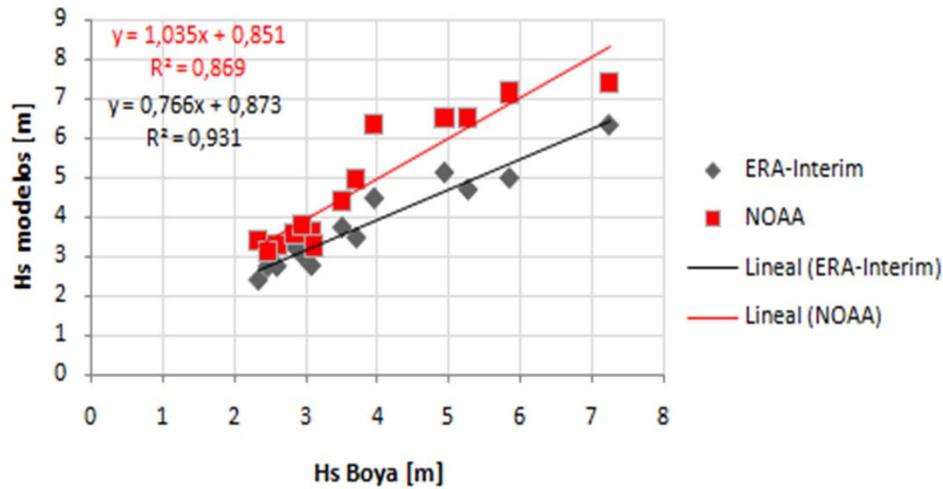
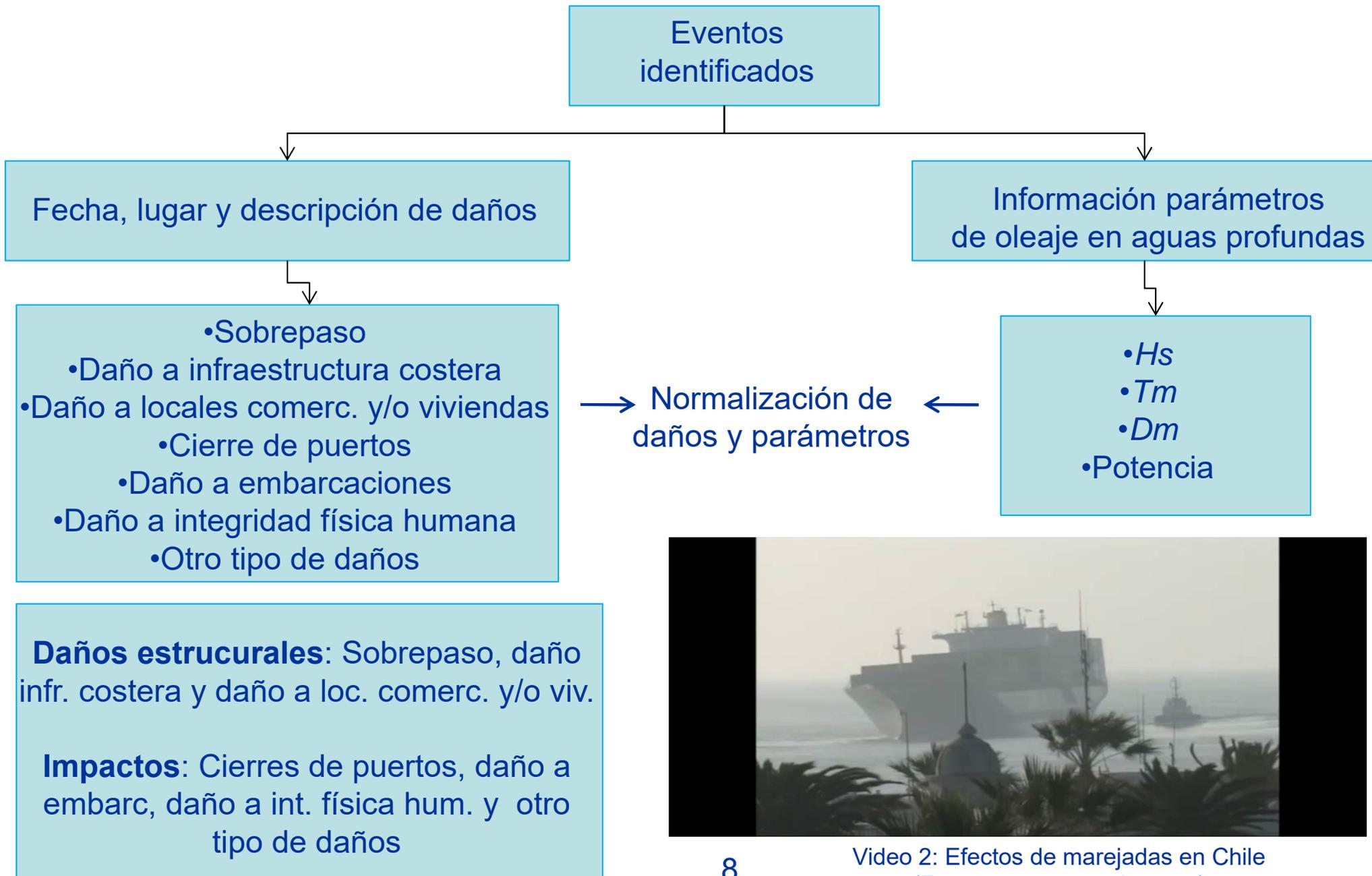


Figura 3: Comparación parámetros de oleaje entre modelos de oleaje y mediciones.



ESCALA DE MAGNITUD DE INTENSIDAD DE DAÑOS POR MAREJADAS

- Escala de vientos en huracanes Saffir-Simpson
- Escala de impactos en sectores costeros por storm-surge
 - Tipos y niveles de daños en cada evento

INCIDENCIA DE DAÑOS POR MAREJADAS

- Incidencia por tipo de daño/Incidencia de toda la data de aguas profundas

COMPARACIÓN EVENTOS ANUALES CON OSCILACIONES CLIMÁTICAS

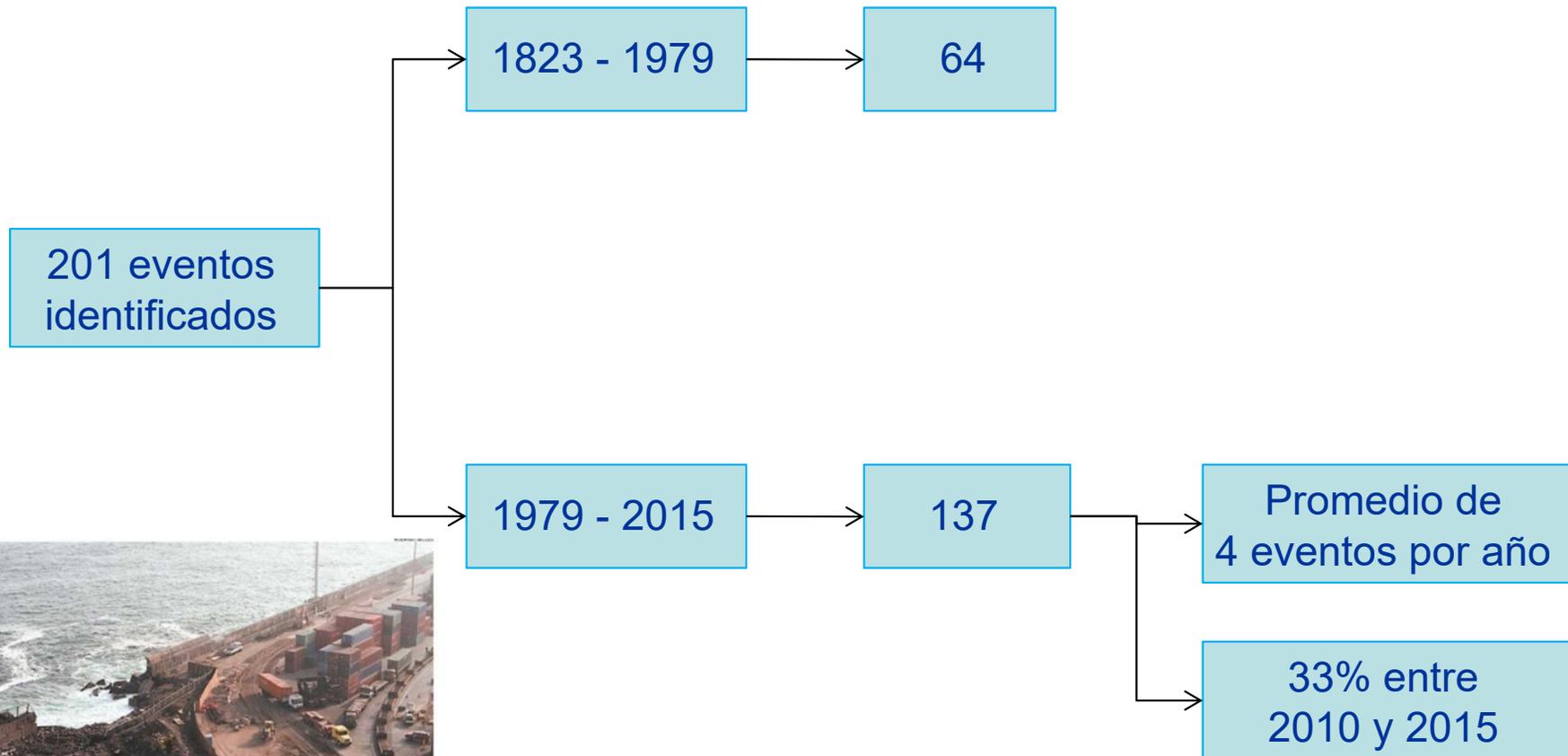
- El Niño-Oscilación del Sur (Índice Multivariado del ENOS)
- Modo Anular del Sur (Índice Metodología de Marshall, 2003)

TENDENCIAS DE LARGO PLAZO

- Parámetros de oleaje y eventos anuales

RESULTADOS

DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE EVENTOS IDENTIFICADOS



Buzos detectan graves daños en el puerto debido a las marejadas
UN TRAMO DE 30 METROS DEL MOLDE DE ABRIGO PRINCIPAL SE DESMORCÓ DUEDO A LA FUERZA DE LAS OLAS, QUE EN LA ZONA DEL PUERTO SUPERARON LOS 30 METROS DE ALTURA.

Figura 4: Antofagasta: Daños en molo de abrigo
 (El Mercurio de Antofagasta , 16/07/2013)

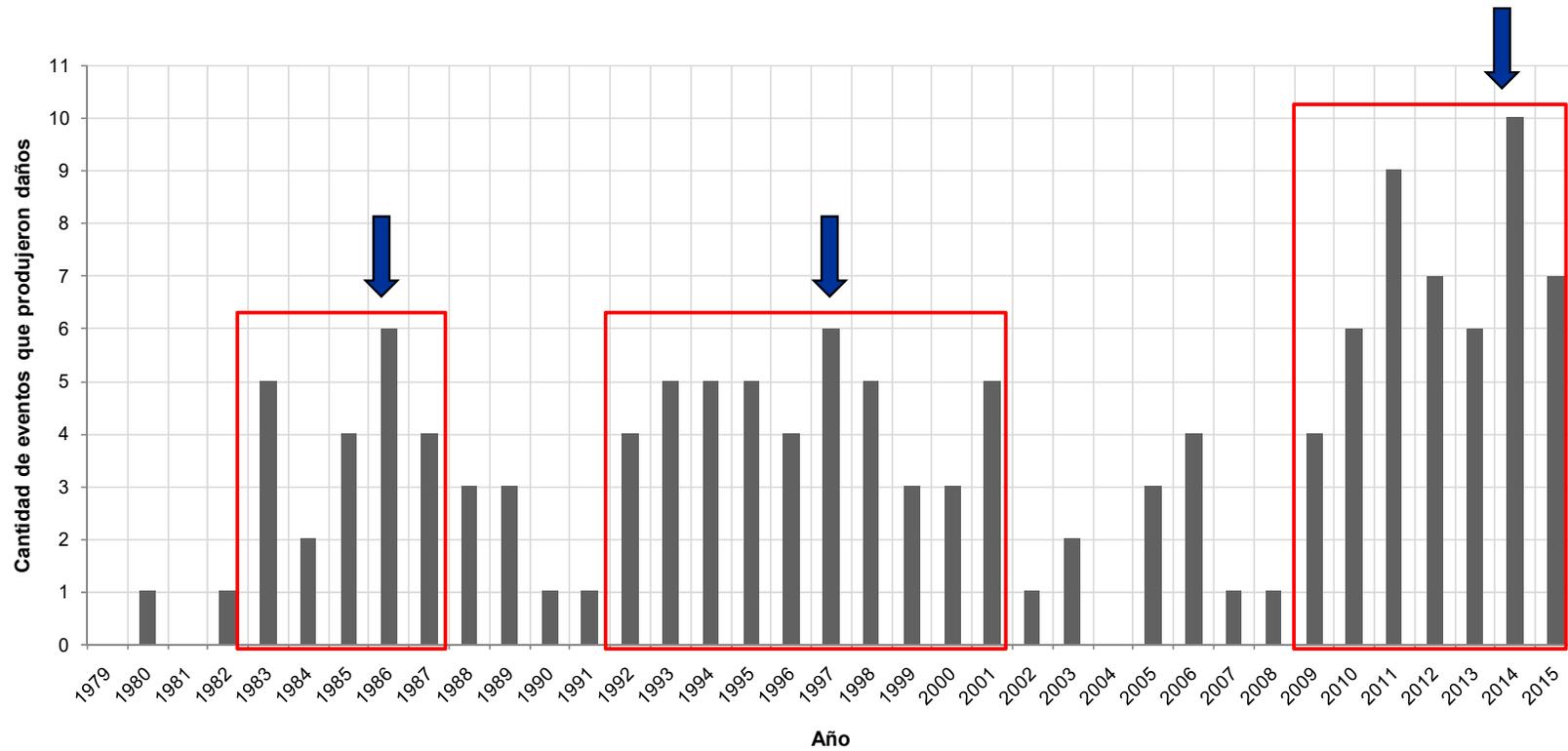


Figura 5: Distribución anual de eventos de marejadas con daños y/o impactos en las costas de Chile, 1979-2015.

DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE EVENTOS IDENTIFICADOS

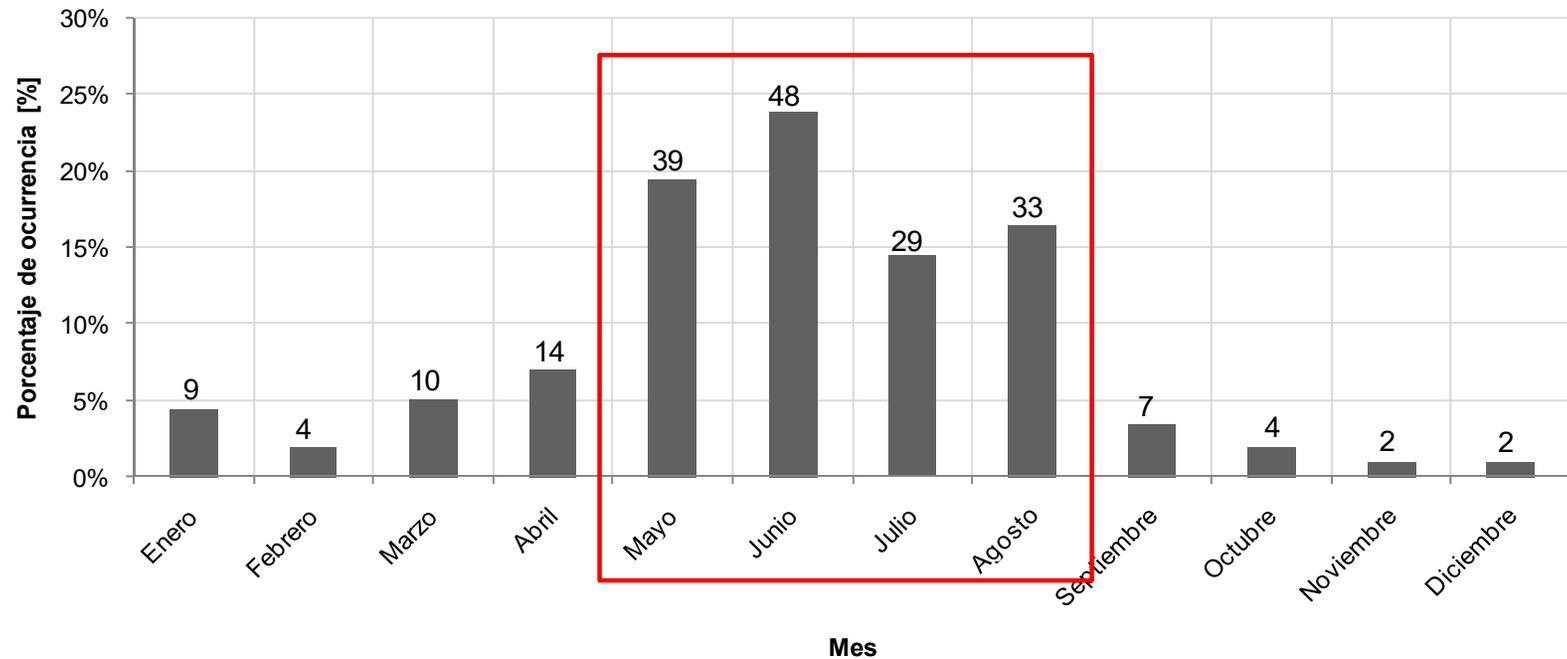
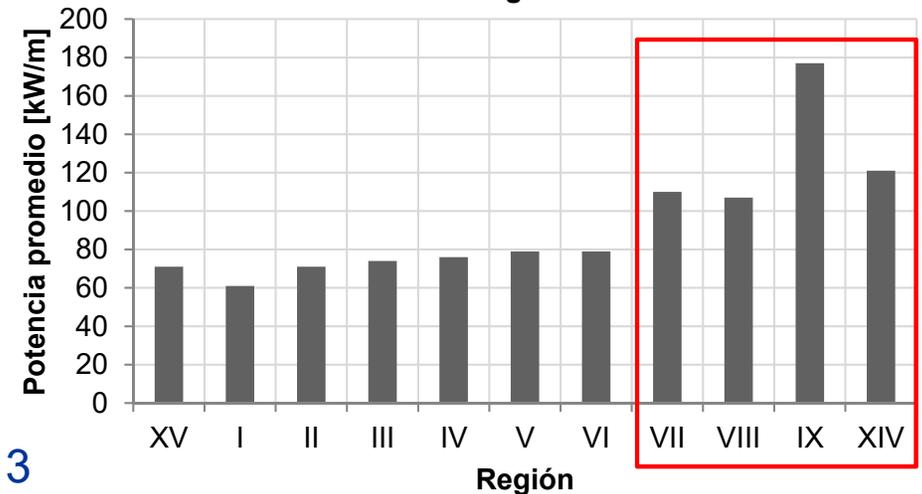
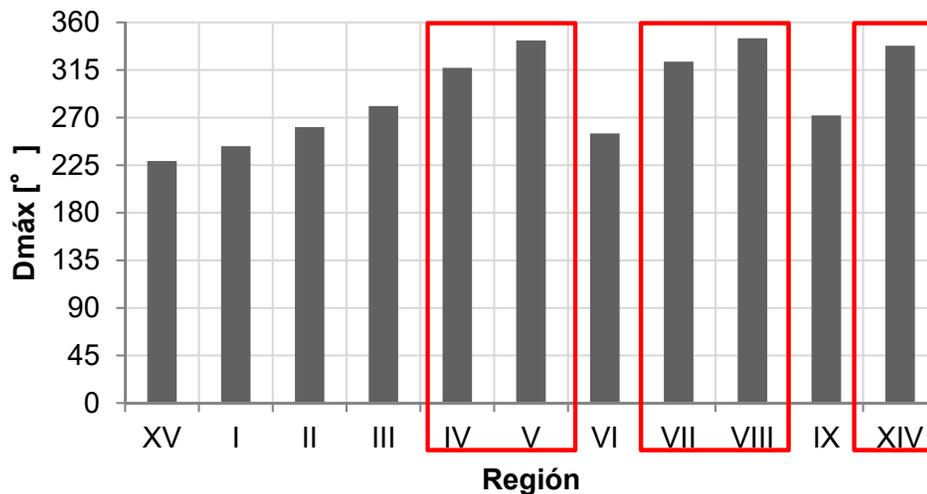
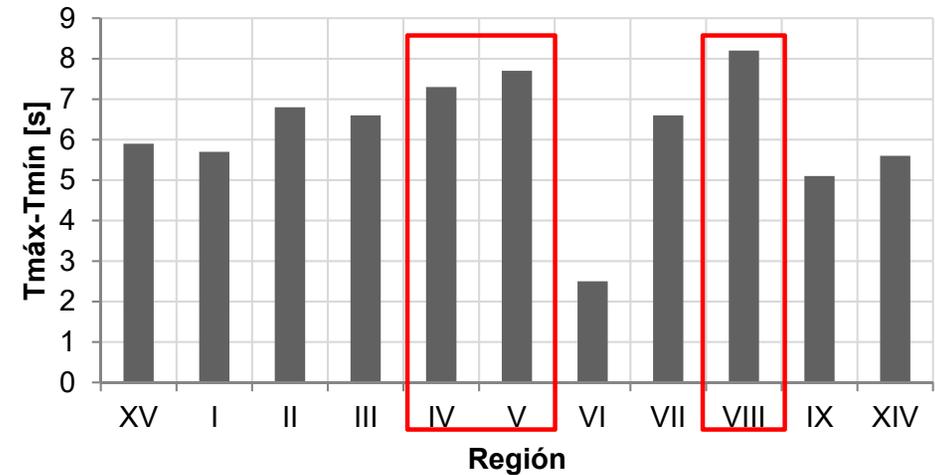
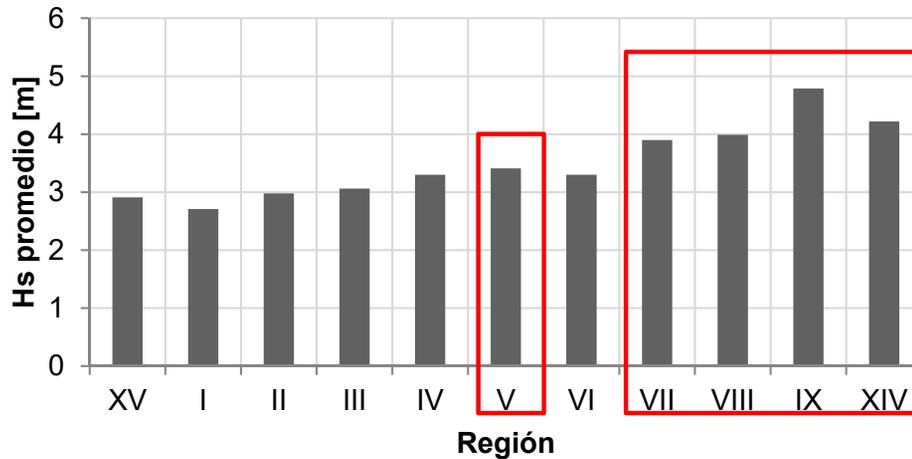


Figura 6: Distribución mensual eventos de marejadas que produjeron daños (valores sobre las barras indican la cantidad de eventos identificados para cada mes).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PARÁMETROS DE OLEAJE DE MAREJADAS

- **Hs:** Mayores valores promedio en las zonas centro y sur (V, VII, VIII, IX y XIV).
- **Tm:** En zona centro y sur valores máximos en un rango mayor al sector norte (IV, V y VIII).
- **Dm:** En zona centro-sur direcciones medias menos frecuentes en comparación a oleaje reinante en Chile, alcanzando la dirección NNW (IV, V, VII, VIII y XIV).
- **Potencia:** Promedios máximos en regiones VII, VIII, IX y XIV.

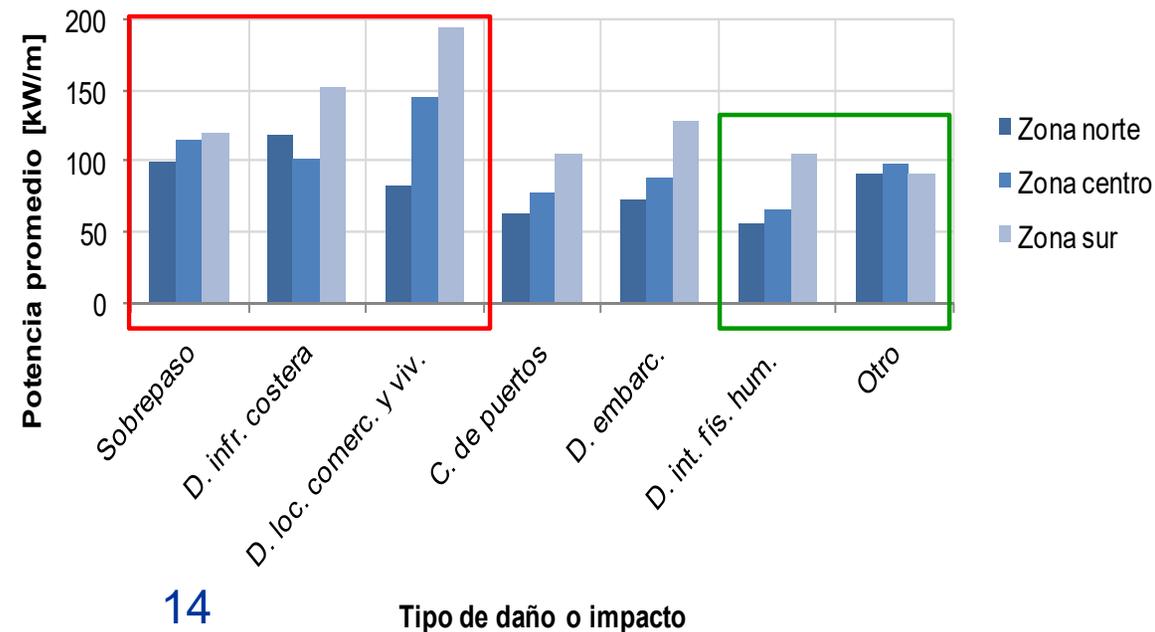
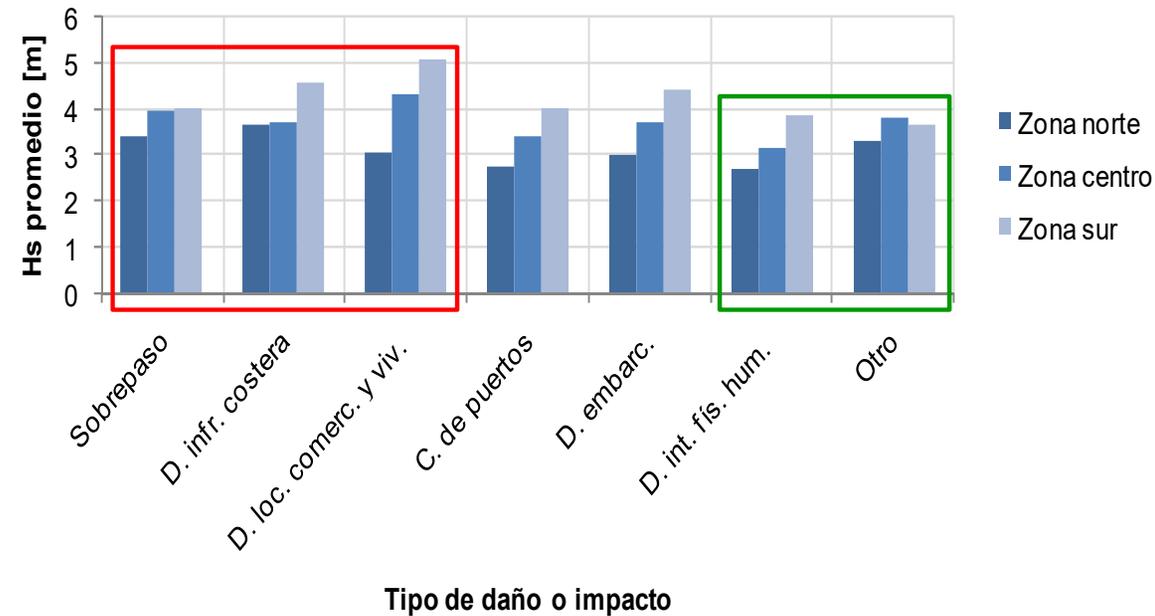


CONDICIONES DE OLEAJE POR TIPO DE DAÑOS E IMPACTOS

Zona norte: regiones XV, I, II y III
Zona centro: regiones IV, V, VI y VII
Zona sur: regiones VIII, IX y XIV

•Mayores valores de *Hs* y Potencia:
 Sobrepaso, Daño a infraestructura costera y daño a locales comerciales y viviendas.

•Menores valores de *Hs* y Potencia:
 Daños a la integridad física humana y otro tipo de daños (evacuación de viviendas, erosión de playas, impedimento de atraque de buques, impedimento de búsqueda de personas afectadas y comunidades aisladas).



CONDICIONES DE OLAJE POR DAÑOS E IMPACTOS– ZONA NORTE (XV, I, II y III)

Daño a locales comerciales en Antofagasta, enero 2006 ($H_s=1,97$ [m])

→ NOAA: $T_p=21,7$ [s]
 $D_p=303^\circ$

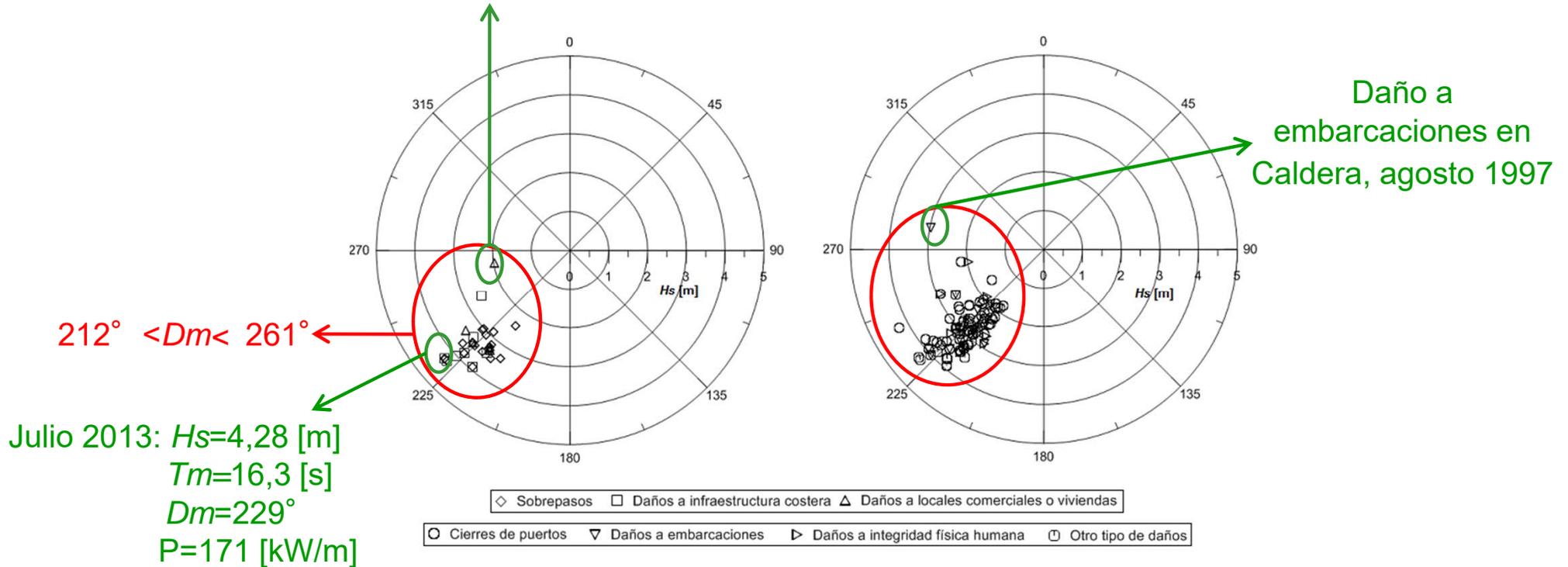
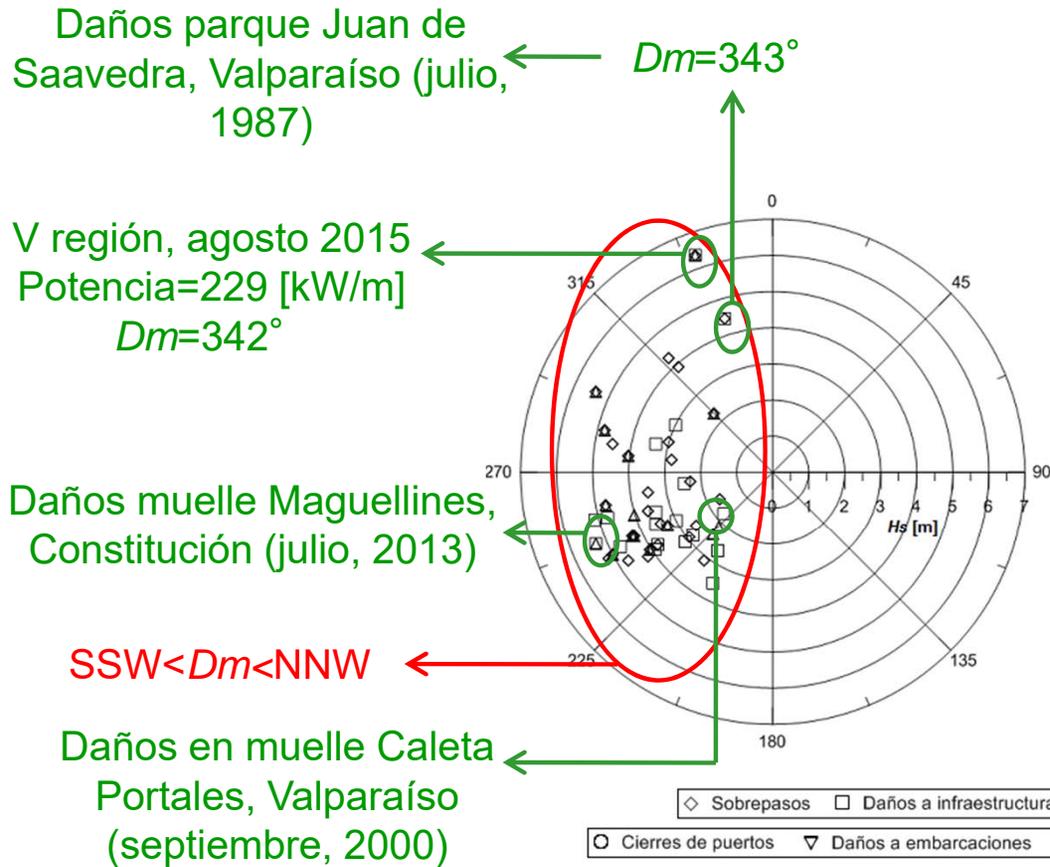


Figura 7: Rosas de oleaje H_s de daños estructurales (izquierda) e impactos (derecha), zona norte.

CONDICIONES DE OLEAJE POR DAÑOS E IMPACTOS– ZONA CENTRO (IV, V, VI y VII)



Impacto para condiciones más extremas: Otro tipo de daños (calles anegadas, automóviles arrastrados y servicios de transporte urbano alcanzados por oleaje)

Figura 8: Rosas de oleaje H_s daños estructurales (derecha) e impactos (izquierda), zona centro.

CONDICIONES DE OLAJE POR DAÑOS E IMPACTOS – ZONA SUR (VIII, IX y XIV)

Daño a viviendas, Penco (julio, 1996)

$Dm=338^\circ$
 Potencia=160 [kW/m]

Impacto para condiciones más extremas: Daño a embarcaciones (VIII región).

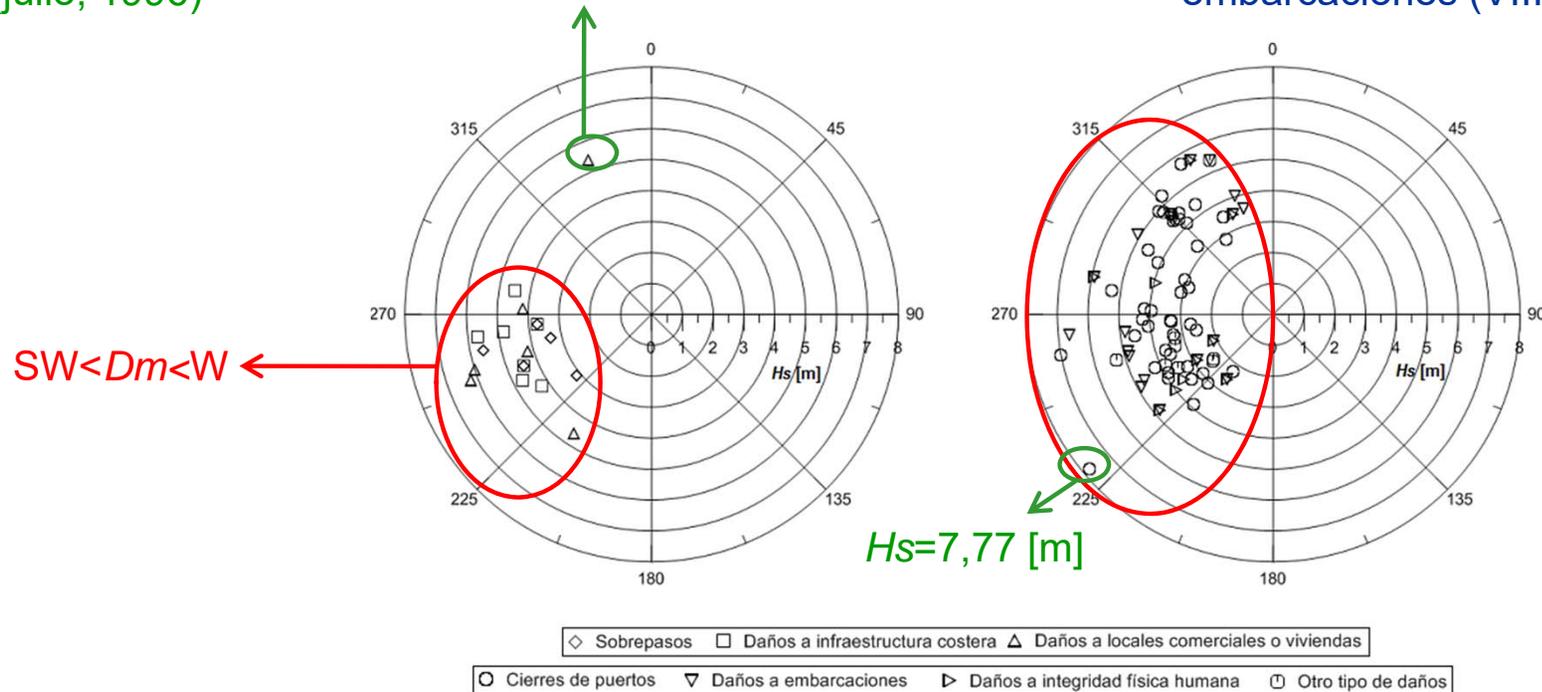


Figura 9: Rosas de oleaje H_s daños estructurales (izquierda) e impactos (derecha), zona sur.

INCIDENCIA DE DAÑOS POR MAREJADAS

•a: Sobrepaso

•b: Daño a infraestructura costera

•c: Daño a locales comerc. y viviendas

•d: Cierres de puertos

•e: Daño a embarcaciones

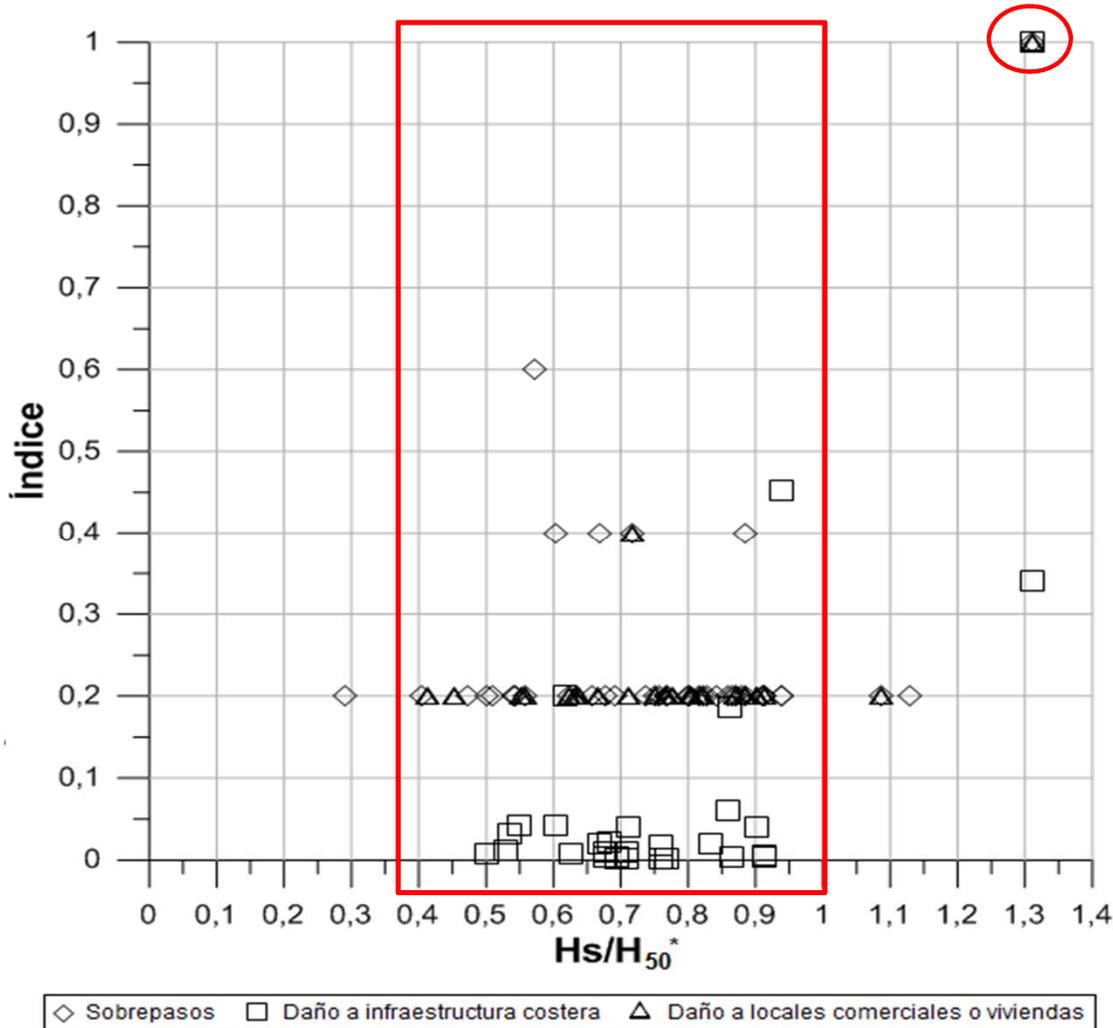
•f: Daño a integridad física humana

•g: Otro tipo de daños

$H_s [m]/T_w [s]$	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20
1,5 - 2,0								
2,0 - 2,5		1,67 ^e	0,51 ^a 0,51 ^f					
2,5 - 3,0			0,98 ^a 0,49 ^b 0,49 ^e					
3,0 - 3,5			0,59 ^b 1,78 ^e 0,59 ^a 1,18 ^f	10,00 ^e 3,33 ^a				
3,5 - 4,0			2,13 ^e					
4,0 - 4,5				10,00 ^a 5,00 ^e 10,00 ^a 5,00 ^f 5,00 ^b				
4,5 - 5,0			33,33 ^a	25,00 ^a 12,50 ^e 25,00 ^e 12,50 ^a 12,50 ^b				
5,0 - 5,5				50,00 ^a 50,00 ^e 50,00 ^b				
5,5 - 6,0								
6,0 - 6,5								

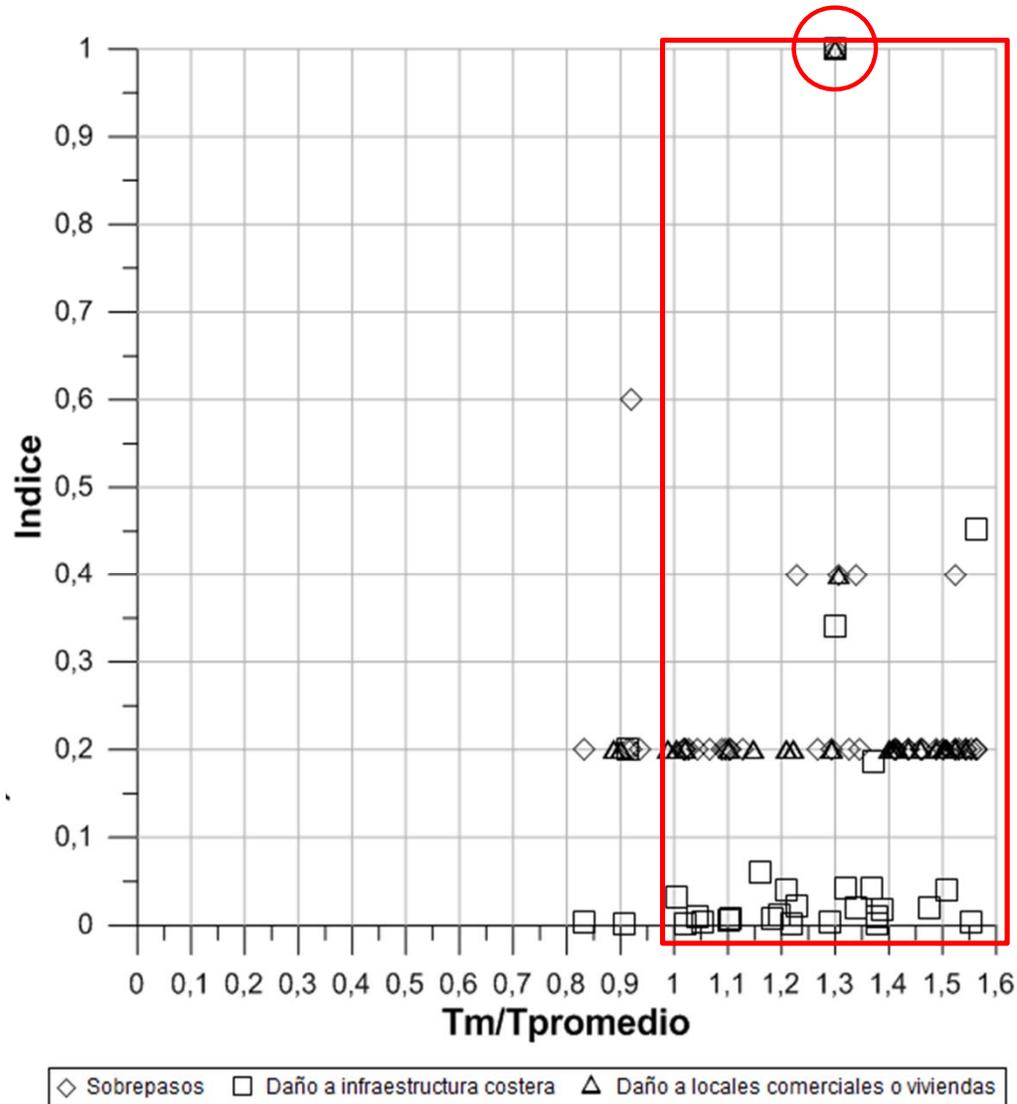
Tabla 1: Incidencia de daños e impactos por marejadas [%], rango de direcciones 270-315 [°], zona centro.

ÍNDICE NORMALIZADO DE DAÑOS A INFRAESTRUCTURA COSTERA



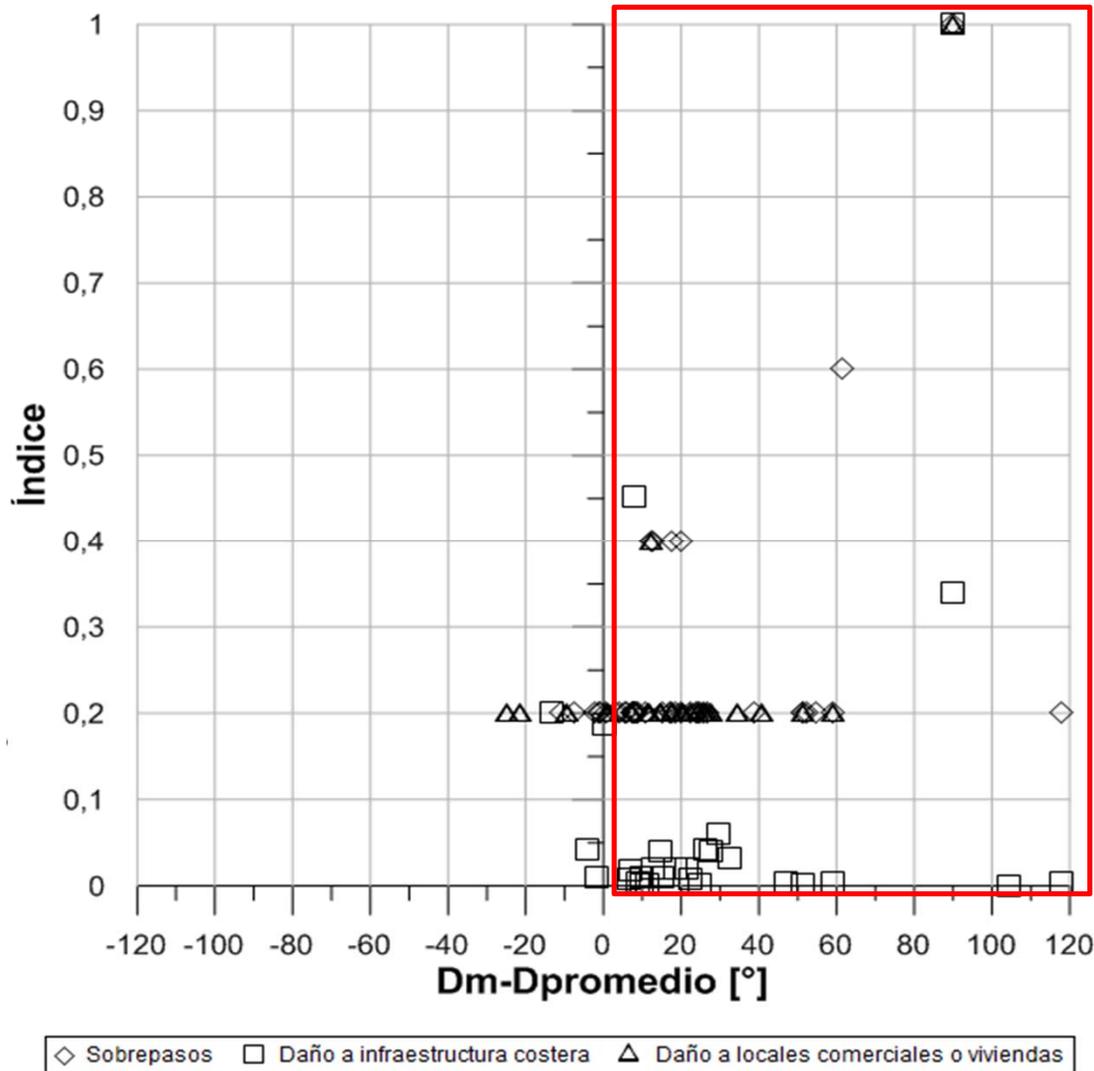
- El máximo valor del índice normalizado se alcanza en el evento de agosto del 2015.
- El valor de H_{50}^* es superado en este evento en las regiones II, IV y V.
- Efectos de las marejadas con condiciones bastante menos energéticas que las utilizadas típicamente para el diseño de estructuras costeras.

Figura 10: Relación H_S/H_{50}^* para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños.



- Gran parte de los daños se producen para condiciones con valores superiores al promedio de largo plazo.
- Mayor valor del índice en julio de 2013 (IV región).

Figura 11: Relación $T_m/T_{promedio}$ para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños.



- Daños se presentan para condiciones con valores superiores al promedio de largo plazo.
- Obras marítimas que se encuentran abrigadas para la dirección reinante y expuestas a condiciones del cuarto cuadrante.

Figura 12: Relación $D_m/D_{promedio}$ para marejadas con los tipos e índices normalizados de daños.

Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm [°]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado
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
14	Agosto	1941				V	Valparaíso	Daños en las obras del puerto.	600.000
10	Agosto	1965				IV	Coquimbo	En el muelle de la industria pesquera San José de Coquimbo los embates del mar destruyeron 100 [m] de muelle.	
10	Agosto	1965				V	Valparaíso y Viña del Mar	Sobrepaso y daños en Av. Perú. Socavón en Av. La Marina. Destrucción cuartel de 4° cia de bomberos. Daños en muros de sanatorio en 15 Norte. Destrucción de defensas balneario Recreo, olas barrieron el embarcadero y las dependencias de la institución.	
10	Agosto	1965				VIII	Coronel, Lota, Dichato y Tomé	Todas las caletas ubicadas entre Coronel y Lota (zonas más afectadas) fueron prácticamente barridas. En Dichato, un muelle de 130 [m] destruido. En el sector de playa El Morro, las olas destruyeron parte de la balaustra que existe en ese sector.	
10	Agosto	1965				VIII	Talcahuano y Tumbes	Destruída planta ballenera de la firma Macaya Hnos. ubicada en caleta Chome (pérdida estimada en 150 millones de la época según sus dueños). En Tumbes, el fuerte oleaje destruyó los muros de defensas construidos por los pescadores.	
11	Agosto	1965				II	Antofagasta	En Antofagasta, las olas destruyeron el faro, 500 [m] de la nueva Avenida Costera, más de 300 [m] de la vía férrea, cables de alta tensión y oficinas ubicadas en el puerto. Daños materiales sufridos en el puerto y zona costera alcanzarían 500 millones de pesos de la época.	
11	Agosto	1965				III	Chañaral	Daños en el muelle de la cia. Minera Sta. Fe y en el puerto mecanizado destruyendo algunas oficinas de embarque.	
11	Agosto	1965				IV	Coquimbo	Destrozado el rompeolas de Guayacán en el puerto de Coquimbo.	
11	Agosto	1965				VIII	Talcahuano y Tomé	Desaparece balneario El Morro: la violenta marejada barrió prácticamente con la playa, destruyendo muros de contención y parte del casino del balneario. En Tomé se hundió el muelle antiguo, también se dañó la losa de acceso al muelle fiscal.	
12	Agosto	1965				VIII	Talcahuano	Muelle de la firma Aimar con graves daños.	
13	Agosto	1965				V	Concón	Con daños resultó el instituto de Biología Marina de Montemar: vidrios rotos, parte baja inundada y dos laboratorios dañados. Playa Amarilla: daños materiales por 500 millones de pesos de la época debido a destrucción de escaleras de acceso, destrucción parcial de la pérgola del restaurante, destrucción de las cabinas, rotura de los servicios de agua potable y de alcantarillado, pérdida de una serie de equipos y artefactos públicos.	

Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm [°]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado
25	Julio	1968				V	Viña del Mar	Daños en Av. Perú y La Marina.	7.000
2	Febrero	1983	2,47	11,6	263	IV	Coquimbo	Muelle Club de Yates La Herradura destruido por marejadas.	
9	Marzo	1983	2,56	13,7	243	I	Iquique	Destrucción de 50 metros del muelle del recinto naval.	105.000
26	Agosto	1983	-	-	-	XV	Arica	Una solución definitiva a graves daños ocasionados por las marejadas a la costanera Comandante San Martín esperan dar las autoridades a través de un nuevo proyecto. Son 86 millones para mejorar costanera sur y 18 millones para ex isla El Alacrán (millones de la época).	1.604.000
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
24	Agosto	1992	3,92	13,90	220,00	II	Antofagasta	Daños en defensas costeras.	
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	XV	Corral	Destrucción de una parte del muelle que se encontraba en construcción.	42.000
21	Junio	1997	5,68	11,9	263	VII	Caleta El Maule.	Fisuras en muro de contención.	300.965
24	Junio	1997	4,01	13,9	227	III	Chañaral	Daños en muelle de la planta pesquera Chañaral, pérdida del motor generador, bomba, tablero eléctrico y bote auxiliar.	
24	Junio	1997	5,11	12,2	255	VI	Rapel	Explanada para botes de caleta La Boca de Rapel socavada por marejadas, quebrada en 5 partes.	
24	Junio	1997	4,74	12,1	255	VII	Constitución	En caleta Maguelines destrucción de 10 casetas de pescadores. La caleta Pellines afectada por marejadas.	

Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm [°]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado
9	Septiembre	2000	1,77	10,0	230	V	Valparaíso	Se produjo el varamiento del mercante Avon, en un episodio que se tradujo en la destrucción del muelle de pescadores de caleta Portales.	1.200.000
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
	Mayo	2008				VIII	Lebu	Colapso de cerca de 300 [m] lineales del paseo Costa Mar de Lebu. Se mencionan deficiencias e irregularidades en procesos de construcción. No se especifica fecha de marejada.	1.000.000
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	Matencillo	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 de consideración en el molo de abrigo, el cual sufrió 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. La escolera de protección tuvo pérdida de roca en las bases de soporte y presenta 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	3,71	11,8	265	XIV	Lago Ranco	Marejadas destruyeron costanera.	100.000
8	Agosto	2015	4,27	13,9	228	II	Taltal	Socavón a causa de marejadas en el acceso Taltal por la Ruta 1 a Papos en kilómetro 25.	110.000
8	Agosto	2015	6,36	9,9	340	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 Geráid.	1.830.000
8	Agosto	2015	6,36	9,9	340	V	Valparaíso y Viña del Mar	Diversos daños a infraestructura costera en playa Las Torpederas, 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) y Av. La Marina.	5.000.000
15	Diciembre	2015	2,30	17,0	315	V	Viña del Mar	Daños en café Amura.	20.000

Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm ["]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado	Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm ["]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado	Día	Mes	Año	Hs [m]	Tm [s]	Dm ["]	Región	Lugar	Efecto	Costo estimado
4	Junio	1924				II	Pisagua	Destrucción total muelle 4 perteneciente a la compañía salitrera Aguada.	250.000	25	Julio	1968				V	Viña del Mar	Daños en Av. Perú y La Marina.	7.000	9	Septiembre	2000	1,77	10,0	230	V	Valparaíso	Se produjo el varamiento del mercante Avon, en un episodio que se tradujo en la destrucción del muelle.	1.200.000
4	Junio	1924				II	Pisagua	Destrucción total muelle 4 perteneciente a la compañía salitrera Aguada.	250.000	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	8	Junio	1929				III	Chañaral	Destrucción del malecón fiscal del puerto.	1.200.000
8	Junio	1924				II	Pisagua	Destrucción total muelle 4 perteneciente a la compañía salitrera Aguada.	250.000	9	Agosto	1929				II	Antofagasta	Destrucción de obras marítimas del puerto.	600.000	9	Agosto	1929				II	Antofagasta	Destrucción de obras marítimas del puerto.	600.000
9	Agosto	1929				II	Antofagasta	Destrucción de obras marítimas del puerto.	600.000	26	Agosto	1983				XV	Arica	Una solución definitiva a graves daños ocasionados por las marejadas a la costanera Comandante San Martín esperan dar las autoridades a través de un nuevo proyecto. Son 86 millones para mejorar costanera sur y 18 millones para ex isla El Alacrán	1.604.000	18	Junio	2003	2,83	11,8	231	V	Valparaíso y Viña del Mar	Socavones en calles y avenidas.	40.000
10	Agosto	1965				IV	Coquimbo	En el muelle de la industria pesquera San José de Coquimbo los embates del mar destruyeron 100 [m] de muelle.		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
10	Agosto	1965				V	Valparaíso y Viña del Mar	Sobrepeso y daños en Av. Perú. Socavón en Av. La Marina. Destrucción cuartel de 4° cia de bomberos. Daños en muros de sanatorio en 15 Norte. Destrucción de defensas balneario Recreo, olas barrieron el embarcadero y las dependencias de la institución.		18	Junio	2011	4,79	11,0	284	V	Matencillo	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
10	Agosto	1965				VIII	Coronel, Lota, Dichato y Tomé	Todas las caletas ubicadas entre Coronel y Lota (zonas más afectadas) fueron prácticamente barridas. En Dichato, un muelle de 130 [m] destruido. En el sector de playa El Morro, las olas destruyeron parte de la balastra que existe en ese sector.		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
10	Agosto	1965				VIII	Talcahuano y Tumbes	Destruída planta ballenera de la firma Macaya Hnos. ubicada en caleta Chome (pérdida estimada en 150 millones de la época según sus dueños). En Tumbes, el fuerte oleaje destruyó los muros de defensas construidos por los pescadores.		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
11	Agosto	1965				II	Antofagasta	En Antofagasta, las olas destruyeron el faro, 500 [m] de la nueva Avenida Costera, más de 300 [m] de la vía férrea, cables de alta tensión y oficinas ubicadas en el puertos. Daños materiales sufridos en el puerto y zona costera alcanzarían 500 millones de pesos de la época.		4	Julio	2013	4,16	16,4	229	II	Antofagasta	Daños de consideración en el molo de abrigo, el cual sufrió 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. La escollera de protección tuvo pérdida de roca en las bases de soporte y presenta desalineamiento de su eje longitudinal.	2.264.734	4	Julio	2013	5,30	15,2	248	VII	Constución	Daños en muelle Maguelines.	200.000
11	Agosto	1965				III	Chañaral	Daños en el muelle de la cia. Minera Sta. Fe y en el puerto mecanizado destruyendo algunas oficinas de embarque.		8	Agosto	2015	6,36	9,9	340	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	6,36	9,9	340	V	Valparaíso y Viña del Mar	Diversos daños a infraestructura costera en playa Las Torpederas, 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) y Av. La Marina	5.000.000
11	Agosto	1965				IV	Coquimbo	Destrozado el rompeolas de Guayacán en el puerto de Coquimbo.		8	Agosto	2015	6,36	9,9	340	V	Viña del Mar	Socavón a causa de marejadas en el acceso Taltal por la Ruta 1 a Papos en kilómetro 25.	110.000	8	Agosto	2015	6,36	9,9	340	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
11	Agosto	1965				VIII	Talcahuano y Tomé	Desaparece balneario El Morro: la violenta marejada barrió prácticamente con la playa, destruyendo muros de contención y parte del casino del balneario. En Tomé se hundió el muelle antiguo, también se dañó la losa de acceso al muelle fiscal.		11	Agosto	2015	6,36	9,9	340	V	Valparaíso y Viña del Mar	Diversos daños a infraestructura costera en playa Las Torpederas, 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) y Av. La Marina	5.000.000	15	Diciembre	2015	2,30	17,0	315	V	Viña del Mar	Daños en café Amura.	20.000
12	Agosto	1965				VIII	Talcahuano	Muelle de la firma Alimar con graves daños.		11	Agosto	2015	12,2	255	VI	Rapel	Explanada para botes de caleta La Boca de Rapel socavada por marejadas, quebrada en 5 partes.		11	Agosto	1965				V	Concón	Con daños resultó el instituto de Biología Marina de Montemar: vidrios rotos, parte baja inundada y dos laboratorios dañados. Playa Amarilla: daños materiales por 500 millones de pesos de la época debido a destrucción de escaleras de acceso, destrucción parcial de la pérgola del restaurante, destrucción de las cabinas, rotura de los servicios de agua potable y de alcantarillado, pérdida de una serie de equipos y artefactos públicos.		
13	Agosto	1965				V	Concón	Con daños resultó el instituto de Biología Marina de Montemar: vidrios rotos, parte baja inundada y dos laboratorios dañados. Playa Amarilla: daños materiales por 500 millones de pesos de la época debido a destrucción de escaleras de acceso, destrucción parcial de la pérgola del restaurante, destrucción de las cabinas, rotura de los servicios de agua potable y de alcantarillado, pérdida de una serie de equipos y artefactos públicos.		74	Agosto	2015	12,1	255	VII	Constución	En caleta Maguelines destrucción de 10 casetas de pescadores. La caleta Pellines afectada por marejadas.												

MOP (1965): 40 mil millones de pesos de la época, incluyendo reparación de caminos, puentes, terraplenes, puertos y molos en diversos puntos del país.

2.000 millones de la época en V región (1965)

← en millones

DEFINICIÓN DE ESCALA DE MAGNITUD DE INTENSIDAD DE DAÑOS POR MAREJADAS

Tabla 2: Descripción de categorías Escala de Daños.

Categoría	Descripción
1	Cierres de puertos y resguardo de embarcaciones. Suspensión de: faenas de buceo (deportivo y/o comercial), recolección de orilla (mariscadores y algueros), deportes náuticos (natación, surf, vela, entre otros) y playas no aptas para el baño.
2	Cierres de puertos. Daño a embarcaciones menores. Precaución a tránsito de peatones en sectores costeros.
3	Cierres de puertos. Daño a todo tipo de embarcaciones con pérdida o naufragio de embarcaciones menores. Sobrepasso en estructuras con posible inundación en locales comerciales, viviendas y otras instalaciones cercanas a borde costero.
4	Cierres de puertos. Pérdida o naufragio de embarcaciones menores y graves daños a embarcaciones mayores. Sobrepassos con inundaciones en locales comerciales, viviendas y otras instalaciones cercanas al borde costero, además de posibles cortes de tránsito en caminos costeros. Daños menores a infraestructuras costeras, locales comerciales, viviendas u otro tipo de obras civiles cercanas la línea de costa.
5	Cierres de puertos. Pérdida o naufragio de todo tipo de embarcaciones. Sobrepassos con inundaciones en locales comerciales, viviendas, otras instalaciones y cortes de tránsito en sectores costeros. Daños mayores a infraestructuras costeras, locales comerciales, viviendas u otro tipo de obras civiles cercanas a la línea de costa.
6	Cierres de puertos. Pérdida o naufragio de todo tipo de embarcaciones. Sobrepassos con inundaciones en locales comerciales, viviendas, otras instalaciones y cortes de tránsito en sectores costero. Graves daños a infraestructura costera, locales comerciales, viviendas u otro tipo de obras civiles cercanas a la línea de costa.
7	Cierres de puertos. Pérdida o naufragio de todo tipo de embarcaciones. Sobrepassos con inundaciones en locales comerciales, viviendas, otras instalaciones y cortes de tránsito en sectores costeros. Destrucción de infraestructuras costeras, locales comerciales, viviendas u otro tipo de obras civiles cercanas a la línea de costa.

Inicio de sobrepasso



Daño a infraestructura costera

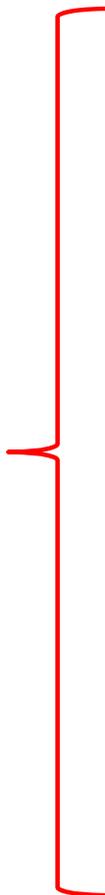
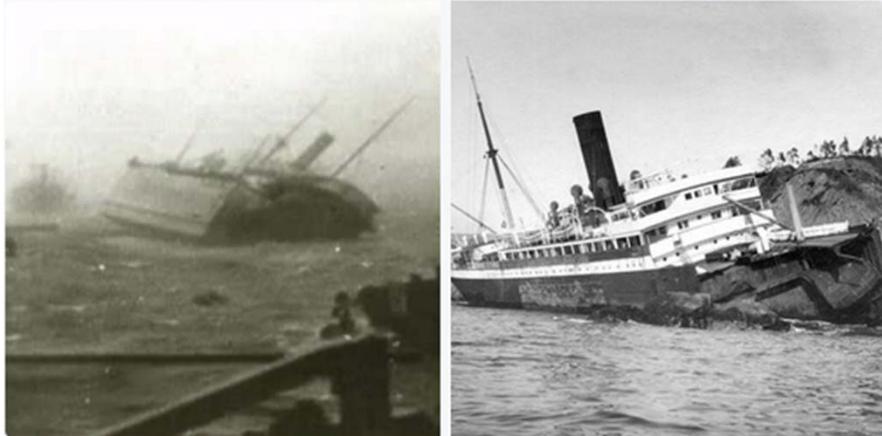


Tabla 3: Diez eventos de marejadas con mayor intensidad categorizados con Escala de Daños.

Periodo de retorno de 50 años



Naufragios diques flotantes en Valparaíso



Fecha	Regiones afectadas y daños registrados	Categoría
10/08/1965	XV: Cierre de puerto; II: Sobrepasos en diversos puntos, daños a infraestructura costera, 7 embarcaciones dañadas, daño a integridad física humana; III: Daño infraestructura costera, 2 embarcaciones dañadas; IV: Daño a infraestructura costera, cierre de puerto, 58 embarcaciones dañadas, otro tipo de daños; V: Sobrepasos, daño a infraestructura costera, daño a locales comerciales y viviendas, cierres de puertos, daño a embarcaciones, daño a integridad física humana, otro tipo de daños; VIII: Sobrepasos, daño a infraestructura costera, daño a locales comerciales y viviendas, cierres de puertos, daño a embarcaciones.	XV: 1; II: 6; III: 5; IV: 7; V: 7; VIII: 7.
08/08/2015	XV: Otro tipo de daños; II: Joven arrastrado por olas mientras pescaba, sobrepaso y suspensión de tránsito, socavón camino a Taltal; IV: Cierre de puerto, sobrepaso, daño a locales comerciales, resguardo de embarcaciones; V: Sobrepasos, daños a infraestructura costera, múltiples daños a obras públicas y privadas entre Valparaíso y Viña del Mar, cierre de puertos, 60 embarcaciones dañadas, daños a locales comerciales, 2 personas fallecidas, rescate de personas en embarcaciones, pescadores afectados, otro tipo de daños; IX: Destrucción de muro de contención natural; XIV: Sobrepaso y destrucción de costanera en Lago Ranco.	XV: 3; II: 4; IV: 4; V: 7; IX: 5; XIV: 5
03 y 04/07/2013	XV: Sobrepaso, movimiento de unidades de coraza, desvíos de tránsito; I: Sobrepaso y corte de tránsito, daño a locales comerciales y viviendas, cierre de puerto; II: 4 personas lesionadas, Sobrepaso, cortes de tránsito, daños de consideración en molo del puerto, autos arrastrados por olas; III: Cierre de puertos; IV: Cierre de puertos en toda la región; V: Daños a locales comerciales en Reñaca, cierre de puertos, sobrepaso en Av. Borgoño, sobrepasos en Santo Domingo y Cartagena; VII: Inundaciones por sobrepaso, daño a viviendas, 4 embarcaciones caen al mar sin ser recuperadas, daño a locales comerciales, daños en muelle Maguellines; VIII: Anegamiento por sobrepaso; IX: Daño a viviendas.	XV: 4; I: 4; II: 6; III: 1; IV: 1; V: 5; VII: 5; VIII: 4; IX: 4
04 a 08/06/1924	XV: Sobrepaso y 23 lanchas a pique; I: Destrucción de lanchón y 5 botes a garete; II: Destrucción de muelle en Pisagua, destrucción de 30 [m] de molo en Antofagasta; III: Destrucción malecón y muelle casa Francesa, pérdidas de 2 lanchas y 2 botes; IV: 2 lanchas varadas, sobrepaso en La Serena y Los Vilos.	XV: 4; I: 3; II: 5; III: 5; IV: 3
09/08/1929	II: Daño infraestructura costera; III: Daño infraestructura costera; V: Daño a locales comerciales y viviendas.	II: 5; III: 6; V: 4
01 a 03/05/1986	I: Naves a la gira; II: Destrucción de falucho y muerte de 3 pescadores; III: 3 pescadores muertos; IV: Cuantiosos daños en sectores vecinos a playas; V: Sobrepasos, daños a infraestructura costera, 2 embarcaciones dañadas, daño a locales comerciales; VIII: Viviendas damnificadas.	I: 2; II: 3; IV: 4; V: 4; VIII: 4
20 y 24/06/1997	I: Obrero ebrio fallece; II: Sobrepaso; III: Daño a infraestructura costera, daño a 5 embarcaciones y otro tipo de daños; IV: Cierre de puerto; V: Cierre de puerto, 11 embarcaciones dañadas y otro tipo de daños; VI: Explanada socavada; VII: Destrucción de casetas de pescadores y otro tipo de daños; VIII: Embarcación arrastrada y rescatada, fisura en muro de contención, 13 embarcaciones dañadas.	I: 1; II: 3; III: 4; IV: 1; V: 3; VI: 4; VII: 4; VIII: 4
08 a 15/08/2011	XV: Cierre de puerto; I: Surfista desaparecido; II: Sobrepaso, Daño a embarcaciones, cierre de puertos; IV: Cierre de puerto, daño a locales comerciales; V: Sobrepaso, daño a locales comerciales, ola impacta microbús con dos pasajeros lesionados.	XV: 1; II: 4; IV: 3; V: 4
22/05/1940	V: Naufragio de dique flotante "Valparaíso II". Se dio vuelta de campana debido a un fuerte temporal.	V: 5
26/05/1915	V: Se hunde viejo dique flotante "Valparaíso" debido a un fuerte temporal.	V: 5

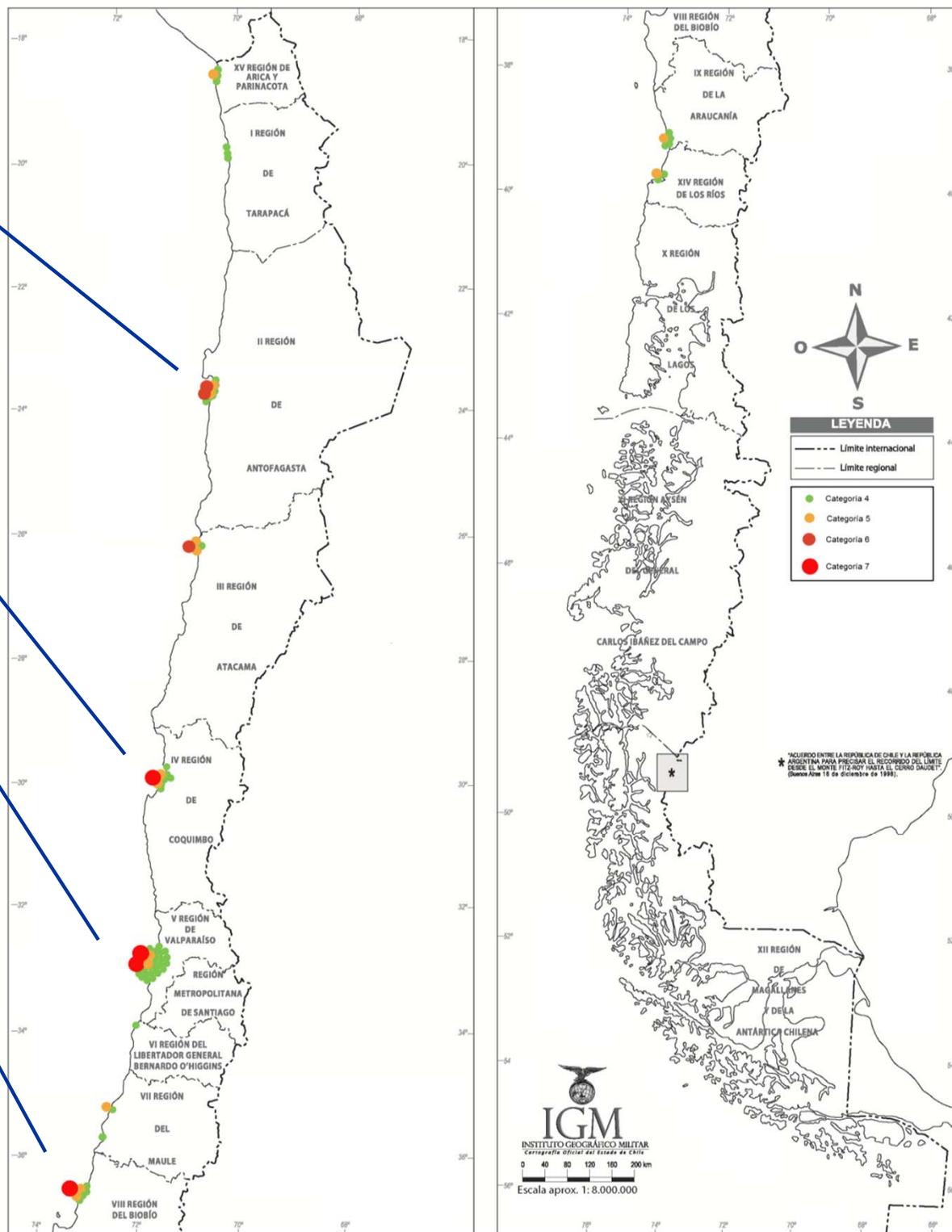
Mayor nivel de daños en zona norte, con dos episodios categoría 6 (agosto 1965 y julio 2013)

Episodio categoría 7 (agosto, 1965)

Mayor cantidad de eventos identificados sobre categoría 4, con dos episodios categoría 7 (agosto 1965 y 2015)

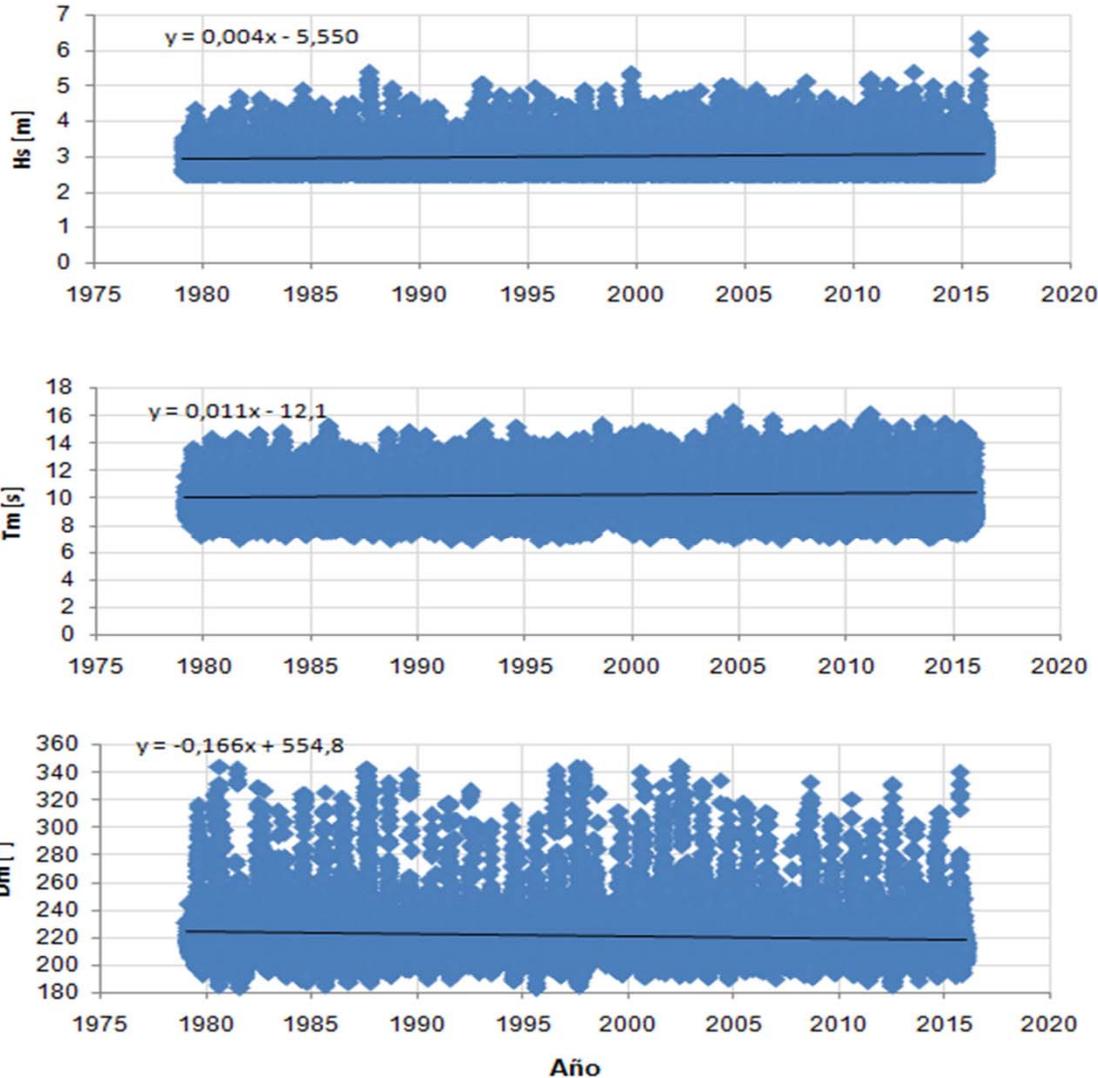
Mayor nivel de daños en zona sur, con un episodio categoría 7 (agosto, 1965)

Figura 13: Cantidad de eventos de marejadas por región sobre categoría 4 en Escala de Daños.



TENDENCIAS DE LARGO PLAZO – PARÁMETROS DE OLEAJE

• Se han utilizado como valores umbral los valores promedio de H_s de marejadas con daños (valores de T_m y D_m son asociado a H_s).



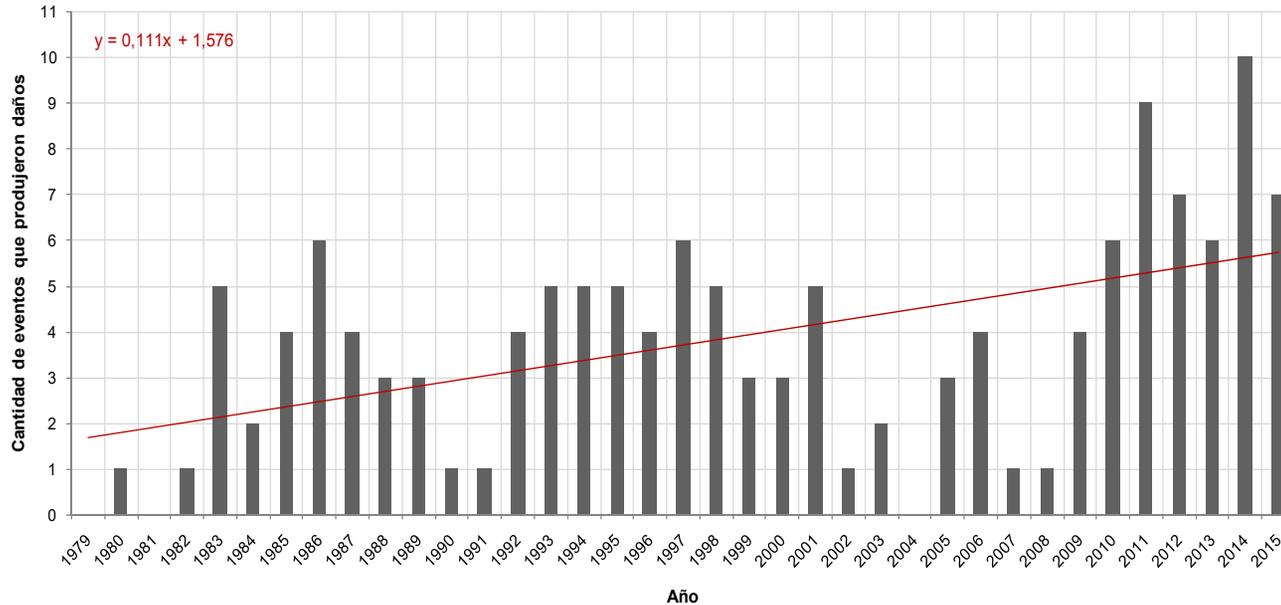
• **H_s :** aumentos entre 0,003 y 0,005 [m/año]. En 100 años, aumentará entre 0,3 y 0,5 [m] en Chile.

• **T_m :** Aumentos promedio: Norte (XV, I, II y III) +0,0033 [s/año]; Centro (IV, V, VI y VII) +0,009 [s/año]; Sur (VIII, IX y XIV) +0,015 [s/año].

• **D_m :** Disminución promedio de 0,205 [° /año]. En 100 años, -20,5° .

Figura 14: Tendencia de largo plazo de H_s , T_m y D_m entre los años 1979 y 2015, V región.

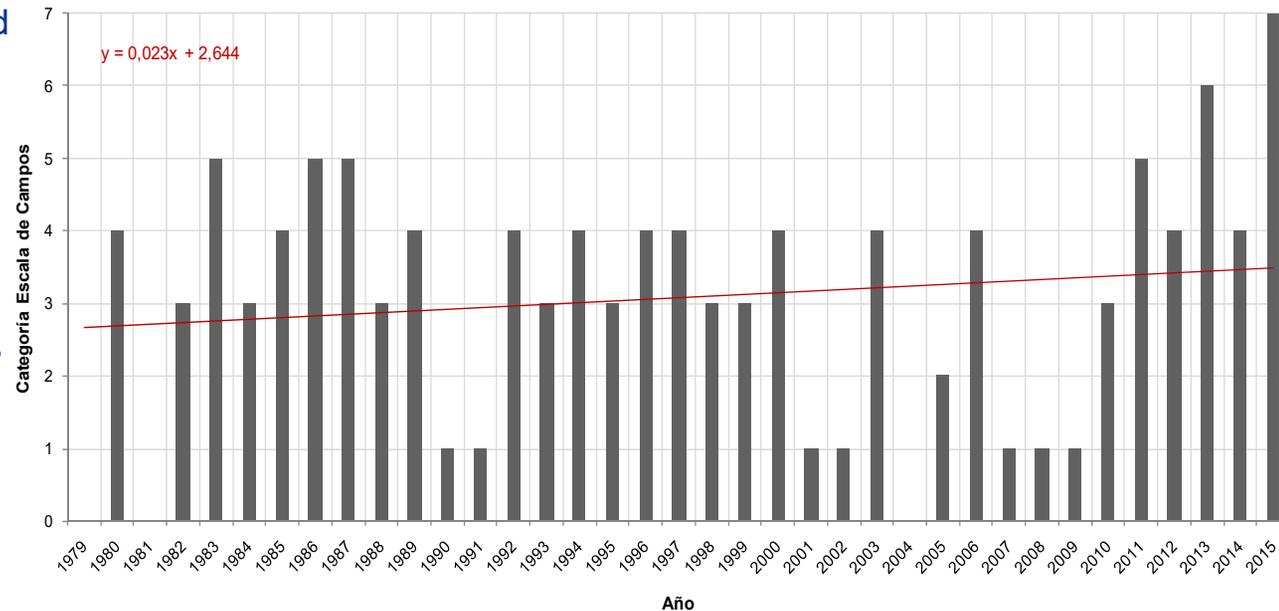
TENDENCIAS DE LARGO PLAZO – CANTIDAD DE EVENTOS Y CATEGORIZACIÓN



Cantidad de eventos de marejada: +0,111 por año.
 En 100 años: +11 eventos por año.

Figura 15: Tendencia de largo plazo de la cantidad de eventos de marejadas con daños registrados, 1979-2015.

Tendencia a aumentar la categoría máx. anual por daños.
 Aumento de inversión pública y privada en obras marítimas.



28 Figura 16: Tendencia de largo plazo de máximos anuales en Escala de Daños, 1979-2015.

OTROS RESULTADOS

Oscilaciones climáticas y eventos anuales identificados (1979-2015)

- Fase positiva y cantidad anual de eventos identificados sobre el promedio: ENOS 10 años, SAM 9 años.
- Fase negativa y cantidad anual de eventos identificados bajo el promedio: ENOS 7 años, SAM 7 años.

Oscilaciones climáticas y categoría máxima anual en Escala de Daños (1979-2015)

- No se encuentra una clara relación entre las máximas categorías anuales en Escala de Daños y las fases de las oscilaciones climáticas.

CONCLUSIONES

- La metodología desarrollada permitió recopilar información histórica de daños por marejadas en las costas de Chile.
- Marejadas que producen daños con mayor frecuencia durante los meses de mayo a agosto (máx. en junio).
- No existe una clara relación entre las alturas de ola y la mayor generación de daños (según índices de daño normalizado). El oleaje produce más daños cuando proviene de direcciones más hacia el Norte que el promedio.
- La escala de magnitud de impacto de daños por marejadas ha permitido categorizar los eventos de marejadas con daños, logrando identificar que los eventos más dañinos se han presentado con un periodo de retorno cercano a los 50 años, en agosto de los años 1965 y 2015.
- Las tendencias de largo plazo indican aumentos en el valor de altura significativa, en la cantidad anual de eventos y en las categorías máximas anuales en la Escala de Daños.

RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

- Continuar con identificación de eventos, especialmente para años previos a 1979.
- Constituir una base de datos de oleaje confiable, de largo plazo y representativa de condiciones extremas.
- Incluir análisis espectral, mediciones de boya y niveles de marea.
- Incluir base de datos de oleaje para eventos previos al año 1979.
- Estudio detallado de tendencias de largo plazo incluyendo proyecciones de cambio climático.

**GRACIAS POR SU
ATENCIÓN**

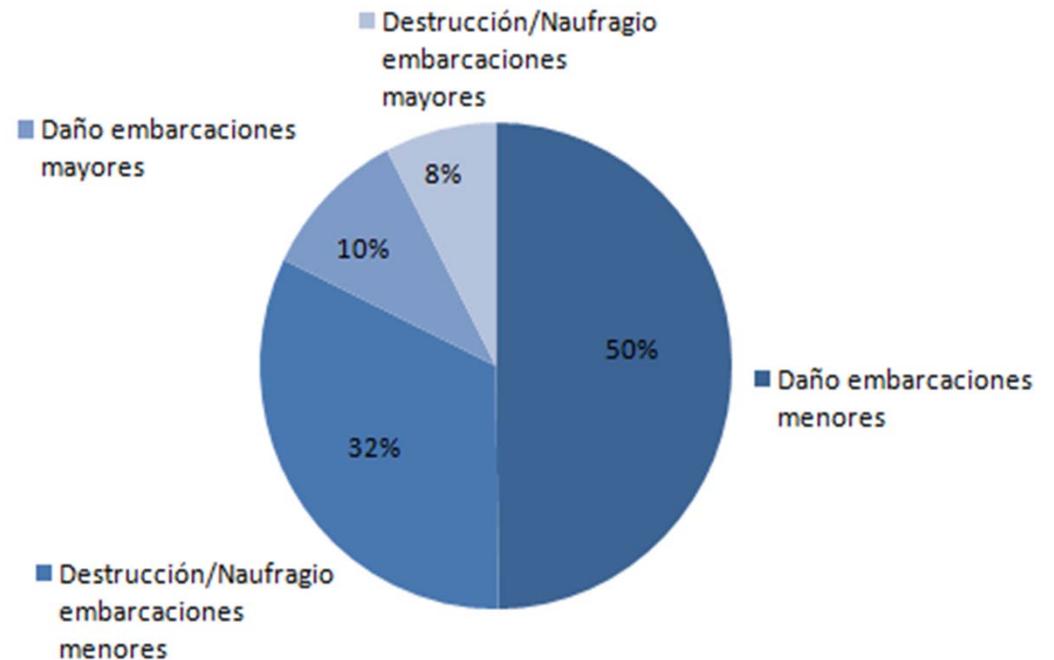
ANEXOS

CATASTRO DE DAÑOS E IMPACTOS – DAÑO A EMBARCACIONES

Embarcaciones menores: lanchas, yates, bongos, chalupas, falucho, balandras, chatas, veleros, barcas, goletas y remolcadores.

Embarcaciones mayores: buques, diques flotantes y mercantes.

Regiones con mayores registros de daños a embarcaciones: IV, V y VIII.



Anexo 1: Distribución del nivel de daño a embarcaciones

CATASTRO DE DAÑOS E IMPACTOS – DAÑO A INTEGRIDAD FÍSICA HUMANA



Anexo 2: Distribución tipos de daños a integridad física humana

Lesiones y muerte de civiles:
imprudencia a pesar de avisos de
alerta

Victimas fatales Marina Mercante
Nacional: naufragio barco mercante
“Alborada” frente a las costas de San
Vicente (julio, 1987).

CATASTRO DE DAÑOS E IMPACTOS – CIERRE DE PUERTOS

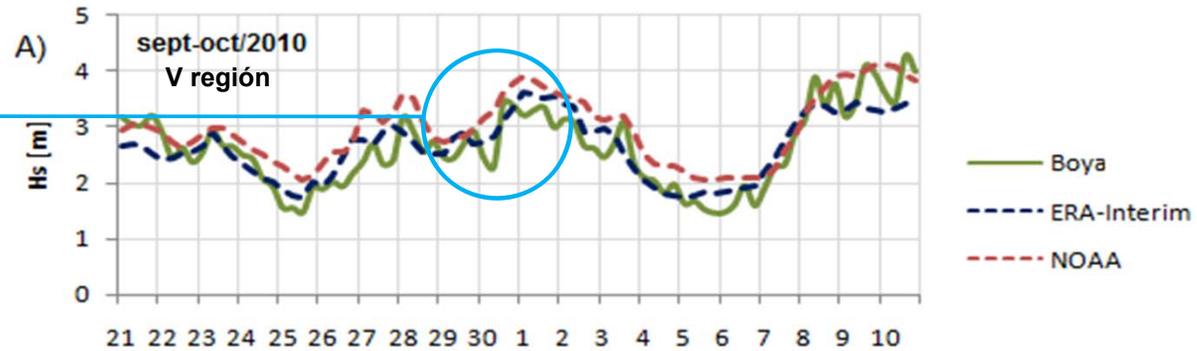
Anexo 3: Región, empresa y costo diario asociado a cierre de puerto por un día en regiones en estudio

Región	Empresa portuaria	Costo diario [CLP\$]
XV	Terminal Puerto Arica (TPA)	102.588.362
I	Empresa Portuaria Iquique (EPI)	28.445.478
I	Iquique Terminal Internacional (ITI)	66.059.284
II	Antofagasta Terminal Internacional (ATI)	184.344.790
IV	Terminal Puerto Coquimbo (TPC)	88.105.809
V	Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL)	24.116.155
V	Terminal Pacífico Sur (TPS)	208.688.096
V	Puerto Central (PCE)	26.845.014
V	San Antonio Terminal Internacional (STI)	185.903.250
VIII	Empresa Portuaria Talcahuano-San Vicente (TSV)	18.145.146
VIII	San Vicente Terminal Internacional (SVTI)	175.128.550
XIV	Puerto de Corral	24.997.089

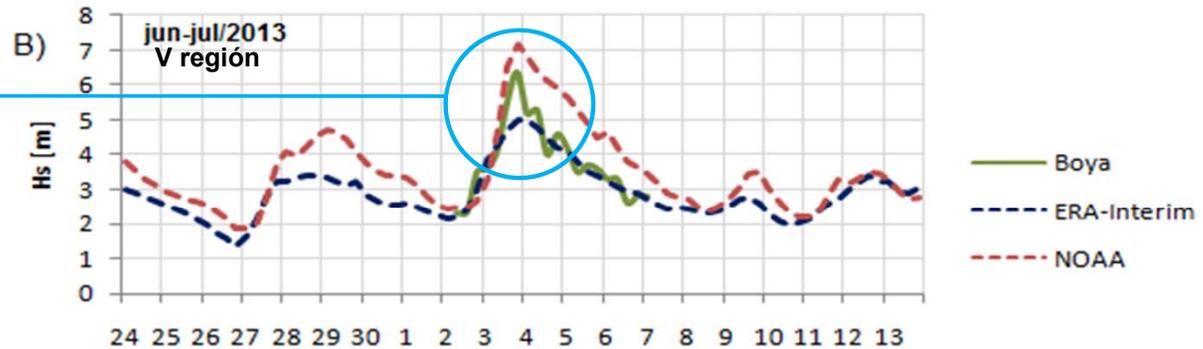
450 millones en conjunto aproximadamente



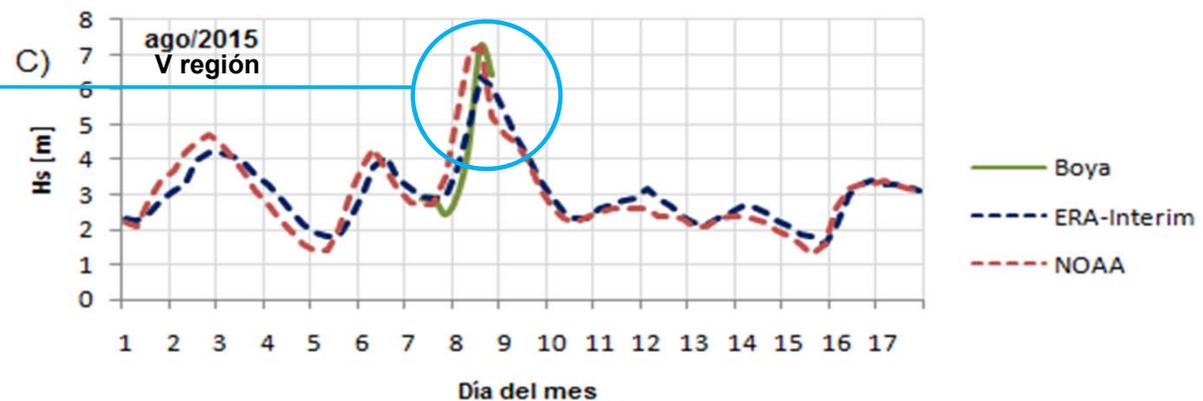
Precaución a pescadores y transeúntes



- Sobrepasos
- Daño a locales comerciales
- Cierre de puertos
- Otros



- Sobrepasos
- Daños a infraestructura costera
- Daños a locales comerciales y viviendas
- Cierre de puertos
- Daño a embarcaciones
- Daño a integridad física humana
- Otros



INCIDENCIA DE DAÑOS E IMPACTOS- ZONA NORTE

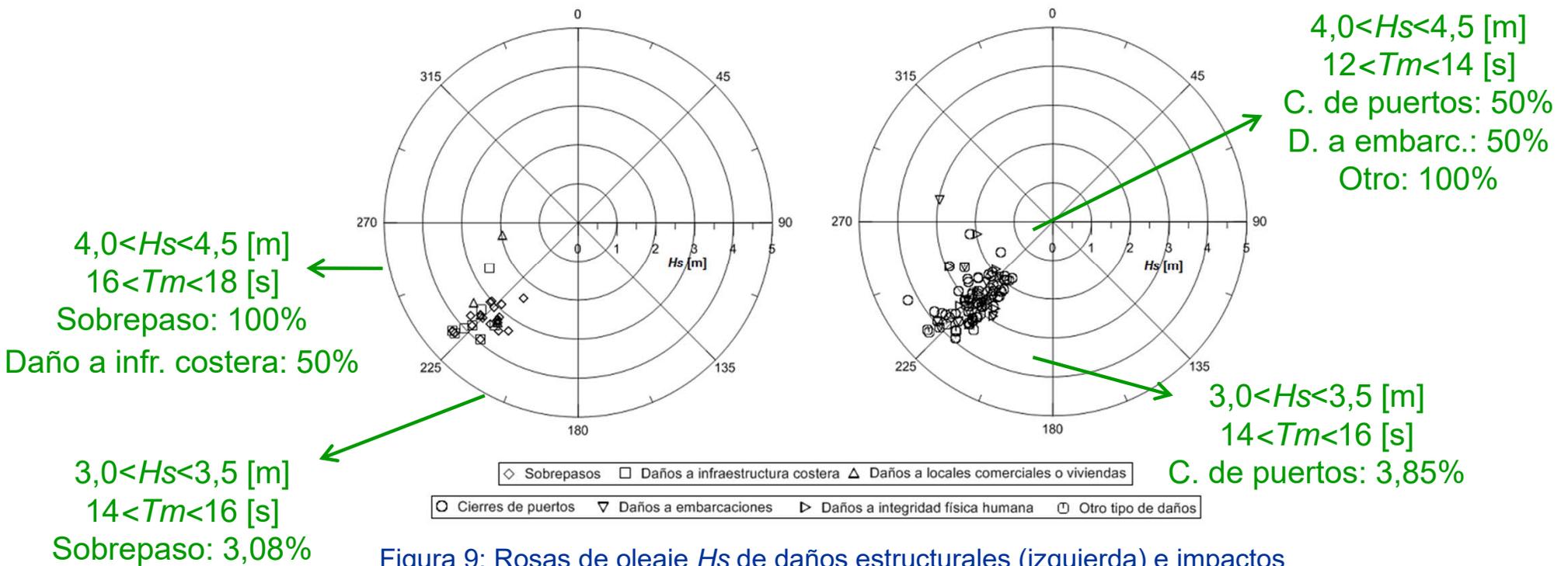
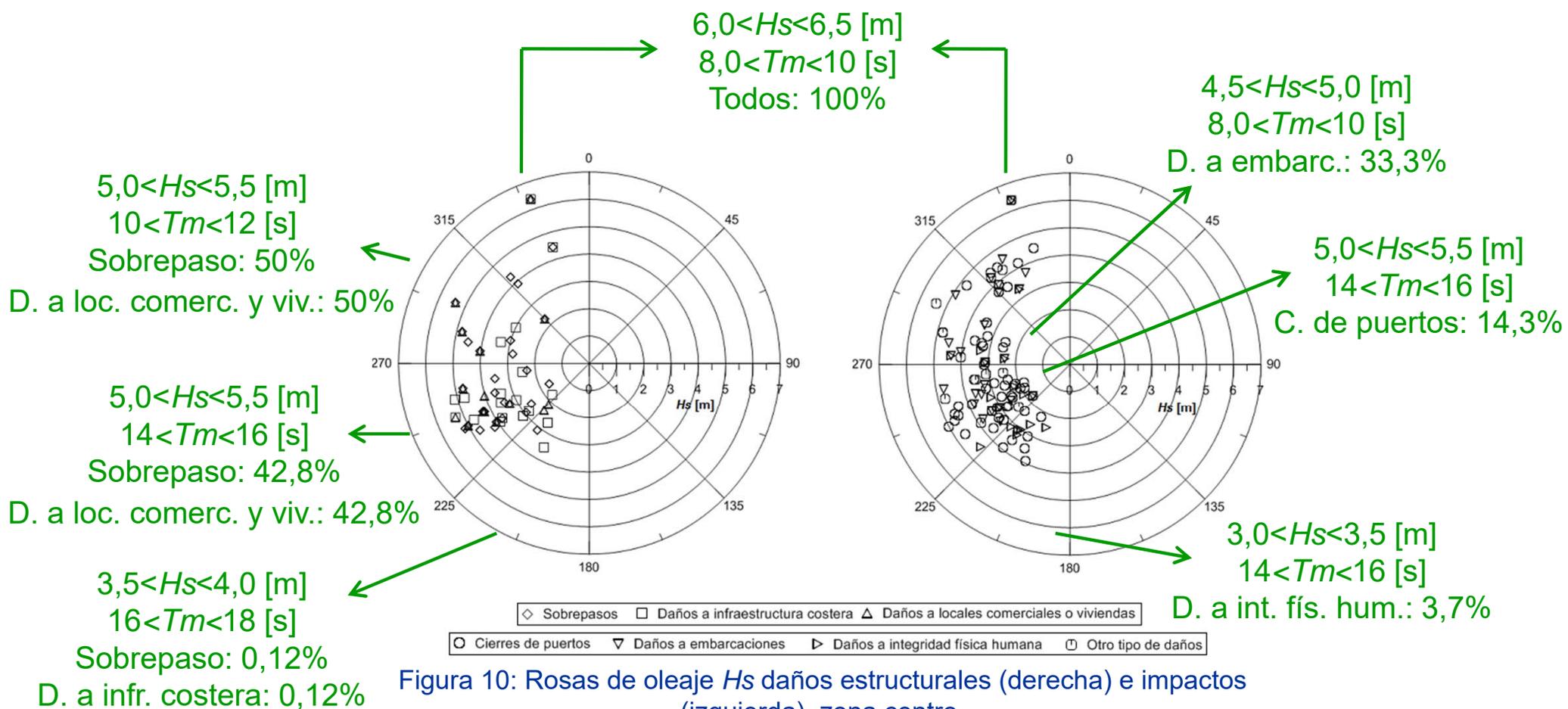


Figura 9: Rosas de oleaje H_s de daños estructurales (izquierda) e impactos (derecha), zona norte.

INCIDENCIA DE DAÑOS E IMPACTOS- ZONA CENTRO



INCIDENCIA DE DAÑOS A INFRAESTRUCTURA – ZONA SUR

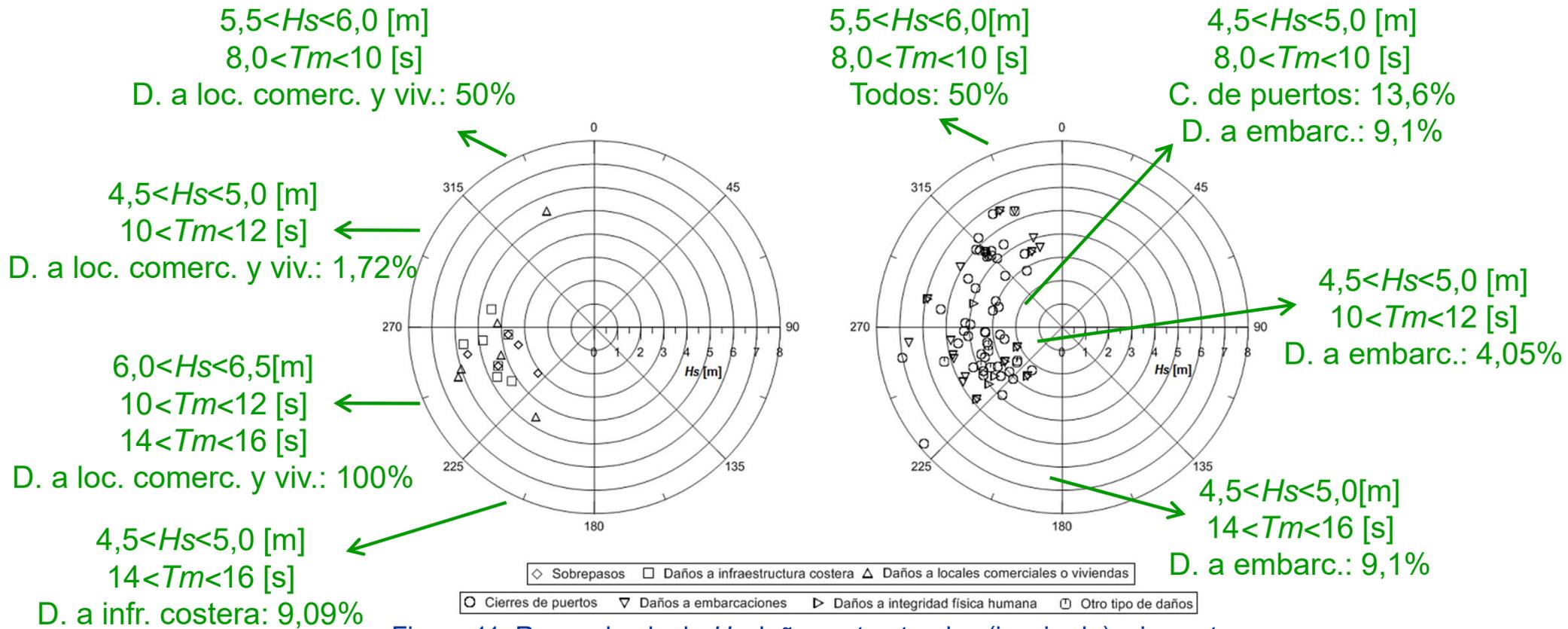


Figura 11: Rosas de oleaje H_s daños estructurales (izquierda) e impactos (derecha), zona sur.

INCIDENCIA DE DAÑOS SEGÚN ÍNDICES DE OSCILACIONES CLIMÁTICAS

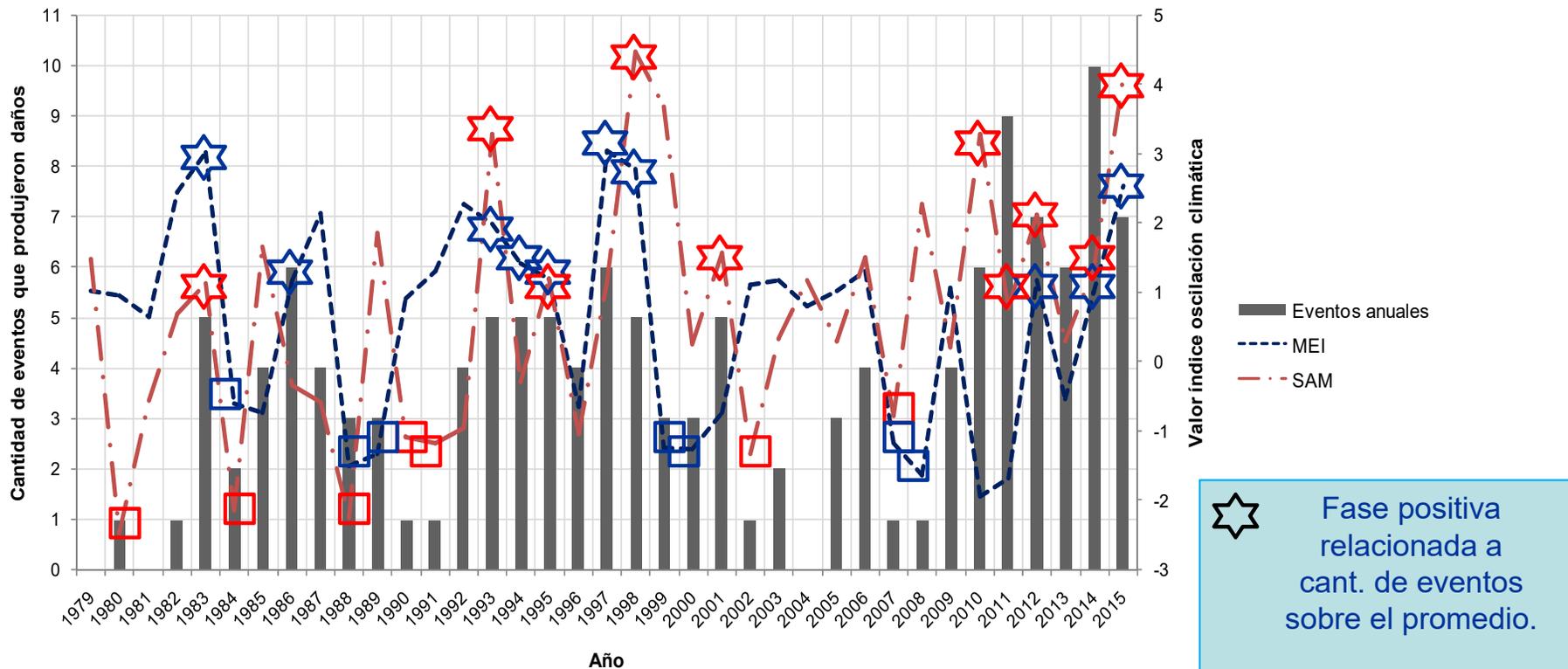
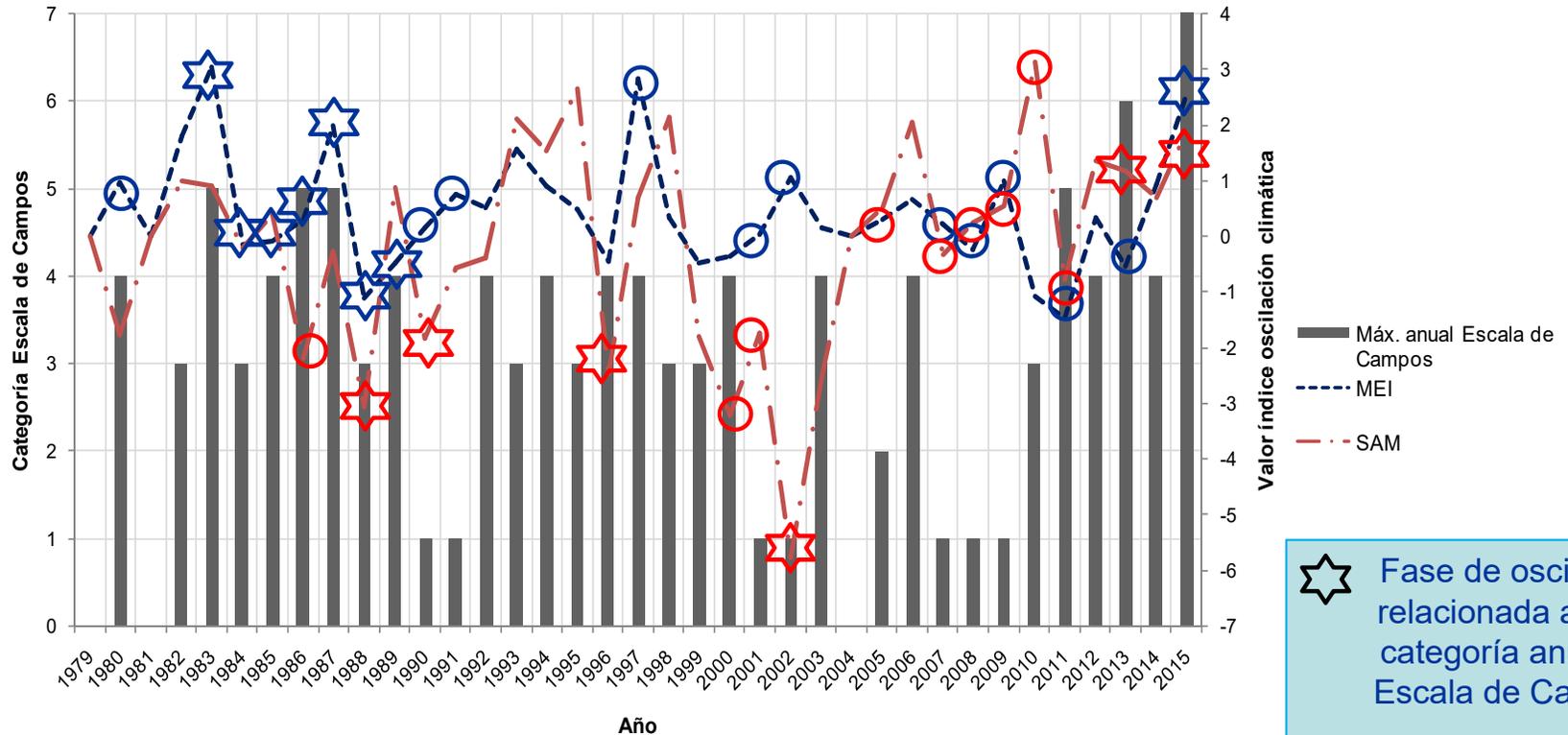


Figura 21: Distribución anual de eventos de marejadas con daños e impactos en las costas de Chile y máximos anuales de índices MEI y SAM, 1979-2015.

10 ☆
 7 □

9 ☆
 7 □

INCIDENCIA DE DAÑOS SEGÚN ÍNDICES DE OSCILACIONES CLIMÁTICAS



Anexo 4: Máximos anuales en Escala de Campos e índices de oscilaciones climáticas, 1979-2015.