



**Universidad
de Valparaíso**
CHILE

Facultad de Ingeniería

INGENIERIA CIVIL OCEÁNICA

Inundaciones Costeras, Más Allá de los Tsunamis

José Beyá, Patricio Winckler

(Presentado en XII JORNADAS FRANCISCO JAVIER
DOMÍNGUEZ, "INUNDACIONES: ORIGEN,
CONSECUENCIA, PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN"
25 y 26 de Octubre de 2012, SOCHID, Chile

DOC ICO 02-2012

XII JORNADAS FRANCISCO JAVIER DOMÍNGUEZ
“INUNDACIONES: ORÍGEN, CONSECUENCIA, PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN”
25 y 26 de Octubre de 2012
SOCHID, Chile

Inundaciones Costeras, Más Allá de los Tsunamis

José Beyá¹ (jose.beya@uv.cl) y Patricio Winckler¹ (patricio.winckler@uv.cl)

*¹ Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso
Avenida Brasil 1786, Valparaíso, Chile*

Resumen

En los últimos dos años hemos observado un creciente interés sobre las inundaciones costeras motivado principalmente por la ocurrencia del terremoto y tsunami del 27 de Febrero del año 2010, de cuyas consecuencias devastadoras Chile aún no se recupera totalmente. En este artículo hemos querido ampliar la visión sobre las inundaciones costeras más allá de los tsunamis, abarcando fenómenos asociados al paso de temporales y teniendo en cuenta el escaso conocimiento sobre ellos en nuestro país. Buscamos mediante esta nota despejar ciertos mitos existentes y motivar la investigación en estos temas.

A modo de introducción presentamos casos conocidos de grandes inundaciones costeras ocurridas en Nueva Zelanda, Holanda y Estados Unidos. Luego se agrega una pequeña recopilación de antecedentes sobre los efectos de marejadas históricas en Chile. Concluimos con una discusión sobre el estado actual de la práctica en el diseño de obras costeras y planteamos la necesidad de tomar decisiones analizando los sistemas naturales de manera integral, considerando la variabilidad de escenarios futuros. Se resalta la necesidad de mejorar el sistema de recolección y manejo de información marítima en Chile y de cómo este desconocimiento del medio impacta en el desarrollo sustentable de la costa y el mar.

1. Introducción

El territorio costero es uno de los ambientes más dinámicos del planeta donde interactúan agentes meteorológicos, geológicos y oceánicos en distintas magnitudes y escalas espacio-temporales. El conocimiento de estos agentes es fundamental para resguardar la seguridad de los asentamientos humanos, reducir los impactos de las obras costeras y garantizar la operación portuaria y el desarrollo de la industria.

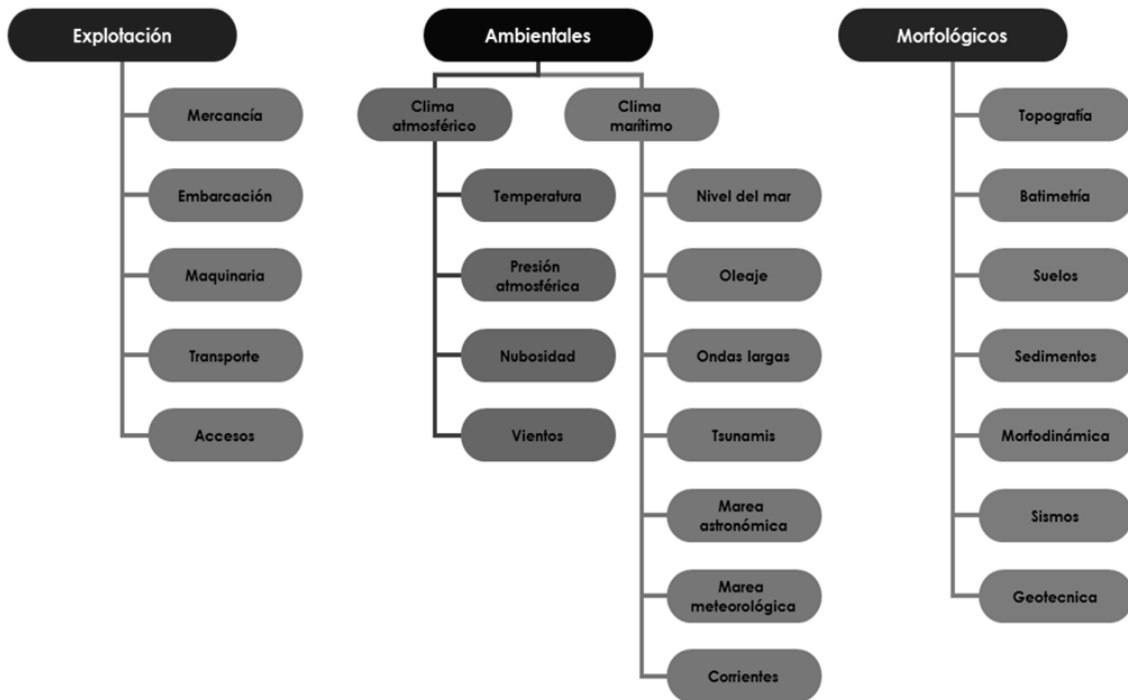
Uno de los fenómenos más importantes que afectan al territorio costero son las inundaciones. Por lo general, éstas se generan en áreas relativamente bajas donde el nivel del mar se eleva por sobre las cotas de edificación con algún tipo de recurrencia. Los impactos de la elevación del nivel del mar pueden listarse a continuación (Winckler y Cienfuegos, 2012):

- Inundación de las zonas costeras.
- Aumento de las planicies de inundación.
- Pérdida de territorios deltaicos.
- Desaparición de humedales.
- Erosión costera en playas y acantilados.
- Efectos en la cota de inundación en playas.
- Efectos en la dinámica de las dunas.
- Efectos en la hidrodinámica y morfodinámica de estuarios.
- Efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas.
- Aumento del daño durante inundaciones y tormentas.
- Intrusión salina en acuíferos.
- Subida del nivel de la capa freática.

Dada la amplia variedad y complejidad de los fenómenos que inciden en las causas de las inundaciones costeras es necesario realizar diseños integrales que consideren todos los agentes involucrados de manera probabilística. La Figura 1 presenta una descripción genérica de las condicionantes de un proyecto de obras marítimas que permite comprender que las inundaciones costeras están asociadas a factores atmosféricos (viento y presión atmosférica), oceanográficos (nivel del mar, oleaje, ondas largas, tsunamis, marea meteorológica y astronómica) y morfológicos (morfodinámica, sismos).

Este documento introduce al lector en los aspectos fundamentales que permiten comprender la fenomenología asociada a la inundación costera, sin entrar en muchos detalles en las metodologías específicas de cálculo. Mediante ejemplos en Chile y en el extranjero, ilustramos las escalas involucradas y planteamos una discusión sobre cómo este fenómeno es incorporado en la práctica en el diseño de obras costeras y en la definición de las cotas de edificación. Hemos privilegiado el uso de referencias a estudios recientes que incorporan el estado del arte en la cuantificación del fenómeno y que permitirán al lector profundizar en un tema de bastante complejidad.

Figura 1: Condicionantes de un proyecto de obras marítimas.



Fuente: Elaboración propia.

2. Causas de la inundación costera

Las inundaciones costeras se generan por diferentes causas que algunas veces actúan aisladas y otras en conjunto. A continuación presentamos algunos de los mecanismos que contribuyen a generar inundación, incluyendo la terminología técnica en inglés que se usa de manera indistinta en la práctica nacional. La secuencia de presentación obedece a la escala temporal y espacial de estos fenómenos (Tabla 1).

- **Wave Set-up:** Ante la presencia de olas rompientes se produce un aumento del nivel medio del mar en la costa que compensa en parte la formación del intenso gradiente espacial del flujo de energía del oleaje que induce la disipación por rotura. La cuantificación del wave set-up se efectúa a partir de la teoría de los tensores de radiación (Longuet-Higgins, 1962 y Longuet-Higgins y Stewart, 1963 y 1964), donde se asume un proceso estacionario y promediado en el tiempo para calcular el set-up a partir de las características del oleaje incidente.
- **Ondas de infra-gravedad y surf-beat:** Ondas de períodos característicos superiores al del oleaje pueden estar asociadas a trenes de olas u otras forzantes. Estas ondas, dependiendo de las características geográficas y batimétricas, pueden propagarse como ondas de contorno y quedar atrapadas en regiones semi-confinadas como playas encajadas, bahías, estuarios o dársenas portuarias. Según la geometría de la región costera son los períodos característicos en los cuales estas ondas pueden sufrir interferencia constructiva o resonancia y también amplificación por reflexiones, reducción del ancho y profundidad de propagación.

- **Tsunamis:** Ondas de período característico de entre 5 min a 1 hora cuyos mecanismos comunes de generación son levantamientos del suelo marino durante sismos y remociones en masa que entran o están en contacto con el agua. Los tsunamis tienen el potencial de causar grandes inundaciones. El de mayor cota de inundación registrada presenta una altura de 524 m en Lituya Bay, Alaska (Fritz *et al.*, 2001). En el caso del terremoto y tsunami de 2010 en Chile, las cotas de inundación media alcanzaron entre 5 y 15 m frente a la zona de dislocación sísmica, con máximos de hasta 30 m focalizados en farellones costeros (Fritz *et al.*, 2011).
- **Marea astronómica** (astronomical tide): Corresponde a variaciones cíclicas regulares de origen astronómico, que se explican con la superposición de ciclos regulares actuando a diferentes escalas desde semi-diurno a ciclos mensuales, anuales e incluso interdecadales (Pugh, 2004). En un diseño de ingeniería en territorio nacional, la marea astronómica se puede estimar a partir de las predicciones de marea que efectúa el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) en forma anual a partir de los registros de la red de mareógrafos. Este mismo servicio propone un método oficial para el cálculo de los valores no-armónicos de la marea en el contexto de los estudios oceanográficos requeridos para la ejecución de una obra (SHOA, 1999).
- **Marea meteorológica** (storm surge): Este fenómeno ocurre durante los temporales que están asociados a campos de baja presión atmosférica y vientos fuertes. En la literatura se suele separar el efecto del aumento del nivel del mar por presión atmosférica (barometric set-up), del de la sobre-elevación por viento (wind set-up) generada por el esfuerzo de corte de éste sobre la interfaz agua-aire. La variación del nivel del mar por presión atmosférica se produce por la variación de la ésta con respecto a su valor medio. Ejemplos recientes de la cuantificación de la marea meteorológica asociada a huracanes, incluyendo asimismo el oleaje han sido realizados para Nueva York (Lin *et al.*, 2010) y para el delta del río Mississippi (Dietrich *et al.*, 2011).
- **Variaciones climáticas de largo plazo:** Corresponden a anomalías en el nivel medio de la superficie del mar producto de cambios de gran escala en los océanos. Estos cambios se asocian a fenómenos como el cambio climático global y el fenómeno del Niño (ENSO). Molina *et al.* (2011) estudiaron el efecto de las variaciones climáticas sobre el oleaje a partir de estadísticas de hindcast durante el periodo 1985-2007, concluyendo que debido al calentamiento global se habrían producido aumentos de la altura significativa en 10cm, giros en la dirección del oleaje de 12° en la zona central de Chile. Bajo la condición de un Niño extremo, se observaron incrementos de 20cm en la altura significativa y un giro al norte de 13° en la dirección del oleaje en aguas profundas. Durante eventos Niña, las alturas aumentan en el mismo orden pero la dirección gira hacia el sur en 8°. Los periodos no habrían registrado variaciones significativas durante ese periodo.

Contreras *et al.* (2012) por su parte analizaron registros de hasta 60 años de extensión en mareógrafos de la red nacional, concluyendo que las tasas de variación del nivel del mar asociadas al cambio climático, del orden de unos pocos mm/año, parecen no ser significativas en la mayor parte de la costa chilena en comparación a la magnitud de los levantamientos sísmicos. No obstante, los fenómenos cíclicos irregulares son de relevancia para el diseño de obras marítimas. En efecto, las variaciones del nivel medio del mar (media mensual) asociadas al fenómeno ENOS pueden alcanzar hasta 30 cm durante años severos. Tanto las variaciones en el nivel medio del mar como las observadas en el oleaje parecen ser significativas para escalas de tiempo comparables con la vida útil de las obras marítimas.

- **Asentamientos de terreno:** Son causados por la pérdida o compactación del material del suelo y descensos de la corteza terrestre provocada durante grandes sismos. A modo de ejemplo, para el terremoto de Chile en 2010, se registraron sollevamientos de hasta 3 m en el Golfo de Arauco (Kelson *et al.*, 2012). En algunos casos los asentamientos se producen por el descenso del nivel freático y/o descomposición del suelo orgánico, e.g. turba (EW, 2003).

En la Tabla 1 se presenta una clasificación de las escalas espacial y temporal, mecanismos de generación y ejemplos de algunos de los fenómenos relacionados con la inundación costera mencionados anteriormente.

Tabla 1: Mecanismos de generación de algunos fenómenos relacionados con la inundación costera.

Fenómeno	Escala temporal	Escala espacial	Mecanismo generador
Wave set-up	1 – 30 s	1 – 10 ³ m	Oleaje generado por viento
Ondas infragravitatorias	30 – 300 s	10 ³ – 10 ⁵ m	Viento y Oleaje
Tsunamis	300 s - horas	10 ² – 10 ⁴ m (escala oceánica)	Terremotos, derrumbes
Marea astronómica	12 – 24 horas	10 ⁴ km (escala oceánica)	Movimientos astronómicos
Marea meteorológica	Horas a días	10 ³ - 10 ⁴ km (escala oceánica)	Viento y presión atmosférica
Variaciones climáticas de largo plazo	Meses a Décadas	10 ³ - 10 ⁵ km (escala global)	ENSO, Cambio climático
Asentamientos de terreno	Minutos, Décadas y más	10 ¹ - 10 ⁵ km (escala global)	Sismos, Movimientos tectónicos

A estos mecanismos que ocurren en costas abiertas al Océano Pacífico se suma el efecto de los **caudales efluentes** en ríos importantes. Durante episodios de alta escorrentía, el eje hidráulico en las cercanías de la desembocadura tiende a peraltarse por el aumento del caudal. Este efecto es local y puede ser de relevancia en la generación de sobrepaso por oleaje en sectores donde las desembocaduras han sido canalizadas (e.g. Estero Marga Marga, en Viña del Mar), e inundación aguas arriba de las mismas. Su cuantificación es posible mediante modelos numéricos de uso común en ingeniería marítima.

Un párrafo aparte merecen las denominadas **freak waves** (o rogue waves), que corresponden a olas individuales de mucho mayor altura a la esperada en un cierto estado de mar. Convencionalmente se acepta que en un estado de mar la altura de la ola máxima es aproximadamente 3 veces la altura de la ola promedio (1.86 veces la altura significativa; USACE, 2006), sin embargo, éstas exceden dicho valor y ocurren más frecuentemente de lo predicho por las teorías de uso convencional en ingeniería marítima. Estas olas de gran altura y esbeltez pueden causar fuertes solicitaciones en buques y estructuras en mar abierto aunque también se presentan cercanas a la costa (e.g. Maverick Beach, 2010 en Didenkulova, 2011). Los mecanismos causantes son aun desconocidos aunque algunas hipótesis las relacionan con las interacciones no lineales ola-ola y ola-corriente, la propagación no lineal de grupos de olas en mar de cresta corta y la convergencia espacio-temporal de la energía asociada a dos o más paquetes de ondas. En Chile no hay estudios específicos que apunten a cuantificar su ocurrencia ni efectos en el borde costero.

3. Ejemplos a nivel mundial

Huracán Katrina, Estados Unidos (2005)

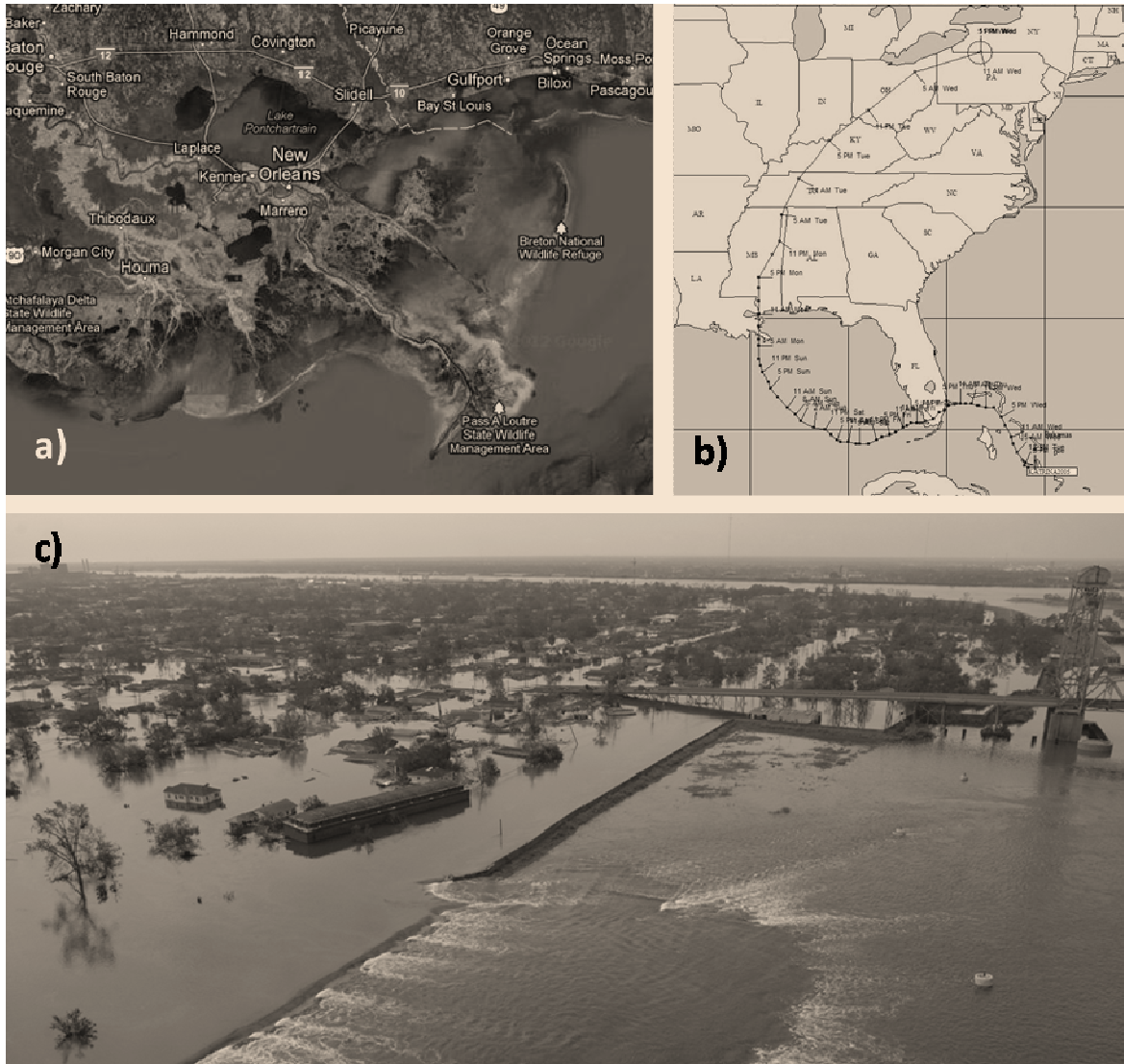
El huracán Katrina fue el desastre natural más destructivo en la historia de EE.UU. La destrucción total y la inundación catastrófica causadas por este evento superan ampliamente la de tres otros desastres importantes: el incendio de Chicago de 1871, el Terremoto e incendio de San Francisco de 1906, y el huracán Andrew de 1992. Los efectos devastadores de Katrina sobre la economía de EE.UU. se sintieron mucho antes de que la tormenta llegara a la costa el 29 de agosto del 2005. Al acercarse a la costa (Figura 2b), Katrina comenzó azotando la infraestructura de extracción de hidrocarburos en el Golfo de México, obligando la evacuación de más del 82% de 800 plataformas petroleras tripuladas y reduciendo la producción de petróleo a más de la mitad. Hay que señalar que alrededor de 75 huracanes de la magnitud de Katrina (Categoría 3) han arribado a la parte continental de Estados Unidos desde 1850, aproximadamente una vez cada 2 años.

Katrina no fue un huracán típico pues su tamaño era mayor. En comparación con el huracán Camille, una tormenta de categoría 5 que devastó la costa del Golfo en 1969 con vientos de velocidades superiores a los de Katrina y causante de más de 6000 víctimas fatales, los vientos de Katrina se extendieron por más de 100 millas desde su centro mientras que los vientos de Camille sólo abarcaron 70 millas desde su centro. Debido a esta diferencia de tamaño, el huracán Katrina afectó un área más extensa impactando casi 93,000 millas cuadradas, mucho más que el huracán Camille, mientras que las dos tormentas tuvieron diferentes alturas máximas de inundación; 22.4 pies y 28 pies Katrina y Camille respectivamente.

Los vientos y marejadas de Katrina sobrepasaron la infraestructura de protección en los alrededores de la ciudad de Nueva Orleans (Figura 2c) causando daños a la propiedad residencial y comercial en la ciudad y en las comunidades costeras alejadas y por varios kilómetros a lo largo de la costa. La marejada de la tormenta afectó los diques a lo largo de los tramos más bajos del río Mississippi y los bordes del lago Pontchartrain inundando casi el 80% de la ciudad de Nueva Orleans (Figura 2a), que se encuentra en su mayoría bajo el nivel del mar. La extensión de la destrucción de Katrina se extendió más allá de los límites de Nueva Orleans afectando a muchos pueblos pequeños y grandes ciudades que fueron destruidos o gravemente dañados a lo largo de toda la Costa del Golfo por varios kilómetros tierra adentro (Demirbilek, 2010).

En una visita efectuada por Patricio Winckler (co-autor) en 2011 al barrio de Lower Ninth Ward en New Orleans -otrotra arrasado por las aguas desbordadas del lago Pontchartrain- se observaron soluciones habitacionales cuyo diseño incorpora estructuras con un primer piso “transparente” en términos hidráulicos. Esta solución ha sido incorporada en la futura norma chilena “*NTM 007 2011 Diseño estructural para edificaciones en zonas inundables por tsunami*”, actualmente en tramitación, donde se exige que las edificaciones emplazadas en terrenos bajo la cota de inundación para las que se proyecte el primer nivel habitable sobre la cota de inundación, deberán estar apoyadas en una subestructura formada por elementos estructurales tales como pilares y columnas. Guardando las diferencias entre la hidrodinámica de las inundaciones generadas por tsunamis y un rebasede diques, el ejemplo de diseño y el modelo de gestión encabezado por la fundación “Make it right” (www.makeitrightnola.org) puede ser útil de cara a la entrada en vigencia de la norma.

Figura 2: (a) New Orleans y lago Pontchartrain, (b) Trayectoria del huracán Katrina y (c) rotura de uno de los diques en el 9th Ward, New Orleans, el 30 de agosto de 2005.



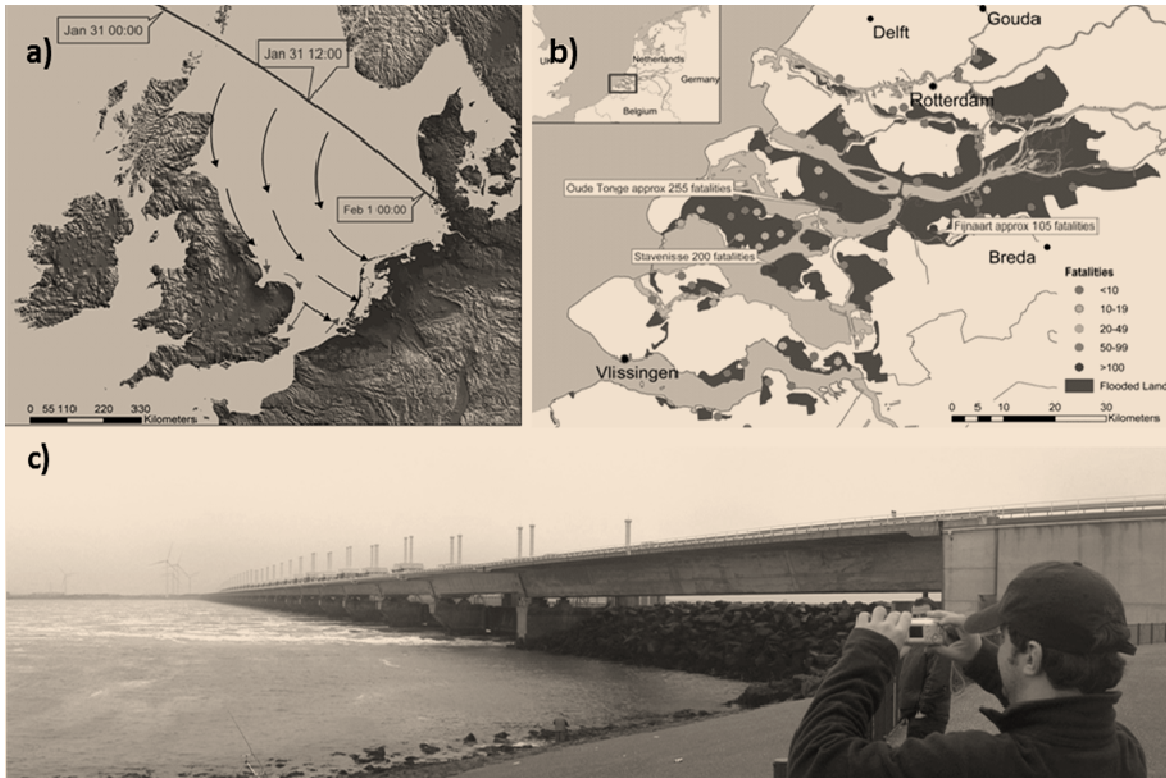
Fuentes: (a) Adaptado de www.maps.google.com. (b) NWS EEUU, 2012. (c) Fema, 2012.

Países bajos (1953)

La marejada que azotó la costa este de Inglaterra y la costa suroeste de los Países Bajos durante la noche del sábado 31 enero de 1953 causó el peor desastre natural de los últimos dos siglos en el norte de Europa. El aumento del nivel del mar fue generado por un intenso frente de bajas presiones que se desplazó rápidamente hacia el sureste por el Mar del Norte, produciendo vientos muy fuertes sobre la superficie del mar desde el noreste de Escocia hasta los Países Bajos (Figura 3a, 3b). En combinación con una marea alta, la marejada comenzó su azote hacia el sur sobrepasando las defensas costeras en ambos países. Más de 600 kilómetros cuadrados de tierra fueron inundados y 307 vidas perdidas en el Reino Unido, mientras que en los Países Bajos, más de 1.800 personas murieron ahogadas. El daño resultante en ambos países sigue siendo el peor visto desde la Segunda Guerra Mundial. Aunque las causas de la inundación son bien

conocidas, el costo y la probabilidad de que ocurra de nuevo un evento de esta naturaleza hoy no se comprenden en su totalidad (RMS, 2003).

Figura 3: (a) Trayectoria del frente de baja presión de la tormenta de 1953 sobre el Mar del Norte (línea negra) con la dirección del viento (flechas oscuras) y la dirección del peralte del nivel del mar (flechas claras). (b) Extensión del área de inundación en los Países Bajos y los lugares con mayor número de víctimas. (c) Compuertas de control de inundación en el estuario de Oosterschelde, Países Bajos, durante una visita en 2009.



Fuentes: (a,b) RMS, 2003. (c) elaboración propia.

La ingeniería costera holandesa ha evolucionado en función de ésta y otras inundaciones menores ocurridas sistemáticamente desde que comenzaron a apoderarse terrenos bajos al mar. El territorio costero ubicado a una cota más baja que el nivel medio del mar está protegido por diques de diferentes materiales con una interesante adaptación a la trama urbana, pues ofrecen un soporte de actividades de recreación y conectividad marítimo-terrestre. En los estuarios se controla la inundación con compuertas que permiten la navegación, como en el caso de la entrada al Puerto de Rotterdam, o no lo hacen, como en el caso de las compuertas de control de inundación en el estuario de Oosterschelde (Figura 3c).

Llanura de Hauraki, Nueva Zelanda (1938)¹

Las mayores mareas y tormentas del siglo pasado en Nueva Zelanda se produjeron en 1936 y 1938. El gran ciclón del 1 y 2 febrero de 1936, con presiones atmosféricas bajo los 970 hPa, feroces vientos y olas, combinados con una marea de perigeo muy alta, causó daños generalizados e inundaciones a lo largo de la costa este de la Isla Norte de Nueva Zelanda. Carreteras costeras fueron arrasadas mientras que el mar

¹Más que por su relevancia a nivel mundial, este caso fue incluido por el conocimiento cercano del primer autor en relación a los sistemas de protección contra inundaciones en la Región de Waikato en Nueva Zelanda.

inundó las casas 100 m tierra adentro en Castle point donde el mar sobrepasó las dunas costeras. Un mes más tarde, los días 25-26 de marzo de 1936, un vendaval oriental producido por una baja de presión combinada con mareas extremadamente altas causaron daños e inundaciones costeras en la región de Auckland. Dos años más tarde, los días 4-5 de mayo de 1938, 35.000 hectáreas de las llanuras más bajas de Hauraki fueron inundadas en una combinación de mareas altas y vendavales del noreste que causaron un gran oleaje y el peralte del nivel del mar (Figura 4b). Hubo varios sobrepasos del dique costero de Waitakarau a Kopu. La inundación se vio agravada por las fuertes lluvias (Brenstrum E., 1998 en MFE, 2008).

Figura 4: (a) Esquema aproximado de los diques del sistema de protección contra inundaciones de los ríos Waihou y Piako, Hauraki Plains, Nueva Zelanda. (b) Inundación de 1938 en terreno agropecuario. (c) Inundación ciclón Drena en 1997 de sector urbano y carretera costera SH25 al norte de Thames.



Fuentes: (a) Elaboración propia adaptada de www.maps.google.com, (b) www.ohinemuri.org.nz, (c) www.waikatoregion.govt.nz.

Las llanuras de Hauraki son antiguos humedales que fueron drenados para el desarrollo de la ganadería. La turba orgánica del suelo que las compone se degrada más rápido al no estar saturada con el consiguiente asentamiento de 2 cm/año (EW, 2003). Hoy en día el gobierno regional mantiene y revisa los estándares de los diques y el sistema de protección contra inundaciones. Estos diques contienen las inundaciones causadas por aumentos del caudal de los ríos y subidas de los niveles del mar que no sólo afectan la costa si no que también imponen un control hidráulico aguas abajo peraltando los niveles del escurrimiento fluvial desde la desembocadura.

En la actualidad Nueva Zelanda, al igual que otros países afectados a inundaciones, se han dado cuenta que los costos en ingeniería y medioambiente producto de modificar los sistemas naturales es alto y creciente en el tiempo dada gran complejidad de éstos y a la incertidumbre asociada a los procesos físicos que los afectan. Un sistema natural alterado implica realizar ingeniería de por vida para mantener las estructuras y controlar nuevos problemas no previstos que se producen al alterar el equilibrio natural original. Es por ello que las estrategias actuales incluyen medidas de ingeniería blanda como por ejemplo: retirarse de las zonas inundables, cambiar el uso de suelo en terrenos de altas pendientes y recuperar ecosistemas como manglares, humedales y planicies de inundación entre otros.

4. Casos en Chile

Cada invierno es común ver publicaciones de prensa reportando los estragos que las marejadas producen en la costa, incluso en sectores normalmente protegidos como Puerto Montt (SoyChile.cl, 05/06/2012). Como ejemplo reciente, las marejadas del invierno del 2012 dejaron cuantiosos daños producto de inundaciones a la infraestructura situada cerca del borde costero de la V región (Municipio de Viña del Mar, 16/08/2012). Aunque las inundaciones costeras en Chile no parecieran presentar un problema de la misma magnitud que los tsunamis, daños puntuales por inundaciones menores causadas por marejadas tienen una recurrencia anual a lo largo del país. Las razones por las cuales en Chile no presentan efectos tan devastadores como en otras partes del mundo son: la baja frecuencia de ocurrencia de vientos ciclónicos de alta magnitud y la gran profundidad y corta extensión de la plataforma continental en comparación con las costas del Golfo de México, Océano Índico y Mar del Norte.

En Chile existen pocos casos documentados en detalle y escasos datos oceanográficos confiables y de fácil acceso para analizar las causas de las inundaciones y el desempeño de las obras marítimas ante las mismas. Para efectos ilustrativos, hemos incluido un estudio preliminar de la inundación ocurrida el 4 de Junio del 2008 en el puerto de San Antonio, donde la ocurrencia conjunta de varios fenómenos habría generado pérdidas en la Caleta de Puertecito.

Puertecito, San Antonio (2008)

El 4 de Junio de 2008 el nivel del mar subió por sobre la cota de coronamiento de la explanada (+ 2.5 m NRS) en Puertecito, San Antonio (Figura 5a, 6b). Fuertes marejadas en combinación con la pleamar de sicigia produjeron sucesivas inundaciones con periodos del orden de minutos, que alcanzaron un nivel de al menos 50cm sobre el nivel de la losa (Figura 5c). Este fenómeno según los pescadores del sector, es raro pero ocurre cada cierto número de años. En lo sucesivo hacemos un esfuerzo por cuantificar cada una de las variables que pudieron haber tenido influencia en la inundación. Naturalmente, un diagnostico adecuado debiera complementarse con un modelo hidrodinámico del puerto en su integridad.

Durante el 4 de Junio se registró oleaje de gran intensidad proveniente del tercer cuadrante. El registro histórico generado a partir del modelo Wavewatch III (NOAA, 2012) indica que el temporal alcanzó una altura significativa máxima de $H_s=4.2\text{m}$ y un periodo pico de $T_p=15\text{s}$, con dirección WSW. Sin embargo, a las 10:36 AM, hora de la pleamar (+ 1.76m NRS), el pico de la marejada aun no arribaba a la costa y el modelo registraba $H_s=3.5\text{m}$ y $T_p=16\text{s}$. Si bien la ocurrencia de las peores condiciones de oleaje no es estrictamente coincidente con la pleamar de sicigias, la ocurrencia conjunta de los valores observados para estas variables es, sin duda, excepcional. La variación de la presión atmosférica y el viento registrados para ese día por la estación meteorológica Viña del Mar (SINCA, 2012), indica que dichos fenómenos no tuvieron magnitudes importantes como para haber provocado un aumento del nivel del mar significativo, en forma independiente. No obstante, su efecto aunque menor sería aditivo al generar una marea meteorológica positiva.

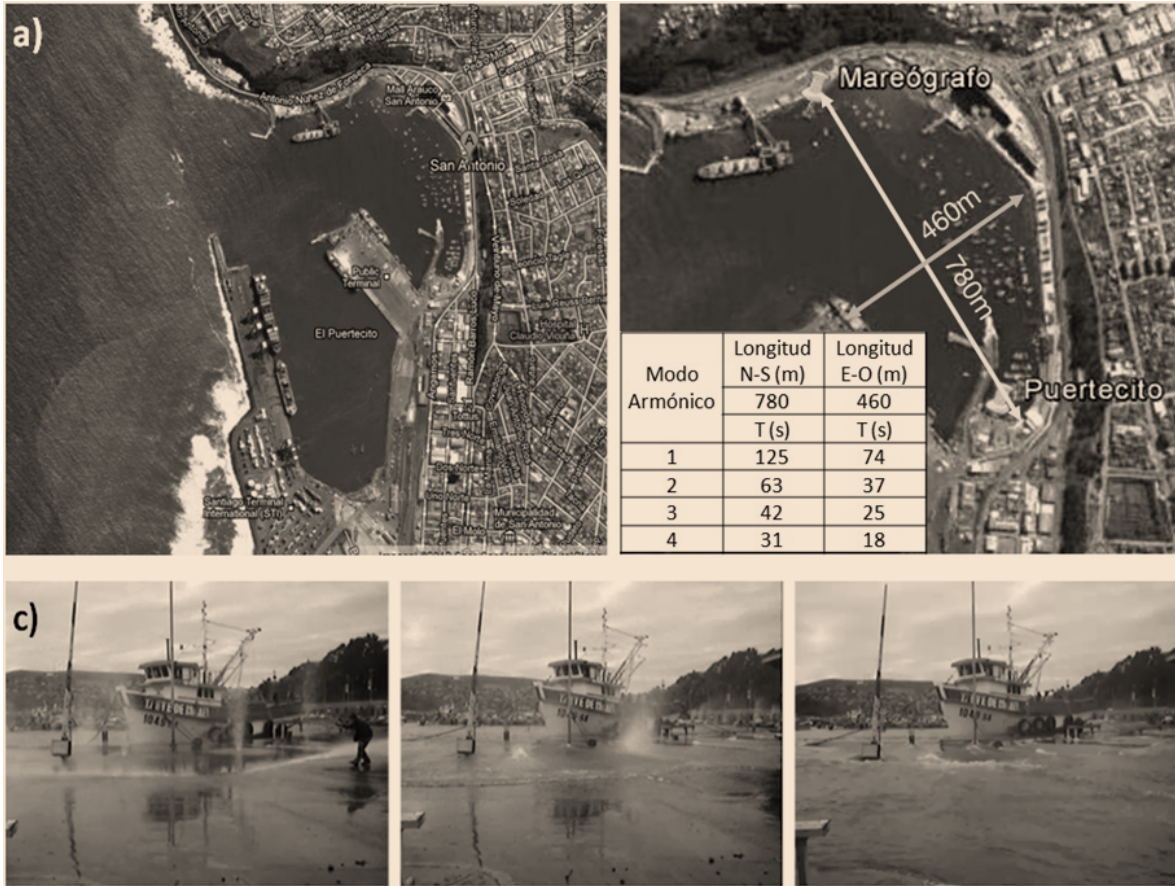
Dada la profundidad del cañón submarino en el que se encuentra la entrada al puerto, el set-up de oleaje se estima de baja magnitud. La rompiente en Molo Sur es de tipo spilling-plunging y es característica de las pendientes de fondo formadas por un clima de olas energético en presencia de arenas finas y medias que son transportadas desde el Rio Maipo. En este sector el set-up por oleaje es mayor que en el sector norte de la entrada donde hay acantilados y la rompiente es limitada. Sin embargo, la compleja batimetría del sector hace que el oleaje se refracte en direcciones opuestas en el lado sur y norte de la entrada del puerto. Debido a la presencia de defensas costeras altamente reflejantes en el sector norte, el oleaje incidente se refleja en forma parcial hacia el interior de la dársena. Estas condiciones pudiesen inducir corrientes pulsantes u ondas largas hacia el interior del puerto que podrían explicar parte de las inundaciones.

Un análisis simplificado de los períodos naturales de la dársena² en el puerto pesquero indica valores entre 20s a 2min (Figura 5b). Por otra parte, el análisis de la serie de tiempo del mareógrafo de San Antonio y su correspondiente espectro de frecuencias muestran la presencia de energía asociada a períodos de 5 minutos, con un rango entre 8 y 12 minutos (Figura 6). Desafortunadamente la frecuencia de muestreo es de 2 minutos y no suficiente para registrar los períodos característicos menores que podrían estar asociados a resonancia de la dársena interior de Puertecito (Figura 5b). No es posible por tanto, asegurar que la frecuencia del máximo espectral en torno a los 5 minutos represente el período de oscilación de las ondas largas que inundaron Puertecito. Esta área del espectro puede estar afecta a “aliasing” asociado a ondas de períodos del orden de 2 minutos o inferiores y podría indicar también ondas asociadas a los grupos de olas o corrientes pulsantes que ingresan a la dársena.

En resumen, mediante este análisis preliminar sólo es posible establecer conclusiones cualitativas respecto de las causas que generaron la inundación en Puertecito. No obstante, la información meteo-oceanográfica disponible permitiría acometer un estudio exhaustivo para establecer las causas y recomendar acciones tendientes a la mitigación de los futuros efectos en el puerto pesquero.

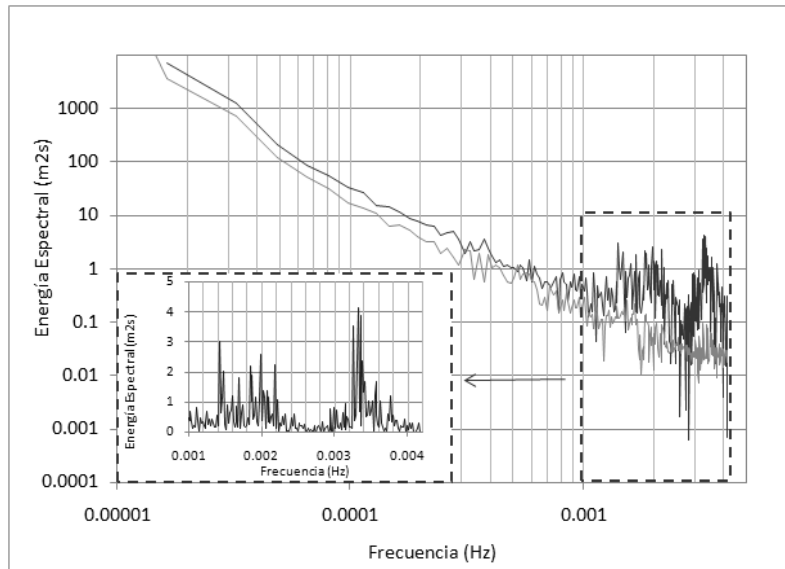
²El análisis simplificado se efectúa a partir de valores de la profundidad media, las dimensiones en planta y la celeridad de la onda. Análisis de resonancia más sofisticados pueden efectuarse mediante el forzamiento con espectros de ruido blanco (de oleaje) en modelos numéricos (Flores, 2010).

Figura 5: (a) Puerto de San Antonio. (b) Ubicación del sector de Puertecito y el mareógrafo en Puerto San Antonio. La tabla indica estimaciones de periodos naturales de oscilación según las dimensiones de la dársena y la profundidad media a la hora de la pleamar del día 4 de Junio del 2008. (c) Inundación generada en la explanada de Puertecito. La secuencia abarca unos 30 segundos.



Fuentes: (a) Adaptado de www.maps.google.com. (b) Elaboración propia y (c) Adaptado de video disponible en www.youtube.com/watch?v=JTwm8v9LS0c.

Figura 6: Espectros del mareógrafo de San Antonio 04/06/2008 (línea oscura) y 01/06/2008 (línea verde). En el espectro del 04/06/2008 se observa un pico asociado a una frecuencia de 0.0033Hz o período 5min aproximadamente y otro de mayor ancho de banda asociado a períodos entre 8 y 12 minutos. El espectro del 01/06/2008 corresponde a un día con poco oleaje (HS0= 1.3m) y viento suave para su comparación.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de mareas disponibles en IOC (2012).

5. Sobre las metodologías de cálculo del nivel de diseño

En Chile no existen criterios o metodologías claras para el establecimiento de los niveles máximos de inundación por marejadas. Históricamente los diseños de infraestructura costera han considerado variaciones de nivel del mar adicionales a la marea astronómica aunque los criterios que se utilizan para su cálculo son variados dada la falta de consenso, escasez de mediciones y la falta de estudios específicos. Esta información es de carácter difusa y no existe un estudio u organismo que administre este tipo de estudios en forma sistemática. Identificamos aquí un punto interesante que podría abordarse en futuras líneas de investigación e incluirse en las recomendaciones de diseño que está desarrollando la Dirección de Obras Portuarias (DOP) del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Aunque la ocurrencia de vientos ciclónicos extremos y oleaje provenientes del cuarto cuadrante han sido poco documentados, estos impactan significativamente en las inundaciones costeras. Esto se suma a que las variaciones climáticas de largo plazo (e.g. fenómenos ENSO y cambio climático global) no son normalmente abordadas en los diseños en Chile, aun cuando su existencia altera el nivel medio de mar y los patrones de viento y oleaje a escala regional. Otros fenómenos poco documentados para su consideración en los diseños son la existencia de ondas largas en bahías, puertos, playas, estuarios y freak waves.

Dada la amplia variedad y complejidad de los fenómenos hidro-meteorológicos que inciden en las causas de las inundaciones costeras es necesario realizar diseños integrales que consideren todos los agentes involucrados de manera probabilística. Una primera aproximación a la definición de las cotas de inundación puede lograrse mediante la siguiente expresión:

$$C = NRS + Z_{MA} + Z_{MMP} + Z_{MMV} + W_{SETUP} + O_{IG} + \text{Otros efectos}$$

Donde:

C = Nivel de diseño

NRS = Nivel de reducción de sondas³

Z_{MA} = Marea astronómica

Z_{MMP} = Marea meteorológica por variación de la presión atmosférica

Z_{MMV} = Marea meteorológica por viento

W_{SETUP} = Set-up de oleaje

O_{IG} = Ondas infragravitatorias

Entre “*Otros efectos*” deben incluirse causas de tipo excepcional como sollevamientos y subsidencia costera, efectos de efluentes, resonancia en dársenas, variaciones en el largo plazo, entre otros. Naturalmente la definición del peso relativo de cada una de estas variables depende del caso en estudio, pues el uso de reglas generales puede no ser adecuado para las obras marítimas, por su especificidad.

Dada la diversa naturaleza de las variables consideradas, esta expresión puede aplicarse en forma determinística, puramente probabilística (e.g. mediante simulaciones de Montecarlo), o, como combinación de ambas, dependiendo del tipo de estadística disponible. En la práctica nacional se utiliza esencialmente un modelo determinístico donde sólo se considera la variable oleaje y sus derivados (e.g. wave setup) que

³El Nivel de Reducción de Sondas (NRS) que en Chile corresponde al plano determinado por la mayor bajamar en cigias estando la Luna en perigeo (SHOA, 1999) y se determina mediante levantamientos topo-batimétricos.

surgen de un análisis de valores extremos que incluye la cuantificación de la incertidumbre para diferentes periodos de retorno. Es en esta materia donde se debe poner énfasis tanto en investigación como en la práctica, de modo de incorporar la incertidumbre en el diseño de nuestras obras marítimas. Un ejemplo interesante constituye el atlas de inundación del litoral peninsular español (GIOC, 2001), donde se aplica una metodología similar para estimar la inundación con baja resolución costera, es decir, sin abarcar la topobatimetría de precisión en asentamientos costeros.

El cálculo de cada una de estas variables puede tener diferentes grados de complejidad, dependiendo de la información disponible y los plazos contemplados en el estudio. La marea astronómica se analiza a partir de las Tablas de Marea del SHOA en tanto que la marea meteorológica por viento se puede estimar de expresiones empíricas o modelos numéricos, según fuera descrito en la Sección 2. Si se cuenta con estadísticas históricas de presión atmosférica en el sitio de estudio, la marea meteorológica por variación de la presión atmosférica puede cuantificarse mediante la expresión:

$$\Delta\bar{\eta} = -\frac{\nabla P}{\rho g}$$

Donde:

$\bar{\eta}$ = Nivel medio del mar

∇P = Variación de presión con respecto a su nivel medio $P_0=101.325 P_a$.

ρ = Densidad del agua

g = Aceleración de gravedad

El set-up de oleaje puede calcularse mediante formulas empíricas (Wave Set-up, USACE, 2006). El peralte por viento puede calcularse mediante la denominada fórmula de Zuiderzee (p. 15-2, USACE, 1997) y otras formulaciones menos explícitas como las especificadas por Dean and Dalrymple (1991) y Kamphuis (2010). En la práctica para geografías irregulares es más preciso utilizar modelos numéricos como ADCIRC, SLOSH, Delft3D, Mike 21 HD, entre otros de uso común en ingeniería marítima.

6. Sobre la disponibilidad de Información

Existe escasa información respecto a casos estudiados de inundaciones costeras y mediciones. Mejoras en la disponibilidad, calidad y cantidad de la información mejorarían el entendimiento del fenómeno, permitiendo diseños más robustos, además de la definición de zonas de inundación para un uso sustentable y seguro del borde costero. En términos generales, visualizamos algunas barreras que limitan el avance en la materia, y que podrían ser sobrellevadas mediante las siguientes acciones:

- Ampliar la cobertura de la red de mediciones de oleaje y mejorar la disponibilidad de la información administrada actualmente por el SHOA (para estudios oceanográficos) y la DOP (para proyectos de ingeniería). La estadística de largo plazo de oleaje de buena calidad no es de fácil acceso, lo que dificulta la investigación fuera del marco de proyectos concretos de obras marítimas. Ejemplos de manejo adecuado de la información se encuentran a nivel nacional en los registros de los estudios de impacto ambiental (e-seia, <http://www.sea.gob.cl/>) y el sistema de información para calidad del aire (SINCA, <http://sinca.mma.gob.cl>). A nivel internacional Puertos del Estado en España (<http://www.puertos.es/>) y la Agencia Oceanográfica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, <http://www.noaa.gov>) presentan información gratuita y de fácil acceso de oleaje.

- Ampliar mediciones batimétricas y topográficas, utilizando tecnologías de percepción remota como LIDAR, SAR o similares, que están en franco desarrollo en la actualidad (Robinson, 2010). Cabe destacar que esta información es clave para la elaboración de cartas de inundación por tsunami de mayor precisión.
- Mejorar disponibilidad de estudios de ingeniería realizados en el país para análisis retrospectivo. Los organismos públicos con competencias en el uso del borde costero (MOP, SHOA, DIRECTEMAR, Servicio de Evaluación Ambiental, Empresas Portuarias, etc.) debieron contar con un centro de documentación centralizado y de fácil acceso con información útil para futuros proyectos.
- Mejorar la red de mediciones de parámetros meteorológicos y oceanográficos a lo largo de la costa y en los territorios insulares, incluyendo la red de mareógrafos, la incipiente red de boyas de oleaje y las estaciones meteorológicas ubicadas en la costa.
- Generar estadística de largo plazo de buena calidad con modelos retrospectivos que estén accesibles a bajo costo para el conocimiento del comportamiento estocástico de los fenómenos hidro-meteorológicos involucrados en las inundaciones costeras.

Referencias

Contreras, M.; Winckler, P. y Molina, M. (2012). Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*. ISSN 0370-4009-Nº466.

Demirbilek, Z. (2010). Hurricane Katrina and ocean engineering lessons learned, *Ocean Engineering* 37 (2010), 1-3.

Didenkulova, I. (2011). Shapes of freak waves in the coastal zone of the Baltic sea. *Boreal Environment Research* 16 (suppl A): 138-148.

Didenkulova, I.; Slunyaev, A.; Pelinovsky E.; y Kharif C. (2006). Freak waves in 2005. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 1007-1015.

Dean, R. y Dalrymple, R. (1991). *Water waves mechanics for engineers and scientists*. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 2. World Scientific.

Dietrich, J.; Zijlema M.; Westerink J.; Holthuijsen, L.; Dawson, C.; Luetlich, R Jr.; Jensen, R.; Smith, J.; Stelling, G.; Stone, G. (2011). Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering* 58 (2011), 45-65

EW (2003). Subsidence rates of peat since 1923 in the Hauraki plains area, *Environment Waikato*, Technical Report 2004/18.

FEMA (2012). Photo library. Hurricane Katrina. www.fema.gov/photolibrary/photo_details.do?id=18177.

Flores, C. (2010). Aplicación de modelos numéricos para el estudio de agitación y resonancia en el puerto de Valparaíso, Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso.

Fritz, H.; Petroff, C.; Catalán, P.; Cienfuegos, R.; Winckler, P.; Kalligeris, N.; Weiss, R.; Barrientos, S.; Meneses, G.; Valderas-Bermejo C.; Ebeling, C.; Papadopoulos, T.; Contreras, M.; Almar, R.; Domínguez, J.; Synolakis, C. (2011). Field survey of the 27 February 2010 Chile tsunami. *Pure and Applied Geophysics* 2011. Volume 168, Number 11, 1989-2010. SpringerBasel AG.

Fritz, H.; Hager, W. y Minor, H (2001). Lituya bay case: rockslide impact and wave run-up. *Science of tsunami hazards*. Volume 19 Number 1, 3-22

GIOC (2001). Atlas de inundación del litoral peninsular español. Documento temático. Universidad de Cantabria.

IOC (2012). Sea level station monitoring facility. Archivos de mareas accesibles desde www.ioc-sealevelmonitoring.org/

- Kelson, N; Witter, R.; Tassara, A.; Ryder, I.; Ledezma, C.; Montalva, G.; Frost, D.; Sitar, N.; Moss, R. y Johnson, L. (2012) Co-seismic tectonic surface deformation during the 2010 Maule, Chile, Mw 8.8 Earthquake. *Earthquake Spectra*, Volume 28, No. S1, S39–S54
- INHA (2009). Análisis del proyecto de ingeniería frentes de ataque puerto San Antonio. Estudio realizado para puerto San Antonio.
- Kamphuis J. (2010). Introduction to coastal engineering and management, second edition. Advanced Series on Ocean Engineering. Volume 30. World Scientific.
- Lin, N., K. A. Emanuel, J. A. Smith, and E. Vanmarcke (2010). Risk assessment of hurricane storm surge for New York City, *J. Geophys. Res.*, 115, D18121, doi:10.1029/2009JD013630.
- Longuet-Higgins, M. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to “surf beats”. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 13, No. 4, 481 – 504.
- Longuet-Higgins, M. y Stewart, R. (1963). A note on wave set-up. *Journal of Marine Research*, Vol. 21, 4–10.
- Longuet-Higgins, M. y Stewart, R. (1964). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep-Sea Research*, 11, 529-562.
- Make It Right Foundation (2012). www.makeitrightnola.org. [accesada 21/10/2012].
- Molina, M.; Contreras, M.; Winckler, P.; Salinas S. y Reyes, M. (2011). Consideraciones sobre las variaciones de mediano y largo plazo del oleaje en el diseño de obras marítimas en Chile central. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*. ISSN 0370–4009–Nº464.
- Municipio de Viña del Mar. (16/08/2012) <http://www.vinadelmarchile.cl/articulo/municipio/1/2204/municipio-de-vina-del-mar-estimo-en-mas-de-200-millones-de-pesos-los-danos-por-marejadas-en-el-borde-costero.html>. [accesada 21/10/2012].
- NOAA (2012). Environmental Modeling Center. Archivos de oleaje modelo hindcast Wavewatch III, accesibles desde el sitio <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>.
- NHC(2005). Tropical cyclone report hurricane Katrina 23-30 August 2005, National Hurricane Center (NHC), NOAA, U.S. Department of Commerce.
- NWS (2012). Hurricane Katrina information website, www.nws.noaa.gov/storms/katrina/, National Weather Service, NOAA, US Department of Commerce.
- MFE (2008). Coastal hazards and climate change: a guidance manual for local government in New Zealand, Ministry for the Environment, New Zealand.
- Pugh D. (2004). Changing sea levels: effects of tides, weather and climate. Cambridge University Press. 265pp.
- Robinson, I. S. (2010). Discovering the ocean from space. The unique applications of satellite oceanography. Springer.
- RMS (2003), 1953 U.K. Floods 50-year retrospective. Risk Management Solutions.
- SHOA (1999). Instrucciones oceanográficas Nº 2: Método oficial para el cálculo de los valores no-armónicos de la marea, segunda edición. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, publicación Nº 3202, 23pp.
- SHOA (2006). Carta náutica de San Antonio.
- SINCA (2012). Sistema de información nacional de calidad del aire. Datos meteorológicos accesibles en <http://sinca.mma.gob.cl>.
- SoyChile.cl, (05/06/2012). <http://www.soychile.cl/Puerto-Montt/Sociedad/2012/06/05/96291/Fuertes-marejadas-afectan-la-costa-de-Puerto-Montt.aspx> [accesada 21/10/2012].
- USACE (2006). Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Publication number: EM 1110-2-1100.
- USACE (1997). Engineering and Design - Hydrologic Engineering Requirements for Reservoirs, U.S. Army Corps of Engineers, Publication Number: EM 1110-2-1420.
- Winckler, G. y Cienfuegos, R. (2012). Apéndice VII: Impactos en las zonas costeras. En. La economía del cambio climático en Chile. CEPAL (2012). LC/W.472. (Disponible en www.cepal.org/Publicaciones).