

DIAGNÓSTICO Y MODELACIÓN DE FALLA EN PLAYA ESCUADRÓN BAJO ACCIÓN DE OLEAJE DE TORMENTA

Lucas Araneda¹, Mauricio Villagrán², Dr. Rafael Aránguiz³

Resumen. Las morfologías de las playas están en constante cambio, y actúan como un método de protección natural frente a inundaciones y el impacto directo de las olas durante las tormentas, solo si tienen la cantidad suficientemente de sedimento, logran soportar la erosión provocada por eventos extremos sin fallar. Sin embargo, no hay mucha investigación respecto a la evolución en el tiempo de las playas de arena bajo el impacto de oleaje de tormenta y los modelos disponibles requieren de calibración sacada del sitio. En este estudio se diagnostica y se modela la falla en la playa Escuadrón-Chile producto de una serie de condiciones atmosféricas (strom surge) más condiciones de marea, que conjuntamente fueron devastadoras en el mes de Junio 2017. Este análisis se desarrolla a través de un modelo de complejidad variable en su capacidad de predecir los cambios en los volúmenes de erosión de playas para varios eventos de tormenta, que ocurrieron en la playa Escuadrón. El modelo morfodinámico XBeach (Roelvink et al., 2009), se basa en procesos que modela todo el perfil de playa, capaz de reproducir el volumen de playas, no obstante, fue sensible a los parámetros de calibración. Los cambios en el perfil de playa debido a la erosión, con una calibración mínima como en el modelo propuesto por Splinter et al. 2012, produjo errores del orden del 9% en promedio, reproduciendo satisfactoriamente los cambios morfológicos en la playa Escuadrón.

Palabras claves: Morfología de playas, strom surge, XBeach, erosión.

Abstract. *The morphologies of the beaches are constantly changing, and act as a method of natural protection against floods and the direct impact of waves during storms, only if they have enough sediment, they can withstand the erosion caused by extreme events without fail. However, there is not much research regarding the evolution over time of sandy beaches under the impact of storm surges and the available models require calibration removed from the site. In this study, the fault was diagnosed and modeled at the Escuadrón-Chile beach product of a series of atmospheric conditions (strom surge) plus tidal conditions, which together were devastating in the month of June 2017. This analysis is developed through a model of variable complexity in its ability to predict changes in beach erosion volumes for various storm events, which occurred at the Escuadrón beach. The XBeach morphodynamic model (Roelvink et al., 2009), is based on processes that model the entire beach profile, capable of reproducing the volume of beaches, nevertheless, it was sensitive to the calibration parameters. Changes in the beach profile due to erosion, with a minimum calibration as in the model proposed by Splinter et al. 2012, produced errors of the order of 9% on average, reproducing satisfactorily the morphological changes in the beach Escuadrón.*

Key words: Morphology of beaches, strom surge, XBeach, erosion.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, – laraneda@ing.ucsc.cl

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, – mvillagran@ucsc.cl

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile – raranguiz@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La zona costera siempre ha sido un área de asentamiento atractiva para los seres humanos, debido a las oportunidades para ir, comerciar, transportar, tener un negocio de turismo, etc. Sin embargo, muchas áreas costeras son susceptibles a la inundación y la erosión, frente a eventos de tormenta, lo cual, es un peligro para las personas en las áreas costeras. Por lo tanto, se mantienen muchas áreas costeras retiradas de las costas. Para poder aplicar las medidas apropiadas, en favor de mitigar el peligro se desarrollan medidas de protección como, por ejemplo; rompeolas, diques marinos, entre otros. Para ello se debe saber cómo se erosiona la línea costera (L.J.C. Laurens Bart, 2017). El incremento de la recurrencia de estos fenómenos pone en amenaza a la costa, en donde los peligros asociados se ven incrementados por el crecimiento 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).

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). En este contexto, es importante dilucidar la evolución morfodinámica de las playas chilenas en distintas escalas temporales, desde un punto de vista de la vulnerabilidad de la costa ante variaciones en el tiempo y por otro lado respecto a los rápidos cambios en la morfología litoral producidos por una marejada individual. Esta última escala es crítica al momento de diseñar obras de ingeniería situadas en la costa, 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 en condiciones de calma. Considerando esto, habitualmente los análisis se basan en el uso de modelos numéricos validados en condiciones distintas a las nacionales. También, sólo eventualmente se cuenta con datos para la calibración de los modelos (Ibaceta, 2017).

En los límites de la zona costera se describe el área litoral, incluyendo dunas costeras y la topografía del fondo hasta una profundidad tal que se ve afectada por la acción del oleaje. Las costas arenosas en particular son altamente dinámicas y sus rasgos morfológicos evolucionan continuamente en respuesta a las condiciones variables del mar (Ivonne, 2016).

En la escala de tormentas individuales, las playas actúan como sistema de protección natural de la transición mar-continente, donde el impacto de la acción del oleaje, en combinación con la marea astronómica y otros fenómenos climáticos (set-up de viento, marea meteorológica) 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 (Winckler et al., 2015).

Producto de los devastadores efectos producidos por huracanes en costas arenosas especialmente durante las temporadas de los años 2004 y 2005, se puso en manifiesto la necesidad urgente de poder evaluar la vulnerabilidad de las zonas costeras y de rediseñar la protección costera para eventos futuros. En vista de esto, se estableció desarrollar modelos numéricos capaces de reproducir la evolución morfológica de playas en la escala de tiempo de tormentas individuales. En consecuencia, como parte de la iniciativa se inicia el proyecto Morphos-3D desarrollado por USACE-ERDC, donde también nace un programa de código abierto, Xbeach para el comportamiento de condiciones extremas en las playas. En este trabajo se tiene como objetivo evaluar las capacidades del modelo XBeach en la modelación de los cambios en la morfología de la playa Escuadrón. Se utilizará el modelo Xbeach con el propósito de reproducir los cambios morfológicos después de tres eventos de condiciones hidrodinámicas incidentes.

Para diagnosticar el fallo de una playa, es necesario evaluar los alcances de inundación debido al gran aumento en el nivel de marea, por efecto de las tormentas. Junto a esto, también se analiza la evolución morfológica de ciertos perfiles de playa debido a los eventos en escala de tormentas individuales, se modelan entonces estos eventos de tormenta en la playa Escuadrón (Coronel) con el software XBeach.

Por lo tanto, el desarrollo de este análisis se centra en el diagnóstico y modelación de la evolución morfodinámica de la playa Escuadrón en la escala de tormentas individuales. Se evaluarán las capacidades del modelo XBeach en la

modelación de las variaciones de la morfología de la playa mencionada, con el objetivo específico de modelar los procesos morfodinámicos y calibrar el modelo, de tal forma de reproducir la evolución bajo tres eventos de condiciones hidrodinámicas incidentes ocurridas durante el mes de junio 2017. En primer lugar, se presenta una breve descripción de lo que se hizo, continuando con la metodología de trabajo, la cual incluye la descripción del modelo Xbeach, la información disponible para modelación y los criterios de modelación y calibración. Finalmente se realiza un análisis de los resultados y se concluye el trabajo completo.

3. METODOLOGÍA

3.1 Descripción general

En primer lugar, se procede a extraer series de tiempo de olaje cada 3 horas desde el WAVEWATCH III para el mes de Junio 2017, la cual se procesa con un filtro a través de Matlab escogiendo un punto de extracción al frente del golfo de Arauco, en aguas profundas (Latitud -35.0° , longitud -75.5°). En estas series de tiempo se identifican 3 eventos de tormenta con periodos en promedio de un día, los cuales son los inputs de entrada para el Delft3D. Ya propagados los 24 escenarios a través de Delft3D, se extraen los espectros de salida cada 3 horas para dos puntos de extracción; P1 (Latitud -36.948019° , longitud -73.169076°) y P2 (Latitud -36.950670° , longitud -73.170338°), los cuales serán los inputs de entrada para el modelo morfodinámico XBeach.

Para obtener los perfiles de playa que se modelaran en XBeach, se extrae una batimetría desde GeoMapApp del año 2002 para el sector de la playa Escuadrón, la cual, fue unida a la disponible en las cartas náuticas del SHOA y ajustada mediante Google Earth Pro. Se realizó una campaña a terreno el día 13 de octubre del 2017, donde se hizo un levantamiento de dos transectos y toma de muestras de sedimento en la playa Escuadrón, que servirán finalmente para comparar los perfiles iniciales, finales y modelados.

En relación al nivel de marea se extrae desde UNESCO-IOC en la estación de Coronel-Chile, para el mes de Junio 2017. Y esta se compara con un nivel de marea de predicción desarrollado a partir de T-Tide, para el mes de Junio.

Se procede finalmente a modelar cada transecto obtenido, con los 24 espectros de salidas de Delft3D, que son los inputs de entrada cada 3 horas en XBeach, considerando el nivel de marea por evento, diámetro medio de sedimento y tiempo de modelación morfológico de un día, en el modo no estacionario o Surfbeat en 1D.

3.2 Área de Estudio

Se aprecia en la Figura 1 la falla de la playa Escuadrón días después de los eventos de tormenta, que según fuentes locales erosionó más de dos metros en la vertical dejando al descubierto cañerías emisoras y haciendo fallar estructuras como las que se aprecian. La playa de Escuadrón se localiza en el golfo de Arauco, costa centro-sur de Chile (Figura 2a). Coronel es una playa reflectiva, con marea semi diurna y dominada por el oleaje, con arena de un diámetro medio (D_{50}) en promedio de 0.6 mm. Se dispone de mediciones de topografía de playa realizadas a baja marea con un GPS diferencial de la zona demarcada en la Figura 2c meses después de tres eventos de tormenta incidentes, según se detalla en la Tabla 1. El primer evento (1) corresponde a un evento bastante energético ($H_s= 6.9$ m, $T_p=13.5$ s, en promedio en aguas profundas). El segundo evento considerablemente energético ($H_s= 5.3$ m, $T_p=11.8$ s, en promedio en aguas profundas) y el tercer evento ($H_s= 4.4$ m, $T_p=12.2$ s, en promedio en aguas profundas) medianamente energético. Adicionalmente, se dispone de una batimetría obtenida desde GeoMapApp del año 2002 (GEBCO, 2003) para el sector de la playa Escuadrón, la cual fue unida a la disponible en las cartas náuticas del SHOA y ajustada mediante Google Earth Pro.



Figura 1: Foto de falla en playa escuadrón tomada el día 30 de Junio (Fuente: Elaboración propia)

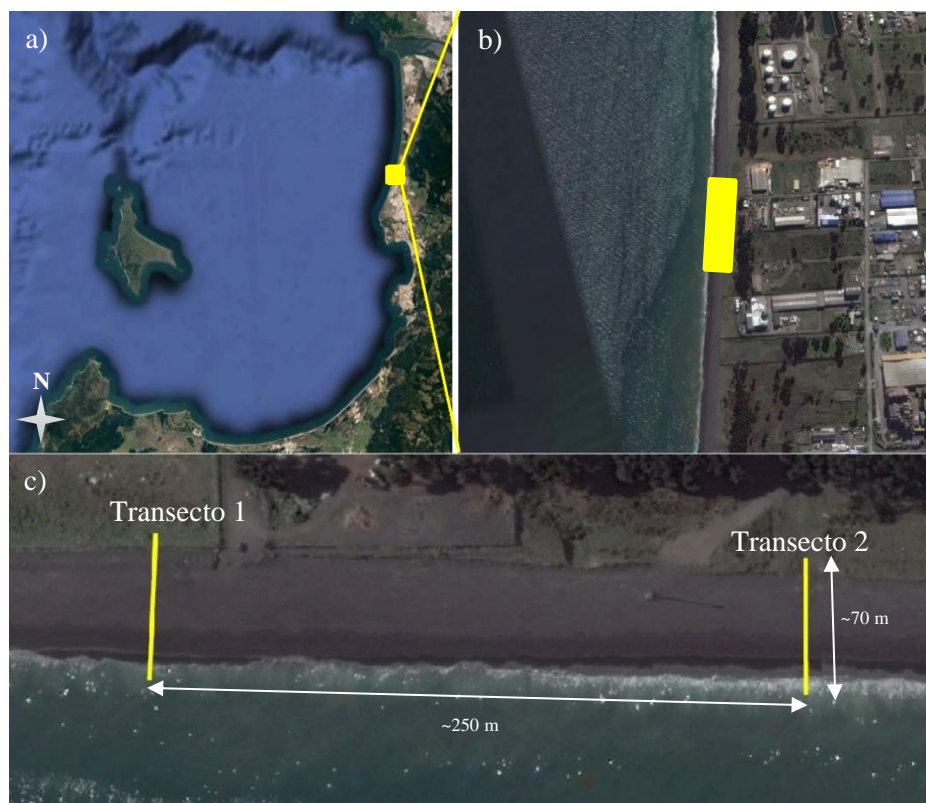


Figura 2: a) Localización de Escuadrón en la bahía de Concepción. b) Detalle de la playa Escuadrón. En el cuadro celeste se muestra el detalle c) que indica el recorrido del RTK al medir la topografía.

3.3 Datos disponibles

Las series de tiempo de oleaje fueron obtenidas a partir del hindcast desarrollado por NOAA WAVEWATCH III. Esta información se desarrolla a partir de análisis meteorológicos que se ejecuta cuatro veces al día, cada ejecución comienza con pronósticos de 9, 6 y 3 horas, que producen pronósticos cada 3 horas (National Oceanic and

Atmospheric Administration, 1970). La base de datos extraída específicamente de la posición latitud -37° y longitud -76.5° , frente a al Golfo de Arauco en aguas profundas, contiene altura significativa, periodo peak y dirección. Las características hidrodinámicas presentes en aguas profundas fueron usadas como condiciones de borde del modelo de propagación Delft3D, el cual fue desarrollado y calibrado en la tesis Gómez et al. (2017). Usando el modelo numérico ya calibrado, se propagan 3 eventos de tormenta (Tabla 1). Extrayendo espectros de salida cada 3 horas para cada uno de los eventos, entre los veriles -27 a -31 m. Estos sirven como inputs de entrada al modelo XBeach.

Tabla 1: Detalle de los eventos modelados.

Tormenta	Fechas (dd/mm/aaaa)		Detalle
	Inicio	Fin	
1	11-06-2017	12-06-2017	Evento (1) medianamente energético
2	14-06-2017	15-06-2017	Evento (2) considerablemente energético
3	22-06-2017	23-06-2017	Evento (3) el más energético

La Figura 3 muestra los parámetros de H_s , T_p y Dir para el mes de Junio, dado que los periodos en su mayoría son mayor a 10 (s), predomina un oleaje tipo swell (Kinsman, 1965). También incluye el nivel de marea instantáneo, que fue obtenido desde la base de datos de la UNESCO-IOC (1985) para la estación de monitoreo ubicada en Coronel. Se observa que las direcciones principales de las tormentas son SW y W para los 3 eventos.

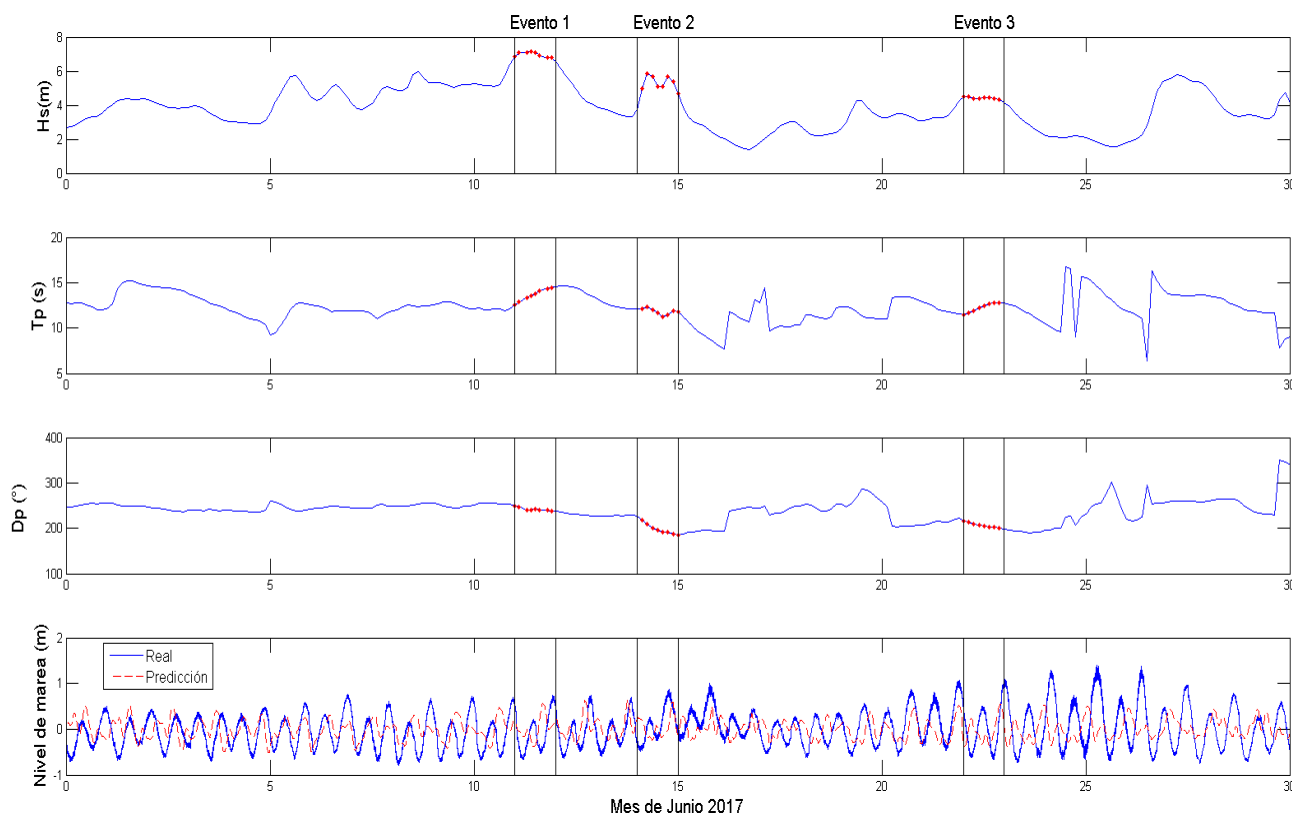


Figura 3: Forzantes hidrodinámicos utilizados como condiciones de entrada para modelar en Delft3D.

3.4 Condiciones atmosféricas durante los eventos de tormenta

3.4.1 Storm surge

Es el efecto del aumento del nivel del mar, producto de los fuertes vientos y bajas presiones provocados por una borrasca. La borrasca (B) son las bajas de presión atmosférica en el ojo de la tormenta provocados por los ascensos de las masas de aire cálido en el ojo de la tormenta en sentido horario en el hemisferio sur, disminuyendo la presión

sobre el mar, por consecuencia el aumento del nivel del mar. En la figura 4, se aprecian los tres eventos, donde eventualmente el evento 3 fue el que más aumenta el nivel de marea, ya que, fue el más cercano al continente. Storm surge es entonces la diferencia en el nivel de marea de tormenta con el nivel de marea sintético (predicción), esto se puede apreciar en el nivel de marea real versus la predicción en la Figura 3. Esta última, se obtuvo con un análisis armónico utilizando la herramienta T-Tide (Pawlowicz et al., 2002). Normalmente sigue una relación aproximada del aumento del nivel del mar 1 cm. por cada milibar de descenso en la presión atmosférica (Benavente, 2015).

En el evento 1, evento 2 y evento 3 se alcanzan bajas de presión en el centro de las borrascas de 995 hpa, 989 hpa y 975 hpa, respectivamente (Figura 4). También se aprecian los anticiclones (A), que en pocas palabras son los descensos de masas de aire cálido en sentido antihorario en el hemisferio sur. Esto también se puede traducir a que un anticiclón sea asociado a un equilibrio climático y una borrasca a un desequilibrio climático, donde producto de estos fenómenos provocan fuertes vientos en la misma dirección de giro y en forma global hacia donde la zona de baja presión se mueva, provocando el “wind set up” sobre las masas de agua, es decir, un aumento del nivel del mar producto del viento. Este efecto es inversamente proporcional a la profundidad y está presente en las costas abiertas, la configuración del viento en la costa abierta penetrara de manera similar a la marea astronómica (D. Lee Harris, 1963). Por lo anterior se infiere entonces que el wind set up fue en alza en el orden de los eventos y que el más afecto al nivel de marea fue el del tercero, ya que, fue el más cercano al continente.

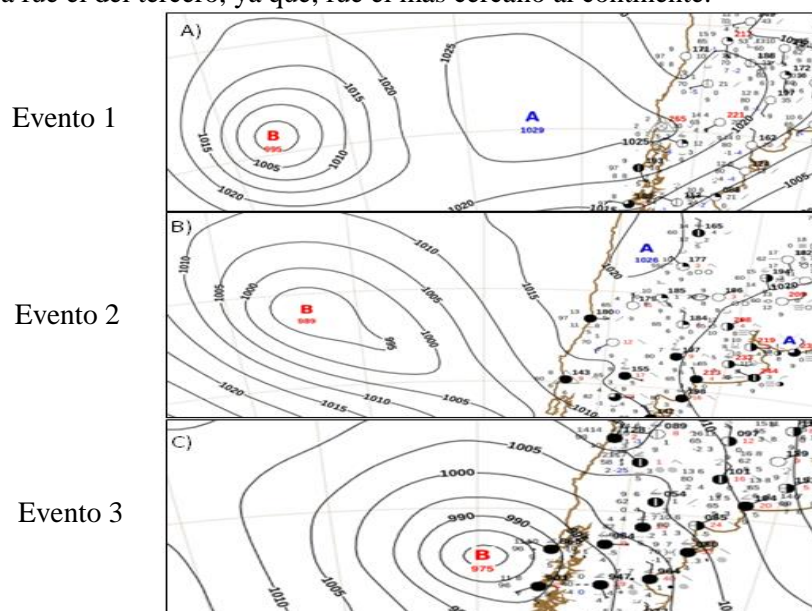


Figura 4: Borrascas y anticiclones para los eventos 1, 2 y 3, A), B) y C), respectivamente. (Fuente: DMC, 1984).

3.4.2 Condiciones de marea

Dependiendo del alineamiento del sol, la luna y la tierra, se aprecian alzas de marea (pleamar) y bajas en la marea (bajamar), siendo los niveles de marea más bajos en cuadratura y más altos en sicigia, donde normalmente se producen dos pleamares y dos bajamares por día lunar ya que, al mismo tiempo que la luna eleva el agua sobre la tierra en el lado que mira hacia ella, también separa la tierra del agua en el lado opuesto. Entonces en relación a los eventos, el primero (11/06/17) tuvo una luna menguante gibosa, para el segundo evento (14/06/17) se tuvo una alineación en cuadratura y finalmente para el tercer evento (22/06/17) se tuvo una alineación en sicigia (Fuente: <https://www.vercalendario.info>).

Sumando estas condiciones presentes en los tres eventos de tormenta seguidos en un periodo de doce días, y dado que el último evento fue el más energético, ya que, se combinaron las bajas en la presión atmosférica, alzas en el nivel de marea producto del storm surge y wind set up, más la sicigia (alineamiento de la luna con el sol y tierra), fueron las que conjuntamente elevaron el nivel de marea, elevando también la línea de costa lo que hizo que las olas rompieran con toda su energía en una sección de la playa que ya no tenía la misma berma que en condiciones normales, haciendo fallar la playa Escuadrón finalmente el 24 de Junio 2017.

3.5 Modelo

XBeach es un modelo morfodinámico basado en procesos físicos en escala de tiempo de grupo de olas, para determinar los cambios morfológicos cercanos a la costa. Las formulaciones de longshore transport son similares a las formulaciones de Delft3D, pero XBeach cubre un conjunto más amplio de procesos de cross-shore. El flujo de retorno, la asimetría de las olas, el roller de las olas y las ondas de infragravedad son ejemplos de procesos que se incluyen en XBeach y no en Delft3D (Trouw et al., 2012).

XBeach, software de código 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 incidente y variaciones en el nivel del mar, posibilitando la inserción de estructuras no erosionables para modelar la presencia de diques, muros, entre otros. El modelo ha sido extensamente validado respecto a mediciones de laboratorio y a mediciones in-situ (e.g.: 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).

XBeach se diseñó inicialmente para determinar la erosión costera durante una tormenta (Roelvink et al., 2009) en escalas de tiempo de tormenta. Los módulos que considera XBeach para determinar los cambios morfológicos son:

- Modo estacionario: resolver ecuaciones promediadas por ondas de manera eficiente. El modo estacionario no tiene en cuenta las ondas de infra gravedad y, por lo tanto, los tiempos de cálculo son más pequeños que para el modo de navegación de surf. Este modo se usa principalmente para condiciones de oleaje moderado.
- Modo Surfbeat: resolución de variaciones de onda corta y ondas largas asociadas en la escala de grupos de ondas. Se usa para determinar la erosión de la tormenta. Durante las tormentas, las ondas de infra gravedad son importantes y Surfbeat toma esto en cuenta.
- Modo no hidrostático: permite resolver ecuaciones de agua poco profundas no lineales. Para ondas cortas cuenta con resolución de la fase, aplicando un término de corrección de presión. Permitiendo la propagación y decaimiento de olas 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).

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

$$D = 2\alpha f_{rep} E_w Q_b \quad (2) \text{ Roelvink 1}$$

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

Donde:

- 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

- Q_b es la fracción de oleaje rompiente parametrizada con la expresión $Q_b = [1 - e^{-\left(\frac{H_{rms}}{\gamma h}\right)^n}, 1]$, con n y γ parámetros libres del modelo (por defecto 10 y 0.55).

El modelo comienza interpretando las condiciones iniciales y de contorno. El usuario puede especificar los siguientes elementos como entrada para el modelo:

- Condiciones de contorno de ola
- Condiciones de contorno de flujo, marea y ola
- Input de viento
- Input de sedimentos
- Batimetría
- Input de descarga

Después de interpretar el límite y las condiciones iniciales, XBeach resuelve el balance de acción de la onda para el primer paso de tiempo. El balance de acción de onda corta resuelve la propagación de onda corta. Las ecuaciones que resuelven los movimientos de onda de infragravedad y las corrientes son las ecuaciones no lineales para aguas someras (NLSWE). El balance de acción de onda corta proporciona información para el NLSWE en forma de fuerzas inducidas por la onda. Lo hace de dos maneras: ambas con tensiones de radiación que provienen del balance de acción de la onda y de las tensiones de radiación que provienen del balance de energía roller.

Usando la entrada del balance de acción de la onda, las NLSWE está resuelto. Las velocidades de corriente y las variaciones del nivel de agua se proporcionan a la ecuación de transporte de sedimentos, que es una ecuación de advección-diferenciación promediada en la vertical. Las velocidades de corriente y las variaciones del nivel de agua son términos de entrada para las ecuaciones de transporte de sedimentos en suspensión. El transporte de sedimentos que se determina con estas ecuaciones se corrige para el efecto de pendiente del lecho. Usando los volúmenes de sedimentos entrantes y salientes en cada celda, la parte inferior se actualiza (utilizando un balance de masa). Producto de la escala temporal que se resuelve, se toma en cuenta la forma de la onda 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 ecuación 4 para un caso unidimensional.

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

En el cual S_k y A_s son parámetros de esbeltez y asimetría, respectivamente. Estos se determinan en la formulación de 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 f_{ua} en el modelo. Para un mayor detalle de las ecuaciones y valores por defecto que dispone Xbeach, el usuario se puede referir al manual (Dano Roelvink (P.I.) et al., 2010).

3.6 Simplificaciones

Se consideraron las siguientes simplificaciones en la modelación.

- Para reducir el costo computacional, se hacen simulaciones modo perfil o unidimensional, sin considerar la componente direccional del oleaje. Es decir, se opta por la convención náutica (Norte 0° - Este 90° - Sur 180° - Oeste 270°), donde la zona de rompiente el oleaje va en dirección perpendicular a la línea de costa.
- Se modelaron dos perfiles de playa para los tres eventos en el mes de junio, según muestra la figura 5. Cada perfil fue extraído en dirección perpendicular a la línea de costa, de la batimetría original (2002).
- Solo se realiza un análisis en el modo surf-beat, para reducir el costo computacional y en favor al tiempo disponible para desarrollo de este trabajo.
- No se consideraron input de viento, para reducir el costo computacional, pero si se consideraron los efectos del viento en el nivel de marea.
- Se ajusto la batimetría a la cota 0, asumiendo esta como la línea de costa, lo cual será una fuente de error asociada a los resultados.

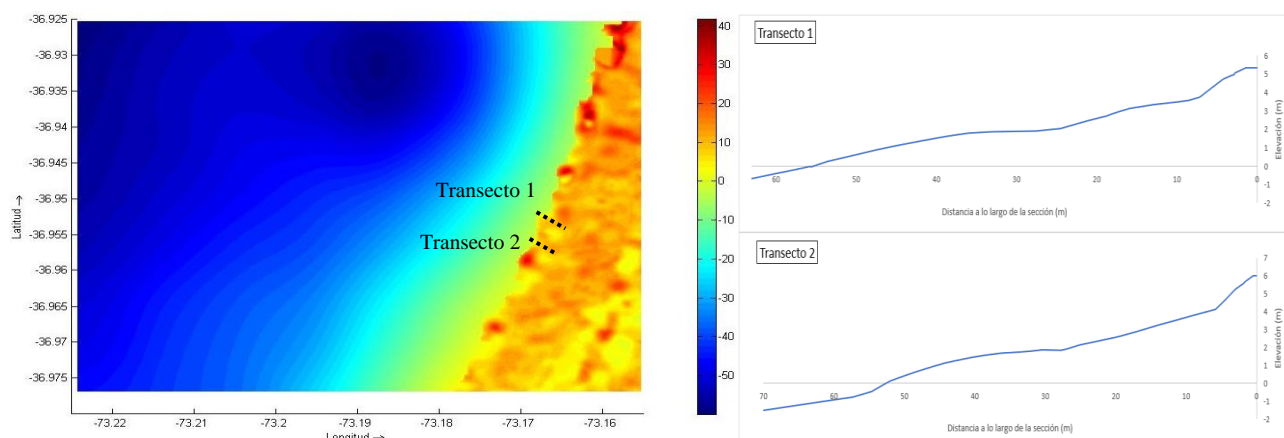


Figura 5: Imagen a la izquierda corresponde a la batimetría y ubicación de los transectos en el centro sur de Chile, en playa Escuadrón, golfo de Arauco (profundidad del agua en metros). Panel derecho corresponde a transectos 1 y 2, respectivamente. Estos fueron medidos el día 13 de octubre del 2017.

Tabla 2: Parámetros de Xbeach (params.txt) que no fueron modificados en las modelaciones.

Parámetros	Valor por defecto
morfac	1
gamma	0.55
alpha	1
n	10
delta	0

3.7 Calibración

El procedimiento de calibración fue variar la menor cantidad posible de parámetros por defecto de Xbeach, similar al de Splinter et al. (2012). Se decide entonces sensibilizar ante los parámetros f_{ua} y break. f_{ua} , parámetro de influencia de la asimetría y simetría de onda corta en el transporte de sedimentos (Ecuación 4, valor por defecto $f_{ua} = 0.1$). El parámetro f_{ua} puede variar entre 0 y 1, donde el valor nulo corresponde a un transporte de sedimentos totalmente en dirección mar (erosión) y el valor uno representa la totalidad del transporte de sedimentos en dirección hacia la costa (acreción). Se varió el valor de f_{ua} en intervalos regulares de 0.1 entre 0 y 0.5.

El segundo parámetro de calibración es la opción de modo de rompimiento 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 (Ecuación 2 y 3, respectivamente). Para las posibles combinaciones de tipo de rompimiento y f_{ua} , se dispone un total de 24 combinaciones para los perfiles de playa, entre los cuales se escoge para cada uno la combinación óptima que minimice el error cuadrático medio (RMSE) en la parte seca de la playa o sobre el nivel medio del mar.

Para determinar el error de los modelos se cuantificó la cantidad de sedimento erosionado (ΔV) por sobre el nivel medio del mar. ΔV se calculó como la diferencia entre los perfiles iniciales (i) modelados con los finales (f) medidos en la campaña de terreno de Octubre del 2017, integrados en la horizontal según la ecuación 5. Y la ecuación 6, representa el error cuadrático medio entre los perfiles modelados (zm) y el final (zf), con n cantidad de celdas según la grilla de la parte seca del perfil de playa.

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

$$RCM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (zm - zf)^2} \quad (6)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 6 muestra los resultados de los parámetros en resumen de Hs, Tp y Dir para cada uno de los eventos propagados en Delft3D, junto al nivel del mar utilizado como dato de entrada en Xbeach, donde se apreciar en el rango de periodos, la combinación del oleaje tipo swell con el oleaje tipo seas, generado este último por vientos locales (Ochi, 1998). Los parámetros se muestran cada tres horas, la cual es además el intervalo de tiempo de actualización de los datos de entrada en Xbeach.

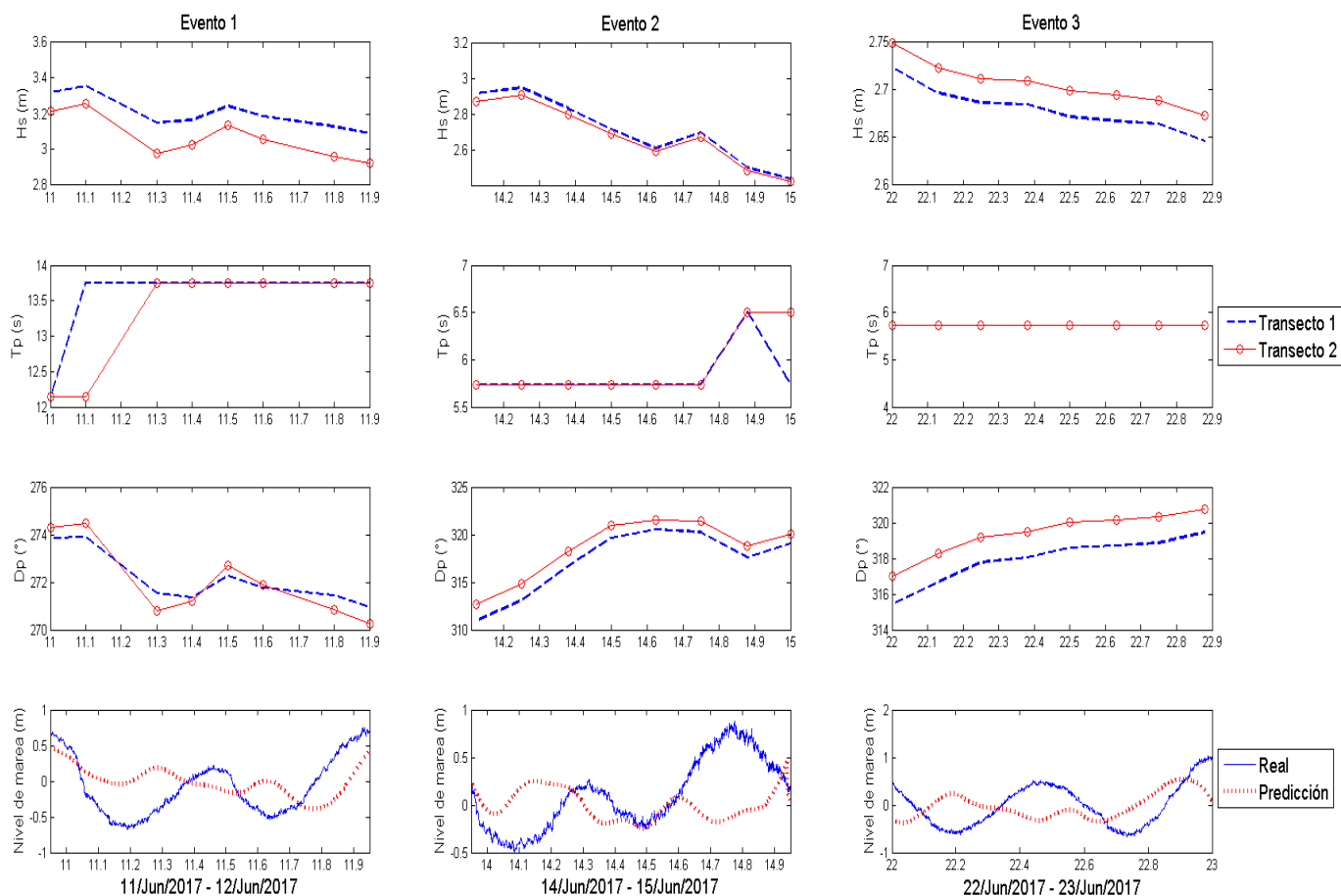


Figura 6: Forzantes hidrodinámicos obtenidos desde Delft3D entre los veril -27 a -31 m. De izquierda a derecha se muestran los eventos 1, 2 y 3, desde el 11-12, 14-15 y 22-23 de Junio 2017, respectivamente. En descenso altura de ola, periodo peak, dirección, y nivel de marea.

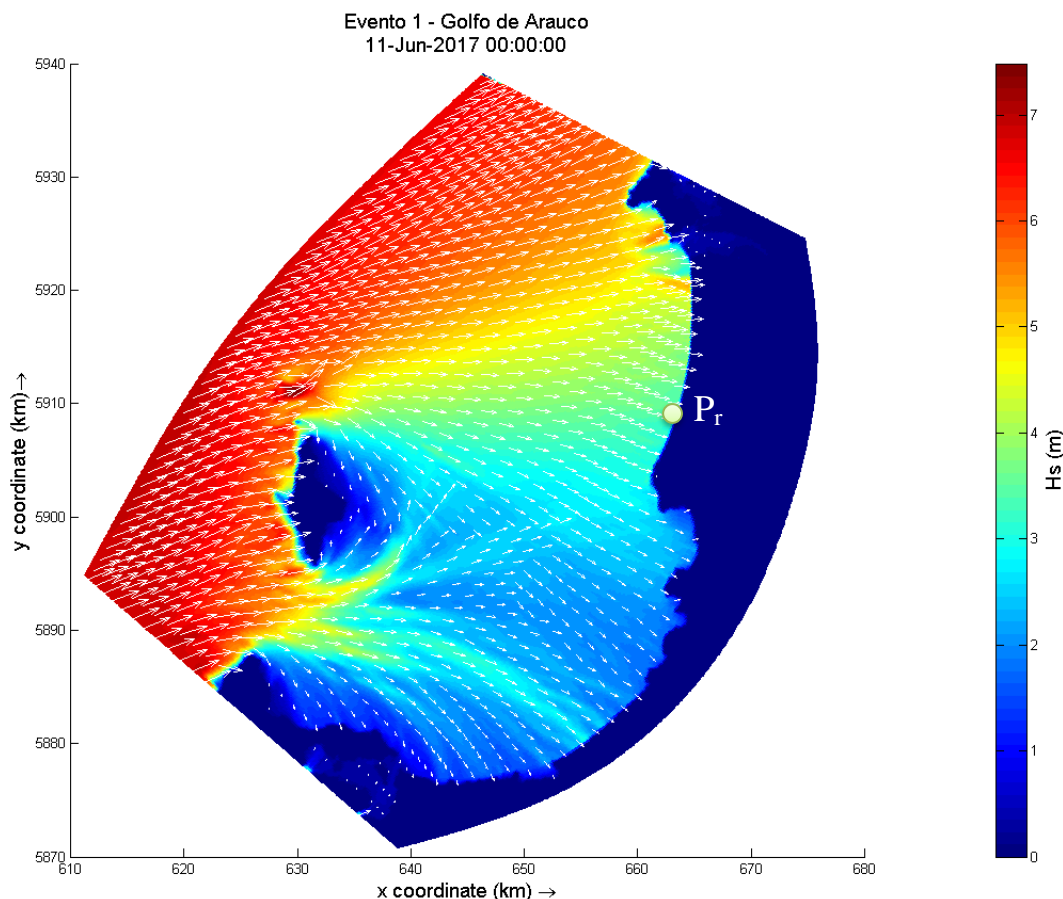


Figura 7: Propagación obtenida desde Delft3D en el golfo de Arauco, para el primer evento (11 de Junio 2017).
 Extrayendo los resultados en Pr (Latitud -36.950670° , longitud -73.170338°).

En las Figuras 8, muestran los perfiles modelados para todas las combinaciones f_{ua} -break en los transectos mencionadas en la Figura 5. La imagen ubicada arriba muestra los cambios asociados al criterio de rompimiento roelvink1 (Ecuación 2) y la ubicada abajo al parámetro de rompimiento roelvink2 (Ecuación 3). Los perfiles de colores que presentan mayor erosión y menos similares al perfil final observado, son los asociados a valores pequeños de f_{ua} (mínimo 0). Los perfiles más similares al perfil final observado representan valores mayores de f_{ua} (máximo 0.5). Se observa que, para el primer evento modelado y las morfologías anteriores, el rompimiento asociado al parámetro roelvink1 (Ecuación 2) y valores mayores de f_{ua} reproducen mejores predicciones con Xbeach.

Un simple reconocimiento visual comparativo de las imágenes, indican que para condiciones hidrodinámicas incidentes similares, el criterio de rompimiento asociado a la Ecuación 3 genera mayor erosión. Esto se puede explicar por la forma de las parametrizaciones de disipación. La diferencia se debe a que la disipación en la Ecuación 2 es proporcional a H^2/h contra H^3/h en la Ecuación 3 (Splinter y Palmsten, 2012). La Ecuación 2 se apoya en la hipótesis de que la altura de ola es del mismo orden que la profundidad. Es decir, que habrá menor disipación en la zona litoral cuando valores de γ y n , parámetro interruptor que indica el tipo de rompiente y potencia en el modo de disipación roelvink, respectivamente, son usados por defecto ($\gamma=0.55$ y $n=10$), como se realizó en este trabajo.

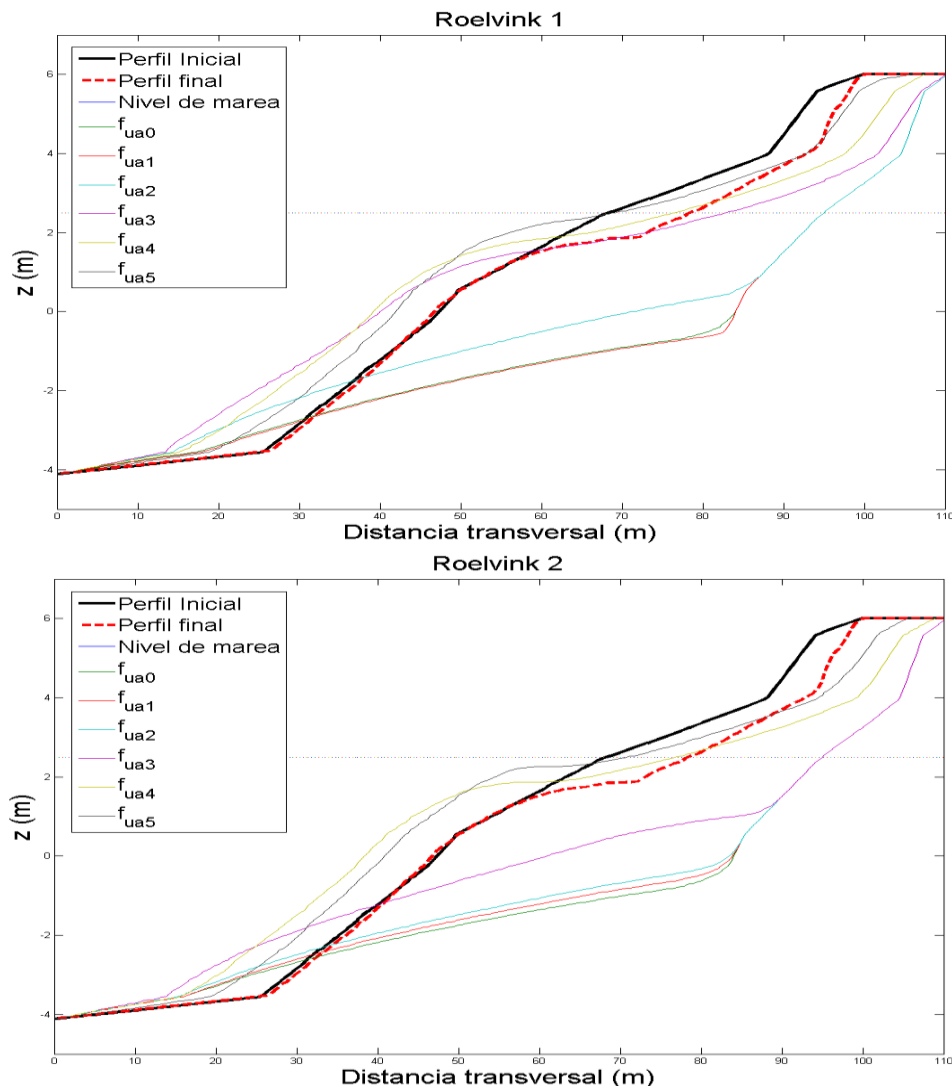


Figura 8: Resultados de calibración para el transecto 2 para evento 1. Imagen ubicada arriba muestra los cambios asociados al criterio de rompimiento roelvink 1, y abajo al criterio de rompimiento roelvink 2. Ambas imágenes contienen variaciones del parámetro f_{ua} desde 0 a 0.5 con un paso de 0.1.

Dado que no se consideró la componente direccional de la onda para disminuir el costo computacional, como consecuencia tampoco el transporte de sedimentos longitudinal, por lo tanto, las diferencias en los perfiles iniciales con los finales de playa se deben en parte a esto. La gran concentración de sedimentos en la parte baja de los perfiles de playa va generando un suavizamiento en la pendiente de los perfiles, esto se debe básicamente a que, en condiciones de tormenta, el oleaje que actúa sobre la playa es de gran contenido energético, que en el proceso de rotura genera corrientes de retorno de gran intensidad. Provocando un retroceso en la línea de costa. Dada la pendiente de la playa Escuadrón, no se logran formar barras submarinas, por lo cual, no hubo un filtro energético haciendo que las olas rompieran en las partes altas de los perfiles producto del elevado nivel de marea durante el evento, entonces no hubo un mecanismo de protección ante los eventos de tormenta.

Dado que los perfiles de playa finales fueron obtenidos meses después de los eventos, se hipotiza que el sedimento erosionado depositado en las partes bajas de los perfiles fue transportado hacia la costa, hasta llegar a la línea de costa, produciendo un avance de esta misma. El caso ideal para una buena protección frente a los eventos de tormenta altamente energético serían perfiles de elevadas pendientes y amplias bermas (Sánchez-Arcilla, 1994).

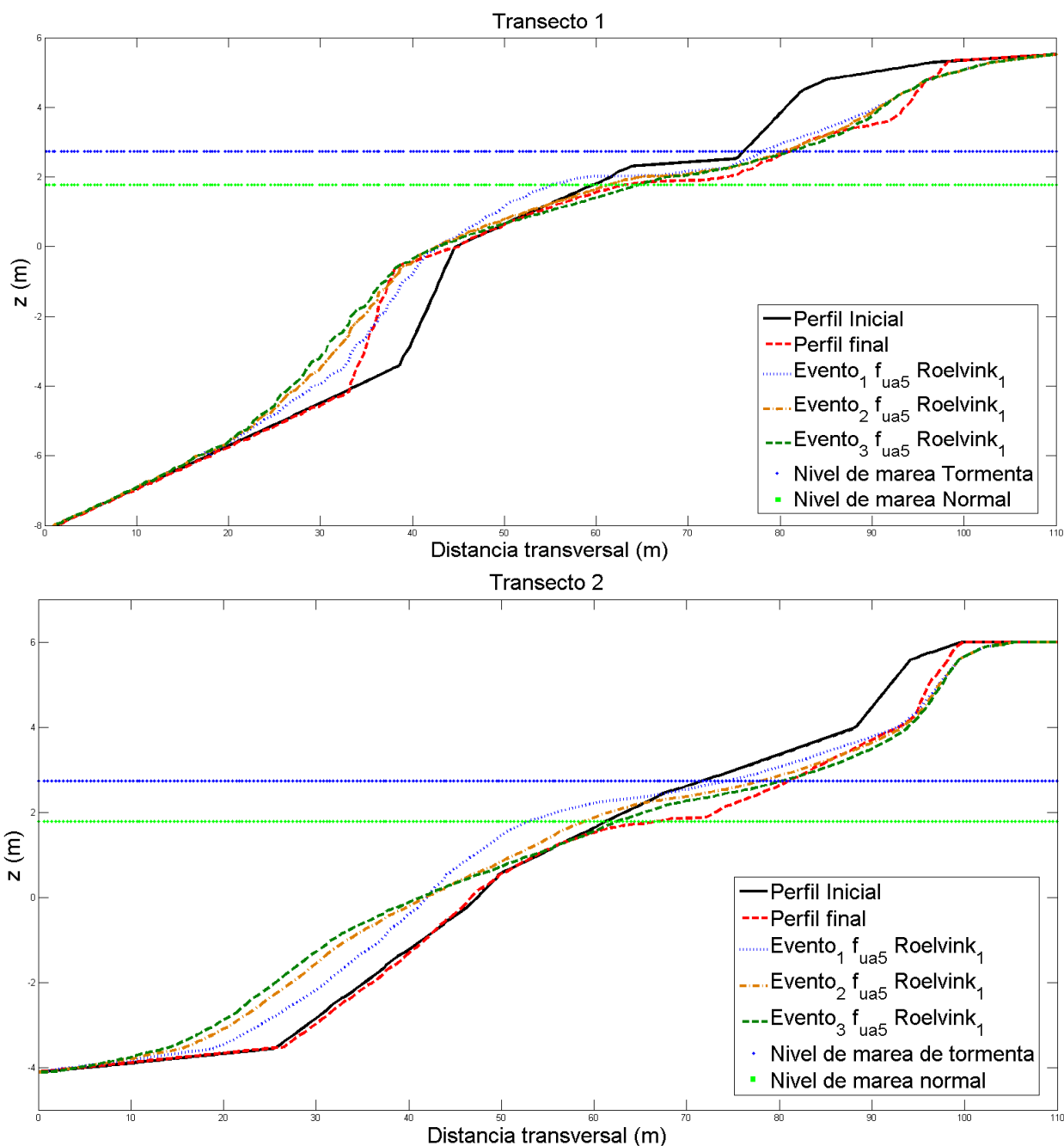


Figura 9: Resultados de calibración de los eventos 1, 2 y 3. Imagen superior vemos el transecto 1, he inferior el transecto 2. Ambas imágenes contienen el parámetro f_{ua} con valor 0.5 y criterio de rompimiento Roelvink 1.

La Tabla 3 muestra los resultados de la calibración para todos los eventos y transectos modelados, indicando la combinación f_{ua} -break que minimiza la diferencia entre perfiles finales de playa sobre el nivel medio del mar. Se incluyen también los valores de ΔV topográficos y modelados en (m^3/m), por Xbeach.

Tabla 3: Resultados Modelaciones y Calibración.

Evento	Transecto	f_{acua}	$break$	RCM (cm)	ΔV topográfico	ΔV modelado
1	Transecto 1	0.5	Roelvink1	30	-	-
2	Transecto 1	0.5	Roelvink1	18	-	-
3	Transecto 1	0.5	Roelvink1	17	35	30
1	Transecto 2	0.5	Roelvink1	44	-	-
2	Transecto 2	0.5	Roelvink1	28	-	-
3	Transecto 2	0.5	Roelvink1	20	26.5	25.8

Para todos los perfiles y escenarios modelados, el criterio de disipación por defecto (roelvink2) no reproduce bien la forma de los cambios morfológicos en los perfiles. Dado que no se dispone de mediciones de transformación de oleaje que ayuden para contrastar la propagación modelada con la existente, se hipotetiza que la parametrización de disipación de la Ecuación 2 representa mejor la ruptura del oleaje para los eventos modelados. Con respecto al valor del parámetro f_{ua} que minimiza las diferencias predomina en la mayoría de los casos el valor 0.5, lo que se traduce un proceso de condición de transporte de sedimentos en equilibrio.

Para el último evento de tormenta, la diferencia entre los perfiles modelados con Xbeach y los perfiles finales difieren en la vertical en el orden de 17 cm para el transecto 1 y 20 cm para el transecto 2, según el estadístico de error cuadrático medio o RCM. En la figura 10 muestra los perfiles finales modelados luego de las tres tormentas (línea azul continua) para los parámetros de calibración óptimos de cada perfil. La imagen superior presenta los cambios morfológicos en el transecto uno, y a la inferior los cambios morfológicos en el transecto dos. En ambas imágenes se ve la falla de la estructura, donde el terreno de la fundación comprometió a la estructura tanto en el deslizamiento como también la rotación de la estructura.

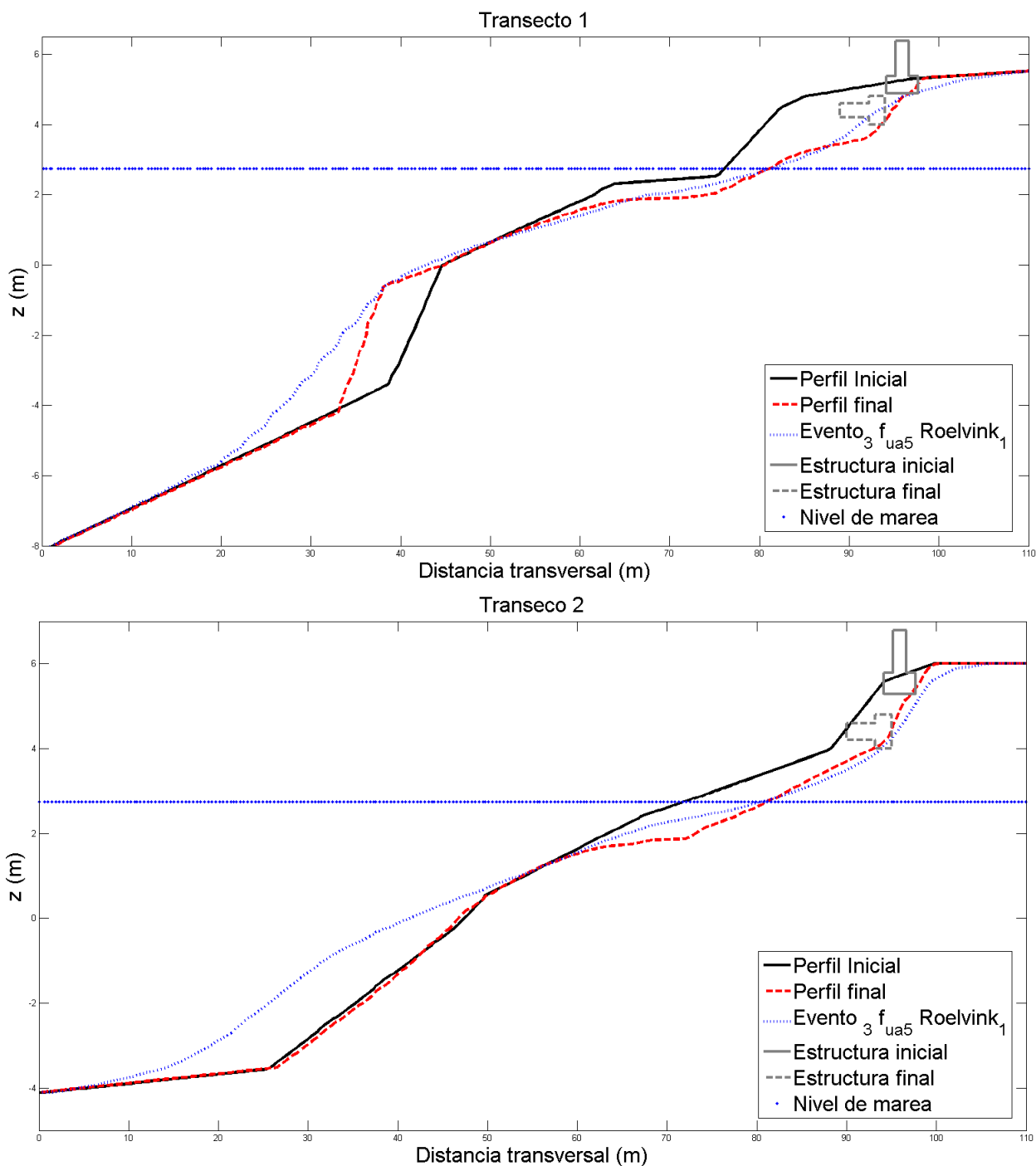


Figura 10: Resultados de calibración luego de los tres eventos. Imagen ubicada a la izquierda representa el transecto 1, y la imagen ubicada a la derecha representa el transecto 2. La línea negra representa el perfil inicial. En rojo discontinuo el perfil observado final y en azul el perfil modelado.

Se observa que los perfiles modelados son bien representados por el modelo XBeach. Las discrepancias presentes en el transecto 1, en la erosión modelada entre los $z=-6$ y $z=0$, se hipotiza que se debe a la regeneración de la playa en condiciones de oleaje menos energético, al igual que en el transecto 2 las discrepancias en la erosión modelada entre los $z=-4$ y $z=1$. En términos estadísticos, la diferencia entre el error de volumen ΔV topográfico versus el modelado fue subestimada en un 15% y 3%, para los transectos 1 y 2, respectivamente. Eventualmente esto se traduce que la erosión producida tras los tres eventos fue formando un escarpe en las partes altas de los perfiles, como se aprecia en la Figura 11. Estos cambios fueron bien reproducidos por las modelaciones.



Figura 11: Foto intermedia entre los transectos 1 y 2, en playa Escuadrón (13 de Octubre 2017).

La diferencia entre los perfiles modelados con los finales, posiblemente se debe a que el modo surfbeat usado para las modelaciones, implica que los cambios asociados a la zona de swash son solo producidos por ondas de infragravedad, habiéndose disipado previamente las ondas de menor periodo. Para poder modelar correctamente una playa reflectiva, se podría usar el modo que resuelve la fase. Sin embargo, este modo solo ha sido validado con éxito en playas de grava (Ibaceta, 2017).

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se probaron las capacidades del modelo Xbeach en la modelación de evolución morfológica de la playa Escuadrón bajo tres eventos de tormenta, los cuales, en condiciones de baja presión atmosférica (Borrasca), storm surge, alineación de los astros y los set-up de vientos, provocaron finalmente la falla de la playa el 24 Junio 2017.

Como no se contó con una batimetría previa al primer evento, solo se pudo demostrar que los sucesivos eventos de tormenta combinados con las condiciones mencionadas, potencialmente si hicieron fallar la playa. Si bien los resultados fueron satisfactorios, sin embargo, existen diferencias en la erosión producida en la parte baja de la playa, esto se atribuye a que al momento de hacer el levantamiento topográfico ya había transcurrido varios meses, en los cuales, se hipotetiza que la playa recuperó sedimento con condiciones de oleaje menos energético. Por lo tanto, este modelo es más que suficiente para realizar un análisis de riesgo simple.

La modelación de los procesos en XBeach fue compleja, ya que, requiere un costo computacional relativamente alto y la cantidad de parámetros de entrada son bastantes, los cuales en este trabajo se usó una mínima calibración de estos. Añadiendo también que la calibración de cada modelación ante distintos eventos y condiciones iniciales es necesario. Por consiguiente, el usuario debe tener cuidado al momento de determinar si los parámetros que usará serán los por defecto u otros que representarán adecuadamente los cambios morfológicos esperados.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecer al SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada) por la cesión de los datos batimétricos utilizados en este trabajo. Maritza Jara por facilitar el uso de las dependencias de la sala de tesis. Matías Gómez respecto a la transferencia de oleaje en Delft3D.

7. REFERENCIAS

- Agustín Sánchez-Arcilla, José A. Jiménez** (1994). Ingeniería de Playa (I): Conceptos de Morfología Costera. Universidad Politécnica de Cataluña.
- 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.
- D. Lee Harris** (1963), Characteristics of the Hurricane Storm Surge.
- Dirección Meteorológica de Chile (DMC)** (1984). URL: <http://www.meteochile.gob.cl/>.
- Dano Roelvink (P.I.), Ad Reniers, Ap van Dongeren, Jaap van Thiel de Vries, Jamie Lescinski, Robert McCall** (2010). XBeach Model Description and Manual. URL: http://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html
- Javier Benavente** (2015). Inundación Costera. Curso Cartagena de Indias.
- Jacqueline Carpine-Lacre, Robert Fisher, Briean Harper, Peter Hunter, Meirion Jones, Adam Kerr, Anthony Laughton, Steve Ritchie, Desmond Scott, Maya Whitmarsh** (2003). The 100-year story of the GENERAL BATHYMETRIC CHART OF THE OCEANS. The History of GEBCO.
- Kinsman B.** (1965), "Wind Waves". Dover Phoenix Editions.
- L.J.C. (Laurens) Bart** (2017). Long-term modelling with XBeach: combining stationary and surfbeat mode in an integrated approach.
- Michael G. Hughes, Troels Aagaard, Tom E. Baldock, Hannah E. Power** (2014), Spectral signatures for swash on reflective, intermediate and dissipative beaches. Marine Geology, Volume 355.
- M. Gómez** (2017). Caracterización de la dirección del transporte longshore en las playas del golfo de Arauco, Chile, para evaluar la evolución morfológica de la línea de costa.
- National Oceanic and Atmospheric Administration** (1970). MMAB Operational Wave Models. <http://polar.ncep.noaa.gov/waves>.
- 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.
- LORENA IVONNE CEA FUENZALIDA** (2016). IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE SEGUIMIENTO DE LA LÍNEA DE COSTA EN LA DESEMBOCADURA DEL RIO MATAQUITO.
- Ochi M. K.** (1998), Ocean waves, the stochastic approach. Cambridge, Ocean Technology series 6.
- Phillips, O. M.** (1977). The dynamics of the upper ocean. Cambridge University Press.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S.** (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE.
- 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.

Rangel-Buitrago N, Anfuso G (2011). Morphological changes at Levante Beach” (Ca’diz, SW Spain) associated with storm events during the 2009–2010 winter season.

Raimundo Ibaceta, Harold Diaz, Patricio Winckler, Patricio Catalan, Roberto Agredano, Francisco Molteni, Rodrigo Campos-Caba (2017). Evolución morfológica de playas en escala de tormentas aplicación del modelo Xbeach en la playa Reñaca.

Roelvink, J.A., (1993). Dissipation in random wave groups incident on a beach. Coastal Engineering.

Splinter, K.D., Palmsten, M.L., (2012). Modeling dune response to an east coast low. URL: <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.

Svenden, I. A. (1984a). Mass flux and undertow in a surf zone. Coastal Engineering.

Trouw, K., Zimmermann, N., Mathys, M., Delgado, R., and Roelvink, D. (2012). NUMERICAL MODELLING OF HYDRODYNAMICS AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE SURF ZONE: A SENSITIVITY STUDY WITH DIFFERENT TYPES OF. Coastal Engineering.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (1985). SEA LEVEL STATION MONITORING FACILITY. URL: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>.

vercalendario.info (2011). Calendario Lunar 2017 (Chile) URL: <https://www.vercalendario.info/es/luna/chile-ano-calendario-2017.html>.

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

Zhang, K., Douglas, B., and Leatherman, S. (2004). Global warming and coastal erosion. Climatic Change.

7. ANEXO params.txt

```

%%%%%%%%%%%%%%
%%% XBeach parameter settings input file Playa Escuadron  %%%
%%%                                     %%%
%%% date: 30-Nov-2017 08:40:27                                     %%%
%%% function: xb_write_params                                     %%%
%%%%%%%%%%%%%%

%%% Bed composition parameters %%%%%%%%%%%

D50    = 0.000594
D90    = 0.001132

%%% Flow boundary condition parameters %%%%%%%%%%%

front  = abs_1d
back   = abs_1d

%%% Flow parameters %%%%%%%%%%%

bedfriction = manning
nuh         = 0.0131
nuhfac     = 1

%%% General %%%%%%%%%%%

%%% Grid parameters %%%%%%%%%%%

depfile = bed_event01.dep
posdwn  = 0
nx      = 294
ny      = 0

```

```
alfa = 0
vardx = 1
xfile = x.grd
yfile = y.grd
xori = 0
yori = 0
thetamin = 225
thetamax = 315
dtheta = 20
thetanaut = 1

%% Initial conditions %%%
zs0 = 2.49

%% Model time %%%
tstop = 86400

%% Morphology parameters %%%
morfac = 1
morstart = 0

%% Sediment transport parameters %%%
facua = 0.5

%% Wave boundary condition parameters %%%
instat = jons_table

%% Wave breaking parameters %%%
break = roelvink1
gamma = 0.55
alpha = 1
n = 10
delta = 0

%% Wave-spectrum boundary condition parameters %%%
bcfile = jonswap.txt

%% Output variables %%%
tint = 86400
tstart = 0
tunits = seconds since 2017-06-11 +0
```