

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE PLAYAS EN LA ESCALA DE TORMENTAS
APLICACIÓN DEL MODELO XBEACH EN LA PLAYA REÑACA

RAIMUNDO IBACETA.¹
HAROLD DÍAZ.²
PATRICIO WINCKLER.³
PATRICIO CATALÁN.⁴
ROBERTO AGREDANO.⁵
FRANCISCO MOLteni.⁶
RODRIGO CAMPOS-CABA⁷

RESUMEN

El entendimiento entre los procesos físicos asociados a la hidrodinámica y transporte de sedimentos de las playas de Chile es aún escaso. Para ahondar en el conocimiento de la evolución morfológica en la escala de tormentas individuales, se modelan escenarios de tormentas en la playa Reñaca (Viña del Mar) con el software Xbeach (Roelvink et al., 2009). La reproducción de la evolución morfológica de esta playa contra las modelaciones realizadas muestra que a pesar de que las capacidades del modelo son amplias, este debe ser utilizado con estricto cuidado al momento de reproducir la evolución de la morfología de playas en la escala de tormentas individuales.

¹Ingeniero Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – rai.ibaceta.v@gmail.com

²Ingeniero Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – harold.diaz.m@alumnos.usm.cl

³Profesor Adjunto, Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso – patricio.winckler@uv.cl

⁴Profesor Adjunto, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – patricio.catalan@usm.cl

⁵Candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Depto. De Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. ragredano@uc.cl

⁶Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso – fco.molteni@gmail.com

⁷Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso – r.camposcaba@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La zona litoral es una zona dinámica en donde ocurren distintos procesos físicos asociados a la hidrodinámica y al transporte de sedimentos. En particular, las playas de arena están sujetas a la superposición de diversos fenómenos presentes durante una marejada. El incremento de la recurrencia de estos fenómenos pone en amenaza a la costa, en donde los peligros asociados se ven exacerbados por el aumento en la presión demográfica, junto a la intensificación de las tormentas y el aumento del nivel del mar que es normalmente atribuido al calentamiento global (Zhang et al., 2004). Ante esta amenaza, los ingenieros costeros tienen la necesidad de estudiar la vulnerabilidad de la zona litoral y de re(diseñar) obras de protección ante eventos futuros (Roelvink et al., 2009).

A la fecha, existe poco entendimiento respecto a la relación entre la hidro y morfodinámica existente en las playas del territorio chileno, habiendo focalizado la mayor parte del esfuerzo en los eventos asociados a terremotos y sus consecuentes tsunamis (e.g.: Catalán et al., 2014, 2015). Sin embargo, Martínez et al., (2017) recientemente concluyeron que algunas playas de arena de la región de Valparaíso han sufrido la tendencia a erosionarse en la última década, lo que fue atribuido a el aumento en la recurrencia de eventos extremos. En este sentido, es importante dilucidar la evolución morfodinámica de las playas chilenas en distintas escalas de tiempo, desde un punto de vista de la vulnerabilidad de la costa ante variaciones decadales y por otro lado respecto a los abruptos cambios en la morfología litoral producidos por una marejada. Esta última escala es crucial al momento de diseñar obras costeras, por ejemplo, al momento de evaluar la socavación máxima al pie de una obra que se espera sea recuperada bajo el efecto posterior de oleaje menos energético recurrente en temporadas estivales. Esta estimación, habitualmente se basa en el uso de modelos numéricos validados en condiciones distintas a las nacionales. Además, sólo ocasionalmente se cuenta con datos para su calibración.

El desarrollo de este trabajo se centra en la simulación de la evolución morfodinámica de playas en la escala de marejadas o tormentas individuales. Se evalúan las capacidades del modelo XBeach (Roelvink et al., 2009) en la simulación de la morfología de la playa Reñaca, con el objetivo de calibrar el modelo y así intentar reproducir la evolución bajo tres eventos ocurridos durante los años 2014 y 2015. En primer lugar, se presenta una breve revisión bibliográfica relativa a la morfología de playas, continuando con la metodología de trabajo, la descripción del modelo Xbeach, la información disponible para modelación y los criterios de simulación y calibración. Finalmente se realiza un análisis de los resultados y se concluye el trabajo completo.

2. MORFOLOGÍA DE PLAYAS

Las playas de arena evolucionan en un amplio rango de escalas en el tiempo y el espacio. En escalas temporales asociadas al paso de una ola individual, $O(10^1 \text{ s})$, se han evidenciado cambios en la morfología (acreción o erosión) en una posición fija de la zona de swash del mismo orden de magnitud que las variaciones producidas en un ciclo mareal completo, $O(10^5 \text{ s})$, (Blenkinsopp et., al 2011). En el otro extremo, las playas evolucionan en escalas temporales del orden de pocos días, asociados al paso de una marejada, en escalas estacionales con la manifestación de los perfiles teóricos de invierno y verano, y en escalas de tiempo decadales.

En la escala de tormentas individuales, las playas actúan como sistema de protección natural, donde el impacto de la acción del oleaje, en combinación con la marea astronómica y otros fenómenos climáticos (e.g.: set-up de viento, marea meteorológica, etc) actúan erosionando y/o depositando el sedimento disponible, transportando arena en dirección mar afuera producto de la resaca o hacia la costa producto del oleaje menos energético y/o la asimetría del swash. El potencial erosivo de estos procesos puede causar consecuencias catastróficas tanto para playas como para la infraestructura costera, lo cual ha sido evidenciado en los últimos años en diversas zonas costeras del territorio nacional (e.g.: Winckler et al., 2015). En el ámbito internacional y luego de los devastadores efectos producidos por huracanes durante los años 2004 y 2005 (e.g.: huracán Katrina), la comunidad científica estableció la necesidad de disponer de modelos numéricos capaces de reproducir la evolución morfológica de playas en la escala de tiempo de tormentas individuales. En consecuencia, en el marco de un proyecto desarrollado por la UMiami, TU Delft y UNESCO-IHE, nace el modelo de libre acceso Xbeach (Roelvink et al., 2009). Este trabajo tiene como objetivo evaluar las capacidades de este modelo en la simulación de las variaciones de la morfología de la playa Reñaca. Se aplica el modelo Xbeach con la finalidad de reproducir las variaciones morfológicas medidas antes y después de tres eventos.

3. METODOLOGÍA

Sitio y Datos Disponibles

La playa de Reñaca se localiza en la bahía del Valparaíso, costa central de Chile (Figura 1a). Reñaca es una playa intermedia a reflectiva, micromareal, abierta y dominada por el oleaje. Por otro lado, presenta estructuras rítmicas denominadas *beach cusps*, consistentes en una secuencia de salientes (*horns*) y bahías (*bays*), las cuales tienen un espaciamiento o longitud del orden de decenas de metros (Agredano et al., 2015). Se dispone de mediciones de topografía de playa realizadas a baja marea con un GPS diferencial de la zona demarcada en la Figura 1c antes y después de tres eventos, según se detalla en la Tabla 1. El primer evento (Abril 2014) corresponde a un evento medianamente energético ($H_s= 4.2$ m, $T_p=14$ s, en aguas profundas) coincidente en fecha con la realización de un estudio de campo. Los dos casos restantes consisten en la tormenta del 8 Agosto del 2015 (Winckler et al., 2015) y la marejada precedente que produjo una erosión significativa en las playas de la región (Molina et al., 2015). Adicionalmente, se dispone de una batimetría de detalle realizada con monohaz durante la campaña del año 2014. Las condiciones climáticas y de oleaje durante este sondaje fueron poco energéticas, lo cual permitió realizar mediciones en zonas donde habitualmente se produce la rotura del oleaje. Esta batimetría fue unida a la disponible en las cartas náuticas del SHOA para realizar transferencias de oleaje desde un nodo en aguas profundas.

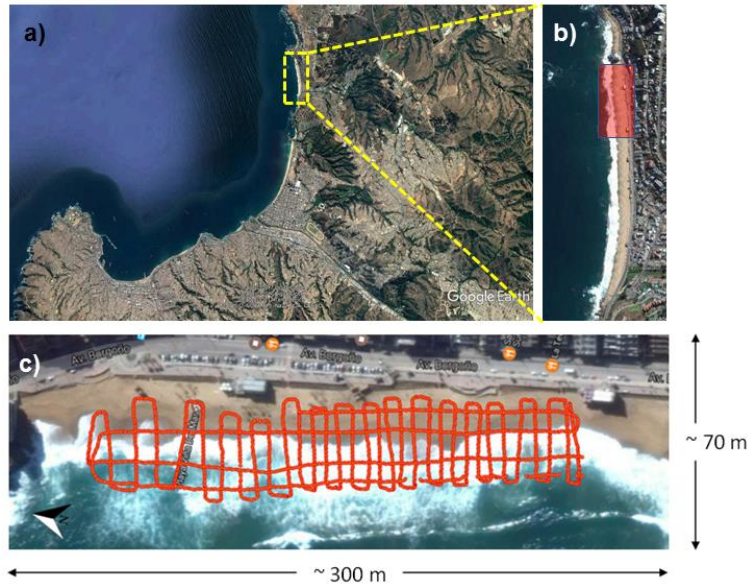


Figura 1. a) Localización de Reñaca en la bahía de Valparaíso. b) Detalle de playa Reñaca. En un cuadro rojo se muestra el detalle (c) que indica el recorrido del RTK al medir la topografía.

Las series de tiempo de oleaje fueron obtenidas a partir del *hindcast* desarrollado por el IFREMER (Ardhuin et al., 2010; Rasclé y Ardhuin, 2013). Esta información consiste en datos de reanálisis en un nodo ubicado en la posición latitud -33° , longitud -72° , frente a la costa de Reñaca en aguas profundas, consistentes en altura significativa, período peak y dirección. Estos datos fueron calibrados con la información registrada por un ADCP Nortek durante la campaña de Abril del 2014, según el procedimiento detallado en Agredano et al., 2015. Las condiciones de oleaje presentes en aguas profundas fueron usadas como condiciones de borde del modelo espectral SWAN v40.91 (Holthuijsen, 2007), extrayendo datos de salida en el vértice $z = -40$ (m) que sirven como datos de entrada para la modelación en Xbeach.

Tabla 1 Detalle de los eventos modelados

Evento	Fechas (dd/mm/aaaa)		Detalle
	Topografía anterior	Topografía posterior	
1	08-04-2014	11-04-2014	Evento medianamente energético
2	05-08-2015	07-08-2015	Tormenta precedente al 8 de Agosto 2015
3	07-08-2015	09-08-2015	Tormenta 8 de Agosto 2015

El nivel del mar fue obtenido desde la base de datos de la UNESCO-IOC (www.ioc-sealevelmonitoring.org) para la estación de monitoreo ubicada en Valparaíso. La referencia de estas series de tiempo respecto a la topo-batimetría disponible se realizó mediante el registro del nivel de mar con un sensor de presión KELLER durante la campaña de Abril del 2014.

La Figura 3 muestra los parámetros de resumen H_s , T_p y Dir en el veril $z = -40$ m para los eventos del 2014 y 2015, junto al nivel del mar, utilizados como dato de entrada en Xbeach. Los parámetros se muestran cada una hora.

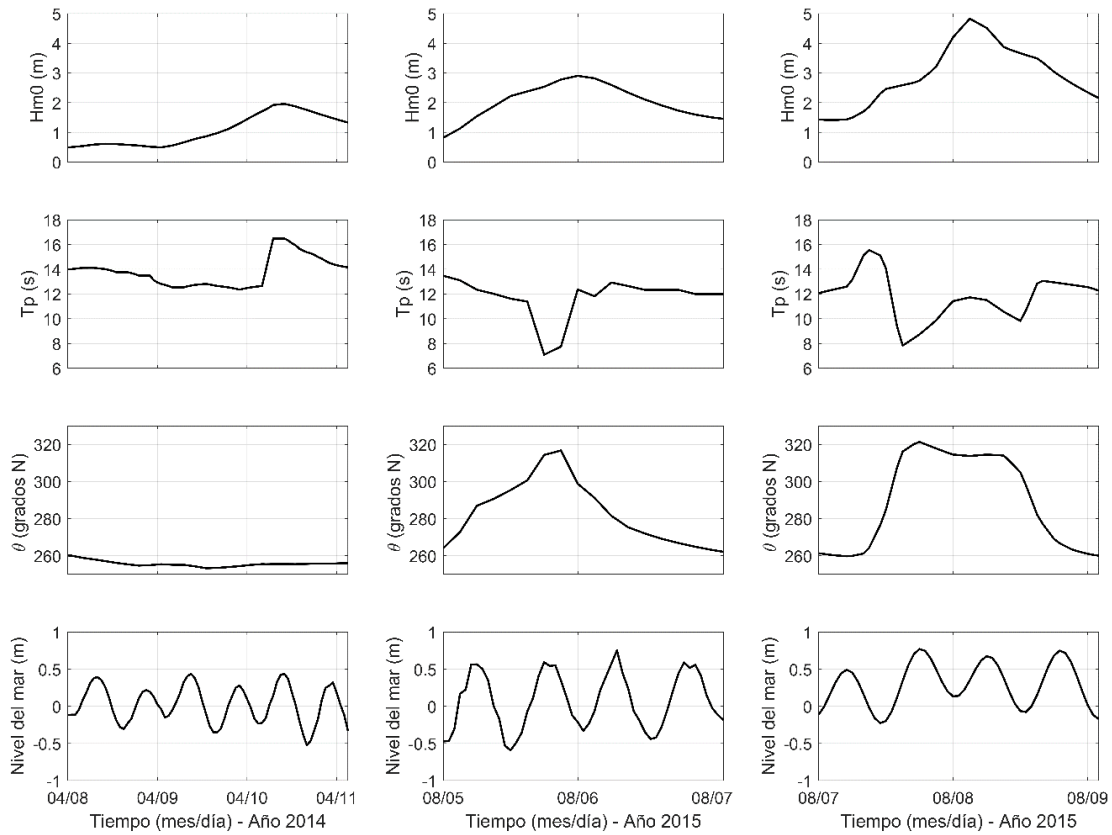


Figura 2 Forzantes obtenidos desde SWAN en el veril -40 m. De izquierda a derecha se presentan los forzantes para los eventos 1, 2 y 3 respectivamente.

Modelo

XBeach (Roelvnik et al., 2009) es un software de acceso libre desarrollado por la Universidad de Miami, la Universidad Técnica de Delft y UNESCO-IHE. Este modelo bidimensional horizontal (2DH) reproduce los cambios en la morfología de playas bajo el efecto del oleaje y variaciones en el nivel del mar, posibilitando la inserción de estructuras no erosionables para modelar el efecto de diques, muros, etc. El modelo ha sido extensamente validado respecto a mediciones de laboratorio y a mediciones in-situ (e.g.: Van Dongeren et al., 2009, Splinter y Palmstem, 2012; Splinter et al., 2014) aunque es inevitable calibrarlo para reproducir la evolución morfológica de algún sitio en particular sujeto a ciertas condiciones hidrodinámicas (Nederhoff et al., 2015). De hecho, varios estudios han reportado sobrestimación de la erosión al usar parámetros de modelación por defecto (e.g. Daly et al., et al., 2012, Deltares, 2015, Elsayed y Oumeraci, 2017).

Xbeach es un modelo numérico designado para estimar la erosión extrema bajo condiciones de tormenta. La filosofía de Xbeach se basa en resolver explícitamente los diversos procesos físicos presentes y utiliza algunas formulaciones empíricas en los casos que algún fenómeno físico no haya sido del todo dilucidado o cuando el costo computacional de resolver algún fenómeno sea muy alto para las aplicaciones típicas en ingeniería costera. Xbeach dispone de tres modos de uso para representar las ondas cortas, los cuales se diferencian según el fenómeno físico que el usuario busque reproducir. El primero de ellos es el modo estacionario, que resuelve la onda corta promediada en su longitud de onda sin considerar ondas de infragravedad. Este modo es recomendable para condiciones en donde el oleaje es relativamente pequeño y/o de bajo período, que conllevan también ondas de infragravedad despreciables. El segundo modo denominado no estacionario (*surf-beat*) resuelve las variaciones de la onda corta en la escala de grupos, describiendo la propagación de la envolvente de los grupos de onda en el tiempo y las ondas largas asociadas a ellos. El modo *surf-beat* es necesario cuando el énfasis es en la zona de swash (solo ondas largas) y consecuentemente en los procesos de transporte de sedimentos asociados a aquella zona. Finalmente, el modo no hidrostático resuelve la fase de la ola, en donde la combinación de las ecuaciones no lineales de aguas someras con una corrección en la presión es aplicada (Zijlema et al., 2011), permitiendo la propagación y decaimiento de ondas individuales. Sin embargo, este modo ha sido aplicado y validado con éxito en playas de grava (McCall et al., 2014, 2015; Masselink et al., 2014), pero no ha sido validado extensivamente en playas de arena. En base lo anterior, se ha decidido utilizar el modo no estacionario (*surf-beat*) para representar la evolución morfológica producto de tormentas individuales.

En el modo no estacionario, Xbeach resuelve el movimiento de onda corta (Ec. 1) usando la ecuación de acción del oleaje (A) con un forzante dependiente del tiempo. Esta ecuación resuelve la variación de la envolvente de la onda corta en la escala de grupos y usa un modelo de disipación (D) por rotura (Ecs. 2 o 3) en la escala de grupos (Roelvink, 1993) y un modelo de roller (Svendensen, 1984) para representar el momentum almacenado en la ola una vez iniciada la rotura. Estas variaciones ejercen una fuerza en la columna de aguas a través de los gradientes en los tensores de radiación, originando ondas largas y corrientes que son resueltas por las ecuaciones no lineales de aguas someras (e.g. Phillips, 1977).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = \frac{-D}{\sigma} \quad (1)$$

$$D = 2\alpha f_{rep} E_w Q_b \quad (2)$$

$$D = 2\alpha f_{rep} E_w Q_b \frac{H_{rms}}{h} \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores, α es un coeficiente de $O(1)$, f_{rep} (Hz) es frecuencia de onda corta, E_w es la energía total del oleaje sumada en todas las direcciones y Q_b es la fracción de oleaje

rompiente parametrizada con la expresión $Q_b = \min \left[1 - e^{-\left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^n}, 1 \right]$, con n y γ parámetros libres

del modelo (por defecto 10 y 0.55). En este esquema, $A = E_w / \sigma$.

En el ambiente subacuático, el modelo usa una ecuación de advección-difusión promediada en la vertical para estimar el transporte de sedimentos (Galapatti, 1983). El transporte de sedimento desde la parte seca (o duna) hacia el mar lo realiza mediante un criterio de avalanchamiento, el cual compara los cambios en la morfología entre dos puntos adyacentes con una pendiente crítica mínima por defecto.

Producto de la escala temporal que se resuelve, se toma en cuenta la forma de la ola y los efectos que la no linealidad de esta implica en la velocidad orbital mediante la formulación propuesta por Van Thiel de Vries (2009), para calcular la velocidad promediada en la vertical según lo indica la Ec. 4 para un caso unidimensional.

$$u_a = (S_k - A_s) u_{rms} f_{ua} \quad (4)$$

Donde la esbeltez S_k y la asimetría A_s se calculan mediante las discretizaciones propuestas por Van Thiel de Vries (2009). u_{rms} es la velocidad orbital en la escala de grupos calculada en el fondo y f_{ua} es un parámetro de calibración, identificado como *facua* en el modelo. Finalmente, Xbeach usa los resultados de la ecuación de advección-difusión para estimar las tasas de transporte de sedimento que sirven como input a una ecuación de actualización del nivel de fondo, la cual entrega la variación del perfil de playa en el tiempo y espacio (Reniers et al., 2004a).

Para un mayor detalle de las ecuaciones y valores por defecto que dispone Xbeach, el usuario se puede referir al manual http://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html.

Simplificaciones

Se consideraron las siguientes simplificaciones para la modelación. En primer lugar, para reducir el costo computacional y con el fin de evaluar preliminarmente las capacidades de Xbeach, se hicieron simulaciones de perfiles de playa, sin considerar variaciones longitudinales de la morfología. Sin embargo, Xbeach permite la inclusión de la direccionalidad del oleaje para incluir corrientes longitudinales, la cual fue impuesta en las condiciones de borde.

Se modelaron dos perfiles de playa para el evento del 2014 y tres para los eventos del 2015, según muestra la Figura 3. Cada perfil fue extraído en dirección perpendicular a la línea de costa local, extendiéndose hasta el veril -40 m. Los perfiles del usados para modelar los eventos del 2015 son de la parte norte de la playa Reñaca.

Por otro lado, el mareógrafo de Valparaíso tuvo desperfectos durante el evento del 8 de Agosto del 2015, por lo cual la serie de nivel del mar (Figura 2, panel inferior derecho) fue generada sintéticamente de la siguiente manera. En primer lugar, se realizó un análisis armónico utilizando la herramienta T-Tide (Pawlowicz et al., 2002) para 16 años y 4 meses de duración. A partir de este análisis se reconstruyó la marea astronómica para los intervalos de tiempo faltantes. Finalmente se adicionaron 0.5 metros para considerar el efecto de la marea meteorológica, valor concordante con los registros de la zona central durante esta tormenta (Carvajal et al., 2017).

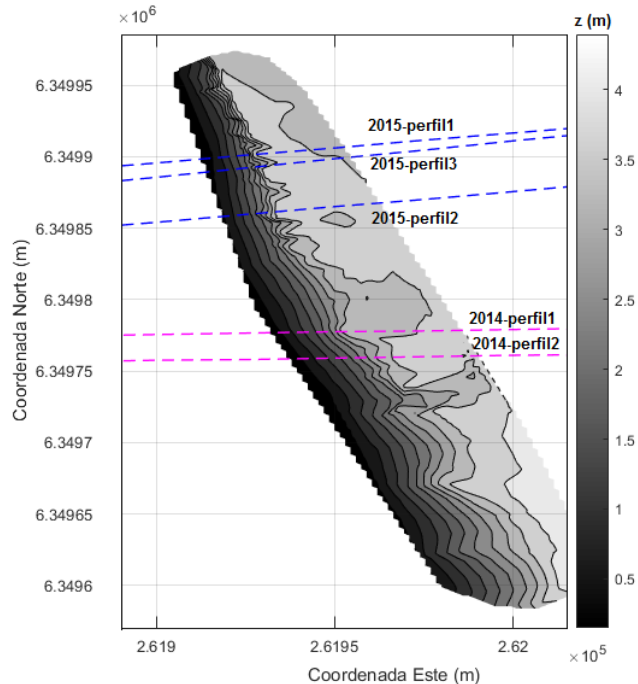


Figura 3 Topografía medida el día 07 de agosto del 2015. Se indica además la extensión en planta de los perfiles usados para modelar el escenario 1 (línea magenta discontinua) y los escenarios 2 y 3 (línea azul discontinua)

Calibración

El enfoque de calibración siguió un procedimiento similar al de Splinter et al. 2012, variando en la menor cantidad posible los parámetros por defecto de Xbeach. Al igual que en aquel trabajo, se decidió sensibilizar ante los siguientes dos parámetros. f_{ua} , usado para incluir el efecto de la no linealidad presente en la escala ola-a-ola (Ec. 4, valor por defecto $f_{ua} = 0.1$). El parámetro f_{ua} puede variar entre 0 y 1, donde el valor el nulo se atribuye a un transporte de sedimentos totalmente en dirección mar afuera y el valor unitario representa la totalidad del transporte de sedimentos en dirección hacia la costa. Se varió el valor de f_{ua} en intervalos regulares de 0.05 entre 0 y 0.5 El segundo parámetro de calibración es el modelo de disipación en la escala de grupos. Debido a que no se disponen series de tiempo de la transformación del oleaje en la rompiente, se realiza una calibración del parámetro $break$ que puede adquirir el valor roelvink1, o roelvink2 (valor por defecto), según el tipo de rompimiento (Ec. 2 y 3, respectivamente). Para las posibles combinaciones de tipo de rompimiento y f_{ua} , se dispone un total de 22 combinaciones para cada perfil de playa y tormenta, entre las cuales se escoge para cada uno la combinación óptima que minimice del error cuadrático medio (RMSE) en la parte “seca” de la playa o sobre el nivel medio (NMM) ($z > 0$ m). No se realizan comparaciones bajo el agua ($z < 0$ m) debido a que no se dispone información de la porción subacuática antes y después de los escenarios modelados.

El parámetro utilizado para determinar la habilidad de los modelos fue la capacidad de reproducir la cantidad de sedimento erosionado (ΔV) por sobre el nivel medio ($z > 0$ m). Este parámetro se calculó como la diferencia entre los perfiles iniciales (i) y finales (f) integrados en la horizontal, según la siguiente expresión.

$$\Delta V = \int_0^{x_{NMM,f}} z dx - \int_0^{x_{NMM,i}} z dx \quad (5)$$

4. RESULTADOS y DISCUSIÓN

A modo de ilustración, la Figura 4 muestra los perfiles finales modelados para todas las combinaciones f_{ua} -break mencionadas anteriormente en el perfil1-2015 del evento 2. El panel superior muestra los resultados asociados al criterio de rompimiento *roelvink1* (Ec. 2) y el inferior a la parametrización *roelvink2* (Ec. 3). Los perfiles finales que representan mayor erosión son los asociados a valores pequeños de f_{ua} (mínimo 0) y los más similares al perfil final observado representan valores mayores (máximo 0.5). Se observa que para el escenario modelado y la morfología precedente, el rompimiento asociado al parámetro *roelvink1* (Ec. 2) y valores mayores de f_{ua} reproducen mejores predicciones con Xbeach. Una simple inspección visual de ambos paneles indican que para oleaje incidente similar, el criterio de rompimiento asociado a la Ec. 3 genera mayor erosión. Lo anterior se puede explicar por la forma de las parametrizaciones de disipación en la escala de grupos. La diferencia se debe a que la disipación en la Ec. 2 es proporcional a H^2/h contra H^3/h en la Ec. 3 (Splinter y Palmsten, 2012). La Ec. 2 se basa en la hipótesis de que la altura de ola es del mismo orden que la profundidad. Prácticamente, esto se traduce en menor disipación en la zona litoral cuando valores de γ y n son usados por defecto, como se hizo en este trabajo.

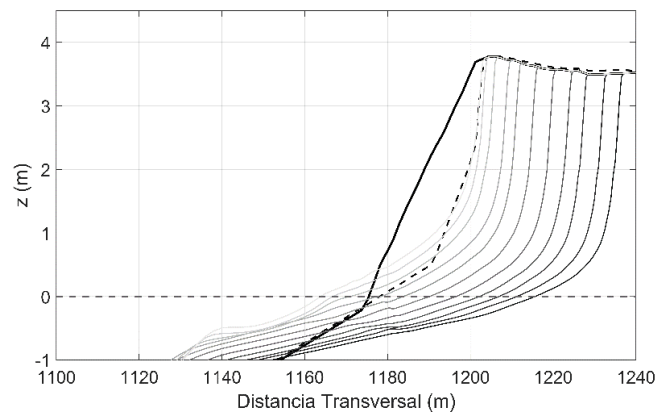
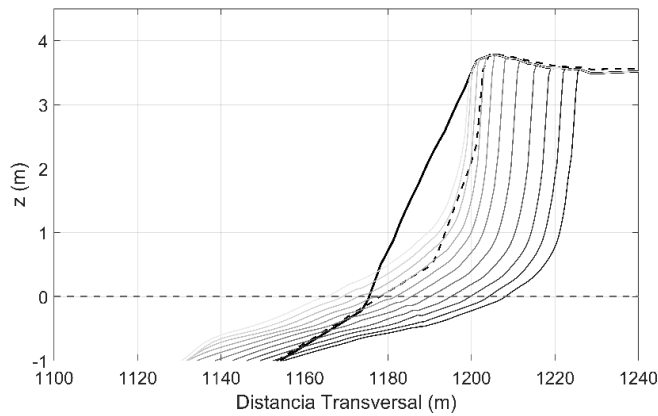


Figura 4 Resultados de calibración para el escenario 2, perfil 1. El panel superior muestra los resultados asociados al criterio de rompimiento roelvink 1 (ecuación 2) y el panel inferior los asociados a roelvink2 (ecuación 3).

La Tabla 2 muestra los resultados de la calibración para todos los eventos y perfiles modelados, indicando la combinación f_{ua} - $break$ que minimiza la diferencia entre perfiles finales de playa sobre $z > 0$ m. Se incluyen además los valores de ΔV observados y modelados por Xbeach.

Tabla 2 Resultados Modelaciones y Calibración

Evento	Perfil	Resultado Calibración		RMSE (m)	ΔV observado (m ³ /m)	ΔV modelado (m ³ /m)
		f_{ua}	$break$			
1	perfil1-2014	0.5	roelvink1	5.49	-9.12	-49.55
1	perfil2-2014	0.4	roelvink1	5.26	-15.63	-54.43
2	perfil1-2015	0.4	roelvink1	0.14	-30.065	-28.55
2	perfil2-2015	0.45	roelvink1	0.31	-22.866	-19.76
2	perfil3-2015	0.4	roelvink1	0.32	-29.658	-26.74
3	perfil1-2015	0.35	roelvink1	0.52	-33.812	-28.58
3	perfil2-2015	0.3	roelvink1	0.30	-42.81	-29.68
3	perfil3-2015	0.3	roelvink1	0.16	-36.307	-37.61

Para todos los perfiles y eventos modelados el criterio de disipación por defecto (roelvink2) no reproduce correctamente los cambios en la morfología. Si bien no se dispone de mediciones de transformación de oleaje que sirvan para contrastar la propagación modelada con la existente, se hipotetiza que la parametrización de disipación de la Ec. 2 representa mejor el decaimiento del oleaje para los escenarios modelados. Por otro lado, los eventos del 2015 reportaron valores del parámetro f_{ua} que minimiza las diferencias del orden 0.3 a 0.4. Estos valores de f_{ua} son similares a los reportados por Bugajny et al., 2013, quienes reportaron valores calibrados de $f_{ua}=0.4$ para playas con pendiente 14.39%, respectivamente. La pendiente media de la playa Reñaca durante los eventos modelados fue de 14.1%, similar a los valores reportados por aquel estudio.

Para los eventos asociados al año del 2015, la diferencia entre los perfiles finales resueltos con Xbeach y los observados difieren en la vertical en el orden de los $O(10$ cm) según el estadístico de error cuadrático medio o RMSE. La siguiente figura muestra los perfiles finales modelados por Xbeach (línea negra discontinua) para los parámetros de calibración óptimos de cada evento y perfil. Los paneles izquierdos presentan en orden descendente los perfiles 1 al 3 para el evento 2 (6 de Agosto) mientras los derechos presentan la misma información para la tormenta del 8 de Agosto.

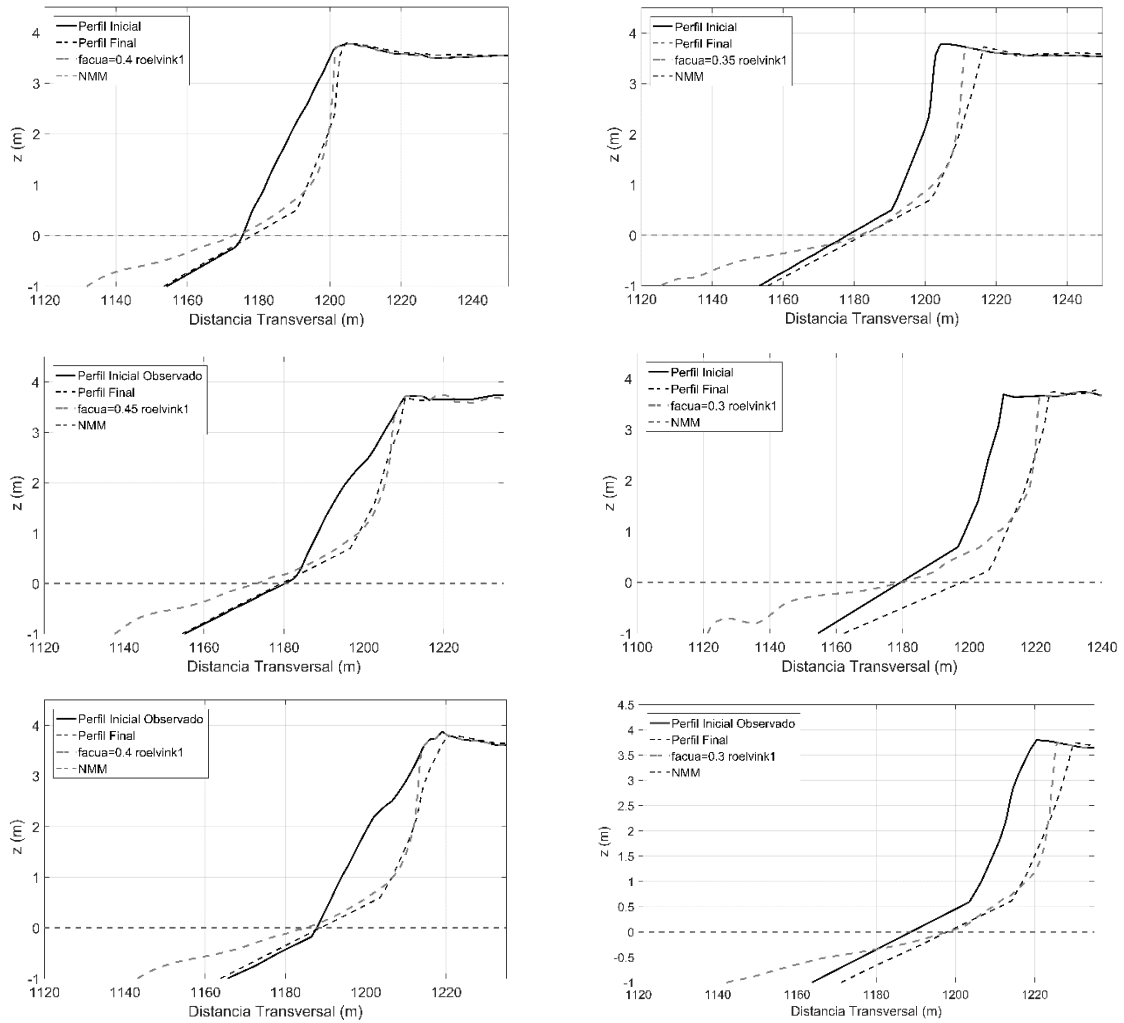


Figura 5 Resultados de la calibración del modelo Xbeach para los eventos 2 y 3 (tormentas año 2015). Paneles izquierdos y en orden descendente: Perfiles 1, 2 y 3 en el evento 2 (6 de Agosto). Paneles derechos y en orden descendente: Perfiles 1, 2 y 3 en el evento 3 (8 Agosto). La línea negra es el perfil observado inicial. En negro discontinuo el perfil observado final y en gris discontinuo el perfil modelado final. La línea horizontal corresponde al nivel medio del mar.

Para el evento del 6 de Agosto, se observa que los perfiles modelados son bien representados por el modelo Xbeach, salvo la zona ubicada entre $z=0$ y $z=1$ m, que presenta mayores discrepancias en la erosión modelada. En términos estadísticos, la diferencia entre el parámetro ΔV observado y modelado varió en en 5.01%, 13.56% y 9.83% para los perfiles 1,2 y 3 respectivamente. Cabe destacar que este escenario representa la erosión producida por el temporal previo al del 8 de Agosto (Molina et al., 2015), formándose de un escarpe en la parte norte de Reñaca (Figura 6A y Figura 6B). Este fenómeno fue reproducido satisfactoriamente por las modelaciones.



Figura 6 Evolución morfológica en la parte norte de Reñaca. Las fotos fueran tomadas el (A) 4 de Agosto 2015, (B) 7 de Agosto y (C) 10 de Agosto. Figura extraída del trabajo *Coastal Erosion in central Chile: a new Hazard?* (Martinez et al., 2017) bajo la autorización de Carolina Martinez.

La tormenta del 8 de Agosto del 2015 (evento 3, paneles derechos de la Figura 5) se caracterizó por variaciones volumétricas de sedimento de igual orden que las inducidas por la tormenta precedente, para la parte norte de la playa Reñaca. Si bien las condiciones hidrodinámicas del 8 de agosto fueron más desfavorables, se hipotetiza que las condiciones de la tormenta precedente fueron suficientes para erosionar una alta fuente de sedimento disponible, depositándolo bajo el agua. Lo anterior se traduce en mayor saturación del oleaje incidente posterior.

Desde el punto de vista de la línea de costa, el escarpe formado anteriormente avanzó en dirección hacia la orilla producto de la erosión. Este fenómeno fue bien reproducido por Xbeach. Sin embargo, al igual que para el evento 2, la erosión observada entre los valores $z = 0$ m y $z = 1$ m fue subestimada, mientras que la posición de la migración del escarpe fue menor a la observada (Figura 6c). En términos porcentuales, la diferencia entre el parámetro ΔV observado y modelado fue subestimado en 18.29%, 30.6% y 18.4% para los perfiles 1,2 y 3 respectivamente.

Los motivos de las discrepancias reportadas anteriormente no han sido del todo aclarados. Sin embargo, se establece que una de las posibles causas de las diferencias es la caracterización intermedia a reflectiva de la playa Reñaca. El modo *surf-beat* adoptado para las modelaciones implica que los fenómenos asociados a la zona de swash son solo producidos por ondas largas, habiéndose disipado previamente las ondas de menor período. Las playas reflectivas se caracterizan por una zona de swash en que el oleaje puede estar no saturado, existiendo la componente de onda corta en el espectro de la hidrodinámica en el swash (Hughes et al., 2014). En este sentido, Xbeach ha reproducido excelentes resultados en playas disipativas (e.g.: Splinter y Palmstem, 2012; Splinter et al., 2014 y muchos más) donde la banda de onda corta se disipa completamente en el surf. Para poder modelar eficazmente una playa reflectiva, podría usarse el módulo que resuelve la fase. Sin embargo, este modo solo ha sido validado exitosamente en playas de grava (McCall et al., 2015) y recientemente en playas de arena ante condiciones de acreción (Daly et al., 2017)

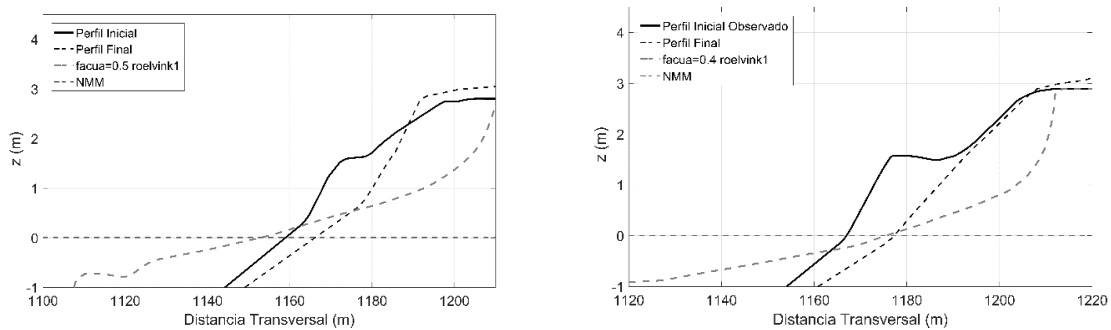


Figura 7 Resultados de la calibración del modelo Xbeach para el evento 1 (condición menos energética año 2014). El panel izquierdo corresponde al perfil1-2014 y el derecho al perfil2-2014.

Finalmente, la Figura 7 muestra los resultados de modelación de los perfiles 1 y 2 asociados a la condición menos energética transcurrida entre el 4 y 11 de agosto del 2014. Los resultados de la Tabla 2 y las imágenes muestran que, a diferencia de las condiciones de tormenta previamente analizadas, Xbeach no fue capaz de reproducir satisfactoriamente la evolución morfológica de ambos perfiles. Específicamente, se observa que ambos perfiles fueron caracterizados en la realidad por la tendencia a formar perfiles menos empinados (o terraza) en la parte baja de la playa mientras que una cantidad considerable de sedimento fue depositado en la parte alta. Xbeach, por otro lado, simuló las características típicas de tormenta en que la formación de un escarpe tiende a transportar sedimento en dirección offshore. Entre las razones por las cuales Xbeach no reprodujo satisfactoriamente este escenario se destaca lo siguiente. Una inspección de la topografía observada antes y después indicó que los perfiles 1 y 2 correspondían a una saliente y una bahía respectivamente (ver ejemplo en la Figura 8). La topografía observada al final de este período indica que hubo una migración longitudinal de los patrones rítmicos (Agredano et al., 2015), lo que en parte explica la erosión y acreción observada en ambos perfiles. El modo de simulación adoptado en este estudio fue unidimensional, motivo por el cual no es posible modelar el fenómeno observado que subyace en teorías de ondas atrapadas (*edge waves*) que suelen tener un carácter bidimensional en planta. De todas maneras, aún el modo 2D de Xbeach existente a la fecha no es completamente capaz de reproducir casos como estos.



Figura 8 Patrones rítmicos en la playa Reñaca. Foto tomada en septiembre del 2015

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se probaron las capacidades del modelo Xbeach en la reproducción de la evolución morfológica bajo tres condiciones hidrodinámicas. Para condiciones extremas se obtuvieron resultados satisfactorios, aún con algunas discrepancias en la erosión producida en la parte baja de la playa. Para condiciones de oleaje menos energético los resultados no fueron satisfactorios, lo cual se atribuye en este caso a la bidimensionalidad del fenómeno ocurrido y a la filosofía de Xbeach que ha sido desarrollado preliminarmente para reproducir la evolución morfológica bajo condiciones de tormenta. Por otro lado, la calibración de cada modelo antes distintos escenarios y condiciones iniciales es inevitable. En este sentido, el usuario debe ser cauteloso al momento de decidir si los parámetros por defecto u otros representarán correctamente los fenómenos deseados.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen los consejos de Felipe Lucero (MERIC) respecto a la transferencia de oleaje en SWAN y a Skyring Marine por permitir el uso de sus dependencias computacionales. Roberto Agredano ha sido apoyado por el Centro de Investigación y Gestión de Desastres Naturales (CIGIDEN), Proyecto Conicyt/Fondap 15110017, y por la beca de doctorado Nacional de CONICYT. Patricio Catalán y Harold Díaz agradecen a FONDECYT 1170415

REFERENCIAS

Agredano, R., Cienfuegos, R., Catalan, P., Mignot, E., 2015. Descripción de la evolución mensual de la playa de Reñaca y el impacto de las marejadas de agosto 2015. In: XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago.

Ardhuin, F., E. Rogers, A.V. Babanin, J. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffeulou, J. Lefevre, L. Aouf, and F. Collard, 2010: Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 1917–1941, <https://doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>

N. Bugajny, K. Furmanczyk, J. Dudzinska-Nowak, B. Paplinska-Swerpel, Modelling morphological changes of beach and dune induced by storm on the Southern Baltic coast using XBeach (case study: Dziwnow Spit), *J. Coast. Res.* 1 (2013) 672–677.

Blenkinsopp, C.; Turner, I.; Masselink, G. & Russell, P. Swash zone sediment fluxes: Field observations *Coastal Engineering*, 2011, 58, 28 - 44

Carvajal, M.; Contreras-López, M.; Winckler, P. and Sepúlveda, I. (2017) Meteotsunamis Occurring Along the Southwest Coast of South America During an Intense Storm. *Pure and Applied Geophysics*.

Catalán, P. A.; Cienfuegos, R. & Villagrán, M. (2014), 'Perspectives on the Long-Term Equilibrium of a Wave Dominated Coastal Zone Affected by Tsunamis: The Case of Central Chile', *Journal of Coastal Research SI* 71, 55--61.

Catalán P. et al. (2015), The 1 April 2014 Pisagua tsunami: observations and modeling. *Geophysical Research Letters* 42 (8), 2918-2925.

Daly, C., Floch, F., Almeida, L.P. and Almar R. (2017) Modelling accretion at Nha Trang Beach, Vietnam. *Coastal Dynamics* 2017.

Deltares, XBeach skillbed report (revision 4672), Deltares- Delft University of Technology, 2015.

C. Daly, D. Roelvink, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall, Validation of an advective-deterministic approach to short wave breaking in a surf-beat model, *Coast. Eng.* 60 (2012) 69–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.08.001>.

Elsayed, S.M. and Oumeraci H., 2017. Effect of beach slope and grain-stabilization on coastal sediment transport: An attempt to overcome the erosion overestimation by XBeach, *Coastal Engineering*, 121: 179–196.

Galapatti, R., 1983. A depth integrated model for suspended transport. *Communications on Hydraulics*, Report 83–7. Department of Civil Engineering, Delft University of Technology

Holthuijsen, L. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*.

Michael G. Hughes, Troels Aagaard, Tom E. Baldock, Hannah E. Power, Spectral signatures for swash on reflective, intermediate and dissipative beaches, *Marine Geology*, Volume 355, 2014, Pages 88-97, ISSN 0025-3227, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2014.05.015>.

Martínez, C., et al., Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011>

Masselink, G., McCall, R.T., Poate, T.G., van Geer, P., 2014. Modelling storm response on gravel beaches using XBeach-G. *Proc. Institution Civ. Eng. Marit. Eng.* 167 (MA4), 173–191. <http://dx.doi.org/10.1680/maen.14.00020>

McCall, R.T., van Thiel de Vries, J.S., Plant, N.G., van Dongeren, A.R., Roelvink, J.A., Thompson, D.M., Reniers, A.J.H.M., 2010. Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coast. Eng.* 57, 668–683.

McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T.G., Roelvink, J.A., Almeida, L.P., Davidson, M., Russell, P.E., 2015. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeachG. *Coast. Eng.* 91, 231–250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.007>.

Molina, M., Campos, R., Manosalva, D., Becerra, D., Gálvez, B., Frías, G. y Winckler, P. (2015). Efectos de la marejada del 8 de agosto de 2015 en las playas de la bahía de Valparaíso. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Santiago, 21 - 22 - 23 de Octubre de 2015.

Nederhoff, C.M., Lodder, Q.J., Boers, M., Den Bieman, J.P., Miller, J.K., 2015. Modeling the effects of hard structures on dune erosion and overwash - a case study of the impact of Hurricane Sandy on the New Jersey coast. In: Proceedings Coastal Sediments, San Diego, CA.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929–937. doi:10. 1016/S0098-3004(02)00013-4.

Phillips, O. M. (1977). *The dynamics of the upper ocean*. Cambridge University Press, 366.

Rasle, N. y Arduin F. A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization, *Ocean Modelling*, Volume 70, 2013, Pages 174-188, ISSN 1463-5003, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.12.001>.

Reniers, A.J.H.M., Roelvink, J.A., Thornton, E.B., 2004a. Morphodynamic modelling of an embayed beach under wave group forcing. *J. Geophys. Res.* 109, C01030. doi:10.1029/2002JC001586.

Roelvink, J.A., 1993. Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering* 19, 127–150

Roelvink, J. A., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel De Vries, J. S. M., McCall, R. T., and Lescinsky, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56:1133–1152.

Splinter, K.D., Palmsten, M.L., 2012. Modeling dune response to an east coast low. *Mar. Geol.* 329–331, 46–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2012.09.005>.

Splinter, K.D., Carley, J.T., Golshani, A., Tomlinson, R., 2014. A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion,. *Coast. Eng.* 83, 49–55.

Svenden, I. A. (1984a). Mass flux and undertow in a surf zone. *Coastal Engineering*, 8, 347-365.

A. Van Dongeren, A. Bolle, M.I. Vousdoukas, T. Plomaritis, P. Eftimova, J. Williams, C. Armaroli, D. Idier, P. Van Geer, J. Van Thiel de Vries, P. Haerens, R. Taborada, J. Benavente, E. Trifonova, P. Ciavola, Y. Balouin, D. Roelvink, MICORE: dune erosion and overwash model validation with data from nine European field sites, in: M. Mizuguchi, S. Sato (Eds.), *Proceedings Coast. Dyn. 2009 Impacts Hum. Act. Dyn. Coast. Process.*, Tokyo, Japan, pp. 1–15, 2009.

Winckler, P., Contreras, M., Beyá, J. y 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*.

Zhang, K., Douglas, B., and Leatherman, S. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64(1—2): 41-58.

Zijlema, M., Stelling, G.S., Smit, P.B., 2011. SWASH: an operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coast. Eng.* 58 (10), 992–1012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>.