

SOBRE EL USO DE LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES CON EL PROMEDIO DE REYNOLDS EN EL CAMPO DE LA INGENIERÍA DE COSTAS

• Adrián Pedrozo-Acuña •
• Alec Torres-Freyermuth •
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

En este trabajo se presenta una discusión sobre la utilidad de modelos de propagación de oleaje no lineal en aguas costeras, con particular énfasis en el empleo de modelos de alta resolución (espacial y temporal), basados en las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS). Este tipo de modelos brindan una oportunidad única para realizar estudios detallados de los procesos involucrados en la transformación del oleaje antes y durante la rotura. Para demostrarlo, se presentan ejemplos donde se hace evidente el alto nivel de detalle que se puede alcanzar en la descripción del flujo mediante el uso de este tipo de modelos. Se destaca el rol diagnóstico que poseen, dada su capacidad para el desglose de cada una de las variables involucradas en la rotura del oleaje (por ejemplo, velocidades, turbulencia, gradientes de presión). Para resaltar su amplio rango de aplicación se presentan resultados para dos playas con características y procesos hidrodinámicos asociados distintos. Los resultados numéricos mostrados confirman que estos modelos son una excelente herramienta para el estudio de procesos relacionados con la rotura del oleaje y su evolución en la zona de lavado. Es evidente que la combinación de este tipo de herramientas con mediciones de campo y/o laboratorio tendrá un rol primordial en el desarrollo de la ingeniería de costas en los años venideros.

Palabras clave: ecuaciones de Navier-Stokes, oleaje, hidrodinámica, zona de rompientes, playas, rotura, ingeniería de costas.

Introducción

La predicción de la cinemática del oleaje en la costa es de suma importancia para determinar zonas vulnerables a erosión e inundación ante eventos extremos, así como la probabilidad de fallo de estructuras de protección costera. En el área de aguas someras ($kh < 1$; k = número de onda; h = profundidad) es donde el oleaje sufre las transformaciones más dramáticas, resultado de procesos como el asomeramiento, las interacciones no lineales entre componentes (Elgar y Guza, 1985) y la reflexión parcial de la energía incidente en playas/estructuras. Más aún, procesos disipativos como la rotura y la fricción de fondo presentes en esta zona controlan el límite de ascenso máximo de las

olas (inundación) en el área de lavado (*swash*). De todos estos procesos de transformación del oleaje, la rotura del oleaje es sin duda el proceso más llamativo y, al mismo tiempo, el menos entendido de todos ellos. Esto se debe a que el oleaje en rotura es un flujo turbulento, lo que significa que es altamente aleatorio e inestable, y por lo tanto impredecible.

A pesar de que se ha reconocido la importancia de incluir todos los procesos mencionados anteriormente para el cálculo de transporte de sedimento en playas y/o el diseño de estructuras costeras (por ejemplo, rompeolas, diques, escolleras, etcétera), la capacidad para simular dichos procesos de forma integral se ha visto limitada durante varios años debido a ciertas dificultades en el modelado. Las prin-

cipales dificultades son las siguientes: a) la falta de una teoría de ondas capaz de describir la transformación del oleaje en rotura, y b) la determinación del contorno (móvil) en la cara de la playa, que es determinante para una buena descripción de la dinámica en esta zona.

La zona de rompientes se define como aquella región donde inicia la rotura del oleaje por los efectos de su interacción con el fondo y se extiende hasta la cara de la playa donde el oleaje en rotura es propagado en analogía a un salto hidráulico o *bore* (Svendsen *et al.*, 2000). La importancia del estudio de la hidrodinámica en la zona de rompientes (HZR) en playas radica en que es allí donde ocurre la mayor parte del transporte de sedimentos, lo que condiciona la ubicación de la línea de costa y el ancho de playa.

Con el inicio de la rotura, las teorías desarrolladas para describir el movimiento oscilatorio del oleaje dejan de ser válidas (Svendsen, 2005). Por lo tanto, su estudio y modelado se han visto inmersos en una serie de suposiciones para permitir el uso de modelos paramétricos basados en observaciones realizadas en el campo (Thornton y Guza, 1983) y/o en laboratorio (Battjes y Janssen, 1974; Dally *et al.*, 1985).

Entre los modelos de mayor uso para la descripción del oleaje en rotura se encuentran aquellos basados en las ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSWE, por sus siglas en inglés). La aproximación numérica de esta descripción matemática fue introducida al campo de la ingeniería de costas por Hibberd y Peregrine (1979). Este tipo de modelos resuelve las NLSWE de forma transitoria para predecir el comportamiento de los *bores* dentro de las zonas de rompientes y de lavado. También han sido utilizados para estudiar ascenso máximo, la reflexión sobre estructuras y para discutir la hidrodinámica sobre playas con pendiente suave (Raubenheimer *et al.*, 1995, 1996; Raubenheimer, 2002) y pronunciada (Kobayashi *et al.*, 1987, 1989). Más aún, en años recientes se ha mejorado su esquema

de resolución numérica utilizando el método de volumen finito (Dodd, 1998), la cual se ha extendido a dos dimensiones 2DH (Hubbard y Dodd, 2002).

Las ecuaciones de aguas someras son una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes. Las hipótesis clave consisten en considerar la uniformidad en vertical del perfil de velocidades horizontal, y una distribución de presiones hidrostáticas por debajo de la ola. Sin embargo, es importante hacer notar que en las NLSWE, la velocidad de fase es independiente de la longitud de onda, con lo que esta teoría no puede describir las diferencias en la velocidad de propagación para diferentes componentes del oleaje. Una alternativa para describir el oleaje en aguas intermedias consiste en el uso de las ecuaciones de Boussinesq (Peregrine, 1967). Estas ecuaciones se pueden concebir como una extensión de las ecuaciones de aguas someras debido a que incluyen términos adicionales que consideran la curvatura de la distribución vertical del perfil de presiones. Esto implica que las velocidades no están distribuidas uniformemente en la vertical. Modelos basados en estas ecuaciones describen de forma satisfactoria la evolución del oleaje desde aguas intermedias (antes de la rotura) hasta aguas someras. Su restricción principal es que el oleaje debe ser débilmente no lineal y débilmente dispersivo, por lo que su límite estricto de aplicación es en aguas intermedias. Sin embargo, estudios posteriores se enfocaron en relajar las limitaciones antes mencionadas, en relación con la no linealidad y dispersividad, con la inclusión de términos de orden superior (Liu, 1994; Wei *et al.*, 1995) y la división del dominio en diferentes capas (Lynett, 2006), respectivamente. Esto último ha permitido extender la aplicación de este tipo de modelos desde aguas profundas hasta la costa de forma satisfactoria. Sin embargo, al igual que en las NLSWE, el proceso de rotura es simulado de forma artificial mediante parametrizaciones empíricas (Schäffer *et al.*, 1993; Kennedy *et al.*, 2000).

Se anticipa que, dentro del campo de la ingeniería de costas, todos los modelos mencionados anteriormente seguirán jugando un papel importante en los años por venir. Los tiempos de cálculo computacional necesarios para resolver estas ecuaciones en grandes áreas ($O \sim km$) compensan la parametrización de los procesos disipativos asociados con el oleaje, como la rotura, fricción de fondo y turbulencia. Sin embargo, todavía existe una gran cantidad de trabajo por delante en cuanto al mejoramiento de nuestro entendimiento acerca de algunos de los procesos asociados con la rotura del oleaje y sus efectos en el transporte de sedimentos, con el objetivo de mejorar las parametrizaciones utilizadas en este tipo de modelos (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2006 y 2007).

Aunado a lo anterior y tomando en cuenta el desarrollo tecnológico de las computadoras, se puede constatar que en diferentes ramas de la ingeniería el uso de modelos avanzados que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas (RANS) se ha convertido en una opción para superar algunas de las limitaciones mencionadas anteriormente. El estudio de procesos relacionados con la transformación (no-lineal) del oleaje durante la rotura con estas ecuaciones ha sido el objeto de diversas investigaciones a partir de los trabajos pioneros de Lin y Liu (1998a, b). La mayor parte de los esfuerzos iniciales estuvieron enfocados a la validación de este tipo de modelos para el estudio de la rotura sobre lechos permeables y la interacción oleaje-estructura a una escala de laboratorio (Hsu *et al.*, 2002; García *et al.*, 2004; Lara *et al.*, 2006a; Lara *et al.*, 2006b). Durante los últimos años, el modelo numérico ha sido modificado por el grupo de Ingeniería de Costas de la Universidad de Cantabria, España, para ser utilizado como una herramienta ingenieril. Esta nueva versión, COBRAS UC (Losada *et al.*, 2008), reduce el tiempo de computación de forma significativa, mejora el sistema de generación de oleaje irregular y permite la definición de geometrías complejas de forma sencilla a través de una interfase (*Coral*). Este modelo fue utilizado

para el estudio de la transformación del oleaje en playas naturales por Torres-Freyermuth *et al.* (2007). Es importante destacar que este tipo de modelos brinda la oportunidad de realizar estudios detallados de los procesos involucrados en la transformación de oleaje. Por ejemplo, se les puede utilizar para diagnósticos por medio del desglose de cada una de las variables involucradas en la rotura del oleaje (velocidades, turbulencia, aceleraciones, gradientes de presión). Así lo demuestran trabajos como el presentado por Puleo *et al.* (2007), que a partir de simulaciones numéricas para distintos tipos de rotura comprobaron que la aceleración local (du/dt) no puede ser utilizada como sustituto de los gradientes de presión dentro de la zona de rompientes, como fue sugerido en trabajos anteriores. Otro ejemplo de este tipo de investigación fue ilustrado por Pedrozo-Acuña *et al.* (2010), quienes a partir de la combinación de resultados numéricos y mediciones de laboratorio realizaron un estudio detallado de los impactos del oleaje debidos a la rotura en voluta sobre una playa de grava. Los estudios diagnósticos, complementarios a los abocados a la sola predicción del oleaje y sus velocidades en la cercanía de la costa, otorgan un nuevo rol a modelos basados en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas, dado que por medio de simulaciones numéricas de gran detalle (espacial y temporal) se puede ampliar el conocimiento de variables físicas importantes en la zona de rompientes. Este no es un aspecto menor si se consideran las dificultades asociadas con la correcta medición de velocidades y transporte de sedimentos en aquellas zonas de la playa caracterizadas por la presencia de intensa turbulencia y altas velocidades, como es el caso de la zona de lavado, donde hasta la fecha no existe un conocimiento claro del balance de los procesos que dan forma a una playa (Masselink y Puleo, 2006).

Por otra parte, estos modelos tienen la capacidad de mejorar las parametrizaciones de la zona de rompientes. Recientemente, Bradford (2009) utiliza este tipo de modelos

para derivar relaciones entre la altura del oleaje en rotura y la máxima velocidad inducida por el oleaje, así como entre la anchura de la zona de rompientes y el tipo de rotura. Estas expresiones resultan de gran utilidad al ser incorporadas en los métodos de percepción remota.

Es importante resaltar que existen modelos más complejos que utilizan nuevos métodos numéricos para su solución y discretización, así como modelos de cierre más sofisticados para la turbulencia. Un ejemplo de estas nuevas aproximaciones está representado por la aplicación del método de partículas discretas para representar una ola propagándose en la zona de rompientes. Este método Lagrangiano está expresado en un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias determinadas para un gran número de partículas que simulan el movimiento del fluido de acuerdo con las ecuaciones RANS. Este método combina la ventaja de satisfacer completamente las condiciones de frontera no lineales en la superficie, con la posibilidad de representar flujos rotacionales y el volteo de las olas. Koshizuka *et al.* (1998), y Gotoh y Sakai (2005) utilizan lo que se conoce como un método semi-implícito (MPS, por sus siglas en inglés) para el oleaje en rotura. Mientras que Gómez-Gesteira y Dalrymple (2003), y Dalrymple y Rogers (2006) utilizan el método de hidrodinámica de partículas (SPH, por sus siglas en inglés) para calcular la interacción del oleaje con estructuras. Esta técnica ha tenido un auge notable en las últimas décadas (Shao *et al.*, 2006; Khayyer *et al.*, 2008; Shao, 2010). A pesar de que tales trabajos han puesto en evidencia la capacidad de estos modelos para modelar la transformación no lineal del oleaje en aguas someras de forma más completa, su uso operacional no se ha extendido debido a que siguen estando restringidos por los tiempos de cómputo y las dificultades para definir los contornos laterales en el dominio de cálculo.

Este trabajo tiene como objetivo principal utilizar un modelo basado en las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes 2DV, a fin de

presentar dos casos de estudio abocados a la investigación de la hidrodinámica de la zona de rompientes en dos playas con características distintas (grava y arena). Ambos ejemplos se presentan con la intención de resaltar sus diferencias e informar al lector sobre el tipo de problemas que se pueden resolver con este tipo de modelos, así como las escalas espaciales y temporales que se pueden resolver, dada la capacidad computacional con que se cuenta en la actualidad.

Ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS)

A pesar de que se conocen las ecuaciones (Navier-Stokes) que describen el flujo turbulento debido a la rotura del oleaje y su interacción con el fondo (poroso), y que existen los esquemas numéricos para la resolución de dichas ecuaciones, todavía no es posible modelarlo de forma exacta. Esto se debe a que para resolver la escala más pequeña de la turbulencia se requeriría de una capacidad de cómputo y almacenamiento no disponible para analizar problemas a dicha escala. Esta limitación ha motivado el desarrollo de modelos basados en una aproximación estadística para modelar la turbulencia mediante las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS, por sus siglas en inglés). Las ecuaciones tipo RANS se obtienen mediante el promediado de las ecuaciones de Navier-Stokes en una escala mayor que el de la turbulencia. Por lo tanto, las ecuaciones resultantes describen la velocidad, presión, temperatura y transporte medio en el flujo, mas no los detalles de las fluctuaciones turbulentas. El efecto de la turbulencia en el flujo medio se introduce a través de los tensores de Reynolds. El uso de esta aproximación hace que las ecuaciones no constituyan un sistema cerrado. Por lo tanto, el sistema requiere de un modelo de cierre empírico para su resolución numérica. Esto ha dado como resultado el desarrollo de modelos de cierre para la turbulencia con diferentes niveles de sofisticación, que van

desde modelos empíricos sencillos tipo Chezy hasta los llamados de simulación de remolinos mayores (LES, por sus siglas en inglés).

La selección de cualquiera de estos modelos en el estudio de la propagación del oleaje se basa en el compromiso entre el grado de sofisticación en el modelado de la turbulencia y el dominio (tiempo) de cómputo que se quiere estudiar. A pesar de que ya existen trabajos que emplean modelos (3D) LES para el estudio de la rotura del oleaje en el laboratorio (Christensen *et al.*, 2006; Lara *et al.*, 2011), las simulaciones están limitadas a un número pequeño de olas. Por otra parte, el uso de los modelos 2DV RANS que utilizan modelos de cierre de dos ecuaciones (k -epsilon, k -omega) permite modelar un número relativamente grande de olas ($O(100)$) a escalas de prototipo ($O(100)$ m) en tiempos de simulación asequibles ($O(10)$ h). Esta ganancia en eficiencia es a costa de que las características tridimensionales de la turbulencia no puedan ser resueltas y a que su aplicación se restrinja a flujos 2DV. Esta última restricción no impide el estudio de la rotura del oleaje en playas y estructuras, donde por efectos de la refracción, el oleaje tiende a incidir de forma normal en muchos casos.

El modelo numérico utilizado en este estudio es un modelo transitorio que resuelve las ecuaciones de Reynolds promediadas en el plano 2DV (Volume-Average/Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS)) (Hsu *et al.*, 2002). Este modelo está basado en el código RIPPLE desarrollado por la NASA para el estudio de fluidos incompresibles (Kothe y Mjølness, 1992). Lin y Liu (1998a, b) adaptaron este código para el estudio de la rotura del oleaje. Posteriormente, Hsu *et al.* (2002) introducen la solución de la turbulencia dentro del medio poroso. El código original ha sufrido una serie de modificaciones para el estudio de transporte de sedimentos no cohesivos (Hsu y Liu, 2004) y cohesivos (Torres-Freyermuth y Hsu, 2010) en suspensión, aplicaciones hidráulicas (*open channel flow*) (Lin y Xu, 2006), el estudio de interacción ola-estructura (Losada

et al., 2008), y estudio de la hidrodinámica de la zona de rompientes en playas (Torres-Freyermuth *et al.*, 2007; Torres-Freyermuth *et al.*, 2010).

Este tipo de ecuaciones promediadas resuelven la escala de la turbulencia de forma estadística. Las ecuaciones de gobierno son:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{n(1+c_A)} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} \\ &= \frac{1}{(1+c_A)} \left[-\frac{n}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle^f}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{ij} \rangle}{\partial x_j} + n g_i \right] \quad (2) \\ & - \frac{1}{1+c_A} \left[\frac{\alpha(1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle + \frac{\beta(1-n)}{n^2 D_{50}^2} \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2} \langle \bar{u}_i \rangle \right] \end{aligned}$$

$$\langle a \rangle = \frac{1}{V} \int_V a \, dV \quad (3)$$

$$\langle a \rangle^f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} a \, dV \quad (4)$$

Donde u_i representa la componente i del vector de velocidades; ρ , la densidad del fluido; p , la presión; g_i , la componente i de la aceleración de la gravedad, y τ_{ij} es el tensor de tensiones viscosas. La descomposición de Reynolds plantea que el campo de velocidades y el campo de presiones pueden ser descompuestos en dos términos: por un lado, el término de velocidad media y presión media (denotado por $\bar{\cdot}$), y por otro lado, la velocidad y presión de turbulencia (denotada por \cdot'), resultando el campo de presiones y de velocidades con las siguientes expresiones:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (5)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (6)$$

El modelo utilizado se basa en las ecuaciones bidimensionales RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), que resulta de aplicar la descomposición del campo de velocidades y presiones en un valor medio, y en un término turbulento a las ecuaciones clásicas de Navier-Stokes (5) y (6).

Donde:

$\bar{\tau}_{ij} = 2\mu\bar{\sigma}_{ij}$ es el tensor promediado de tensiones viscosas, siendo μ la viscosidad molecular.

$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ es la tasa de deformación del flujo medio.

La influencia de las fluctuaciones en el flujo medio se representa con el tensor de tensiones de Reynolds ($\rho(\overline{u'_i u'_j})$). El término $\rho(\overline{u'_i u'_j})$ se resuelve mediante un modelo de cierre de segundo orden y cuya aplicación en otros campos se ha realizado con éxito (Lin y Liu, 1998a y 1998b).

$$\langle a \rangle = n \langle a \rangle^f \quad (7)$$

$$n = \frac{V_f}{V} \quad (8)$$

Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo a dos playas de características distintas. Por un lado, se muestran los resultados para una playa de grava en laboratorio (López de San Román-Blanco *et al.*, 2006), la cual tiene alta permeabilidad y una pendiente muy pronunciada. Estas características geométricas producen que el tipo de rotura del oleaje sea principalmente en voluta. Los resultados numéricos son validados con mediciones de laboratorio, demostrando la capacidad del modelo para representar la rotura del oleaje.

Por otro lado, la capacidad del modelo para predecir la velocidad dentro de la zona de rompientes de una playa con pendiente suave se demuestra mediante la comparación de los resultados numéricos con las observaciones de Boers (1996) en una playa con barras. Finalmente, se presenta la aplicación del modelo para el estudio de los procesos que ocurren en la interfase tierra-agua y que por lo tanto son de un gran interés para los ingenieros costeros. El primero consiste en la modelación del oleaje en la zona de lavado y, el segundo, en la simulación del rebase del oleaje sobre una duna localizada en la parte alta de una playa de arena con pendiente suave. Ambos casos ilustran la capacidad del modelo aquí empleado para superar las limitaciones de otros modelos, al resolver la rotura del oleaje y el ascenso/descenso en playas. Esto permite diagnosticar procesos de suma importancia en un nivel de detalle que no se consigue con otras descripciones matemáticas.

Playa de pendiente pronunciada (grava)

El modelo numérico es aplicado en primera instancia al estudio de la transformación del oleaje en una playa de grava con pendiente 1:8. Los datos de laboratorio que se utilizan para comparar con los resultados obtenidos a través del modelo RANS son producto de una colaboración entre diversas instituciones europeas, que tuvo como objetivo el estudio de la hidrodinámica en la zonas de rompientes y lavado en playas de grava (López de San Román-Blanco *et al.*, 2006). La instrumentación y dimensiones de la playa en laboratorio se ilustran en el panel izquierdo de la figura 1, mientras que el dominio de cálculo y la discretización seleccionadas para el modelo se presentan en el panel derecho de la misma figura. La malla de alta resolución consta de 265 132 elementos, con un $\Delta x = 0.05$ m y $\Delta y = 0.025$ m. De acuerdo con el trabajo granulométrico reportado por López de San Román-Blanco (2003), la playa de grava tiene una porosidad de $n = 0.4$, por lo que en el

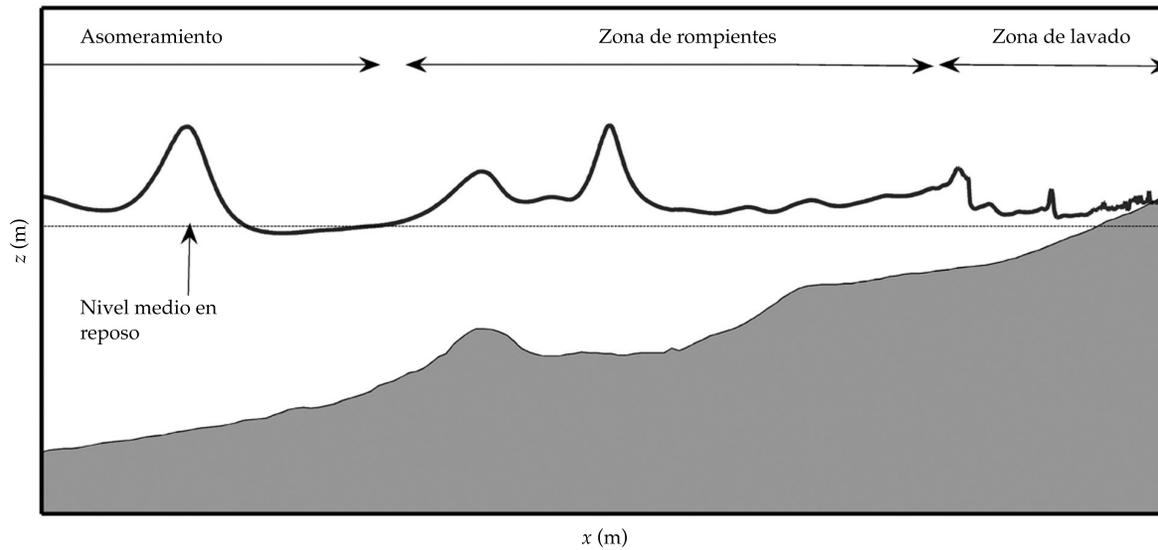


Figura 1. Zonas de transformación del oleaje en una playa.

modelo fue definida como un medio poroso uniforme.

Las playas de grava se diferencian de sus contrapartes de arena en la porosidad, la pendiente y el tipo de rotura que comúnmente se observa en ellas; la rotura en voluta es el tipo más común observado en este tipo de playas. Estudios previos han confirmado que este tipo de rotura induce presiones impulsivas, que son consecuencia de los impactos violentos del oleaje sobre el perfil de la playa (PedrozoAcuña *et al.*, 2008). Las condiciones de oleaje aleatorio utilizadas en este ejemplo están definidas por un espectro JONSWAP con $H_s = 0.6$ m y $T_p = 4.2$ s.

La figura 2 presenta la comparación de superficie libre medida en el laboratorio (línea discontinua) con los resultados obtenidos del modelo numérico (línea continua) para los sensores de oleaje del 15 al 24. En todos los casos, las simulaciones numéricas reproducen razonablemente bien las mediciones de laboratorio, con lo que se confirma la capacidad del modelo para reproducir la transformación de oleaje aleatorio a lo largo de fondo variable. Más aún, se hace hincapié en la estabilidad

numérica de la solución, pues se presentan más de 400 s de simulación. Al respecto, cabe resaltar que con la tecnología disponible, estos modelos siguen teniendo un alto costo computacional. Por ejemplo, la simulación numérica de los 550 s mostrados en la figura 2 requirió de veinte horas en una computadora de escritorio con procesador Pentium Intel® de 2.4 GHz. Sin embargo, el potencial de los modelos RANS estriba en el detalle de la información que proporcionan, ya que permiten examinar cada variable de interés durante el proceso de rotura del oleaje.

Para dar un ejemplo, la figura 3 presenta resultados numéricos del evento de una ola rompiendo sobre el perfil de la playa, para tres instantes en el tiempo ($t = 143.5$, 144.5 y 146.5 s) y tres variables que se pueden estudiar con este tipo de modelo. Los paneles superiores muestran resultados de la distribución de presiones calculada, los paneles medios ilustran la magnitud de la velocidad horizontal (u), mientras que los paneles inferiores revelan la estructura de la energía cinética de la turbulencia (k). Todas estas variables son de suma importancia para determinar el

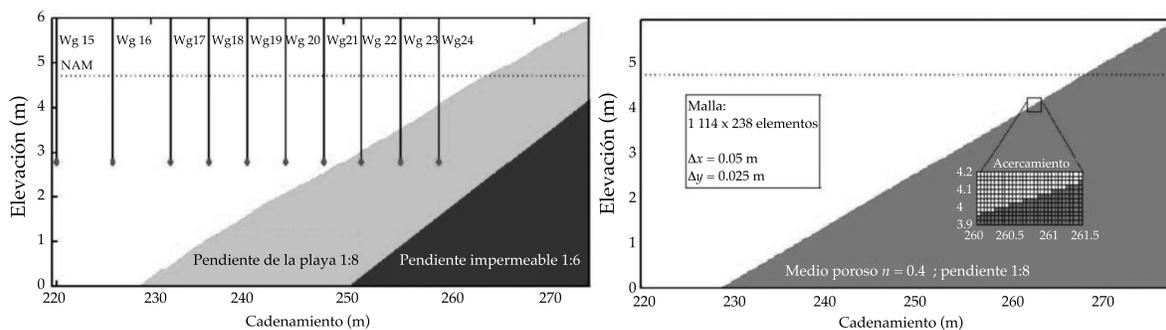


Figura 2. (Panel izquierdo) Instrumentación en el gran canal de oleaje, Hannover, Alemania; (panel derecho) dominio de cómputo y discretización para el modelo RANS (NAM: nivel de aguas medias).

transporte de sedimentos y la disipación de la energía sobre una playa. En consecuencia, tal y como fue señalado por Brocchini y Baldock (2008), se demuestra el potencial de estos modelos para mejorar el entendimiento de este tipo de fenómenos.

Los paneles superiores de la figura 3 ilustran las presiones inducidas por la ola rompiendo sobre el perfil de la playa. En el instante definido por $t = 143.4$ s, antes del colapso de la ola, se ilustra el evidente gradiente de presión espacial que se genera como resultado de la interacción de la ola incidente con el flujo en descenso (coordenada $x = 44$ m). Dichas presiones disminuyen paulatinamente conforme se disipa la energía del oleaje, tal y como se muestra en los paneles correspondientes a los instantes $t = 144.5$ y 146.5 s. En el caso de las velocidades horizontales (u), cabe destacar que en el momento en que la ola en disipación viaja hacia la parte superior de la playa (instante $t = 144.5$ s), la variación en la vertical de esta velocidad es evidente. Poniendo de manifiesto la compleja estructura del flujo en el *bore* y las limitaciones de aquellos modelos que suponen uniformidad vertical de la velocidad horizontal. Estas conclusiones se complementan con los resultados ilustrados en los paneles inferiores de la figura 3, que presentan resultados relativos a la energía cinética de la turbulencia. Es claro que durante el inicio del impacto de la ola sobre la playa ($t = 143.4$ s) y durante

su evolución ($t = 144.5$ s), la turbulencia más intensa se localiza en el frente de la ola. Por otra parte, al final de la fase de ascenso de la ola ($t = 146.5$ s), es clara la disminución en el nivel de energía cinemática de la turbulencia, lo que revela la disipación de energía de la ola conforme ésta viaja hacia la parte superior del perfil. Más aún, en este instante final ($t = 146.5$ s) se revela una turbulencia ligeramente más intensa en la parte superior de la capa de agua que compone el flujo. Esto indica la capacidad del modelo aquí empleado para llevar a cabo estudios relacionados con los efectos de la turbulencia sobre la capa límite del flujo en la zona de lavado.

Playa de pendiente suave (impermeable)

En esta sección, el modelo numérico es utilizado para obtener el campo de velocidades dentro de la zona de rompientes de una playa con barras. Los ensayos corresponden a las mediciones realizadas por Boers (1996) en una playa impermeable del canal de la Universidad Tecnológica de Delft, Holanda. El canal tiene 40 m de largo, 0.8 m de ancho y 1.5 m de altura. El nivel del agua durante los experimentos fue de 0.75 m en la posición de la pala generadora. En un estudio anterior, Torres-Freyermuth *et al.* (2010) adaptaron el modelo para el estudio de playas con pendiente suave y presentaron un análisis detallado de la transformación del

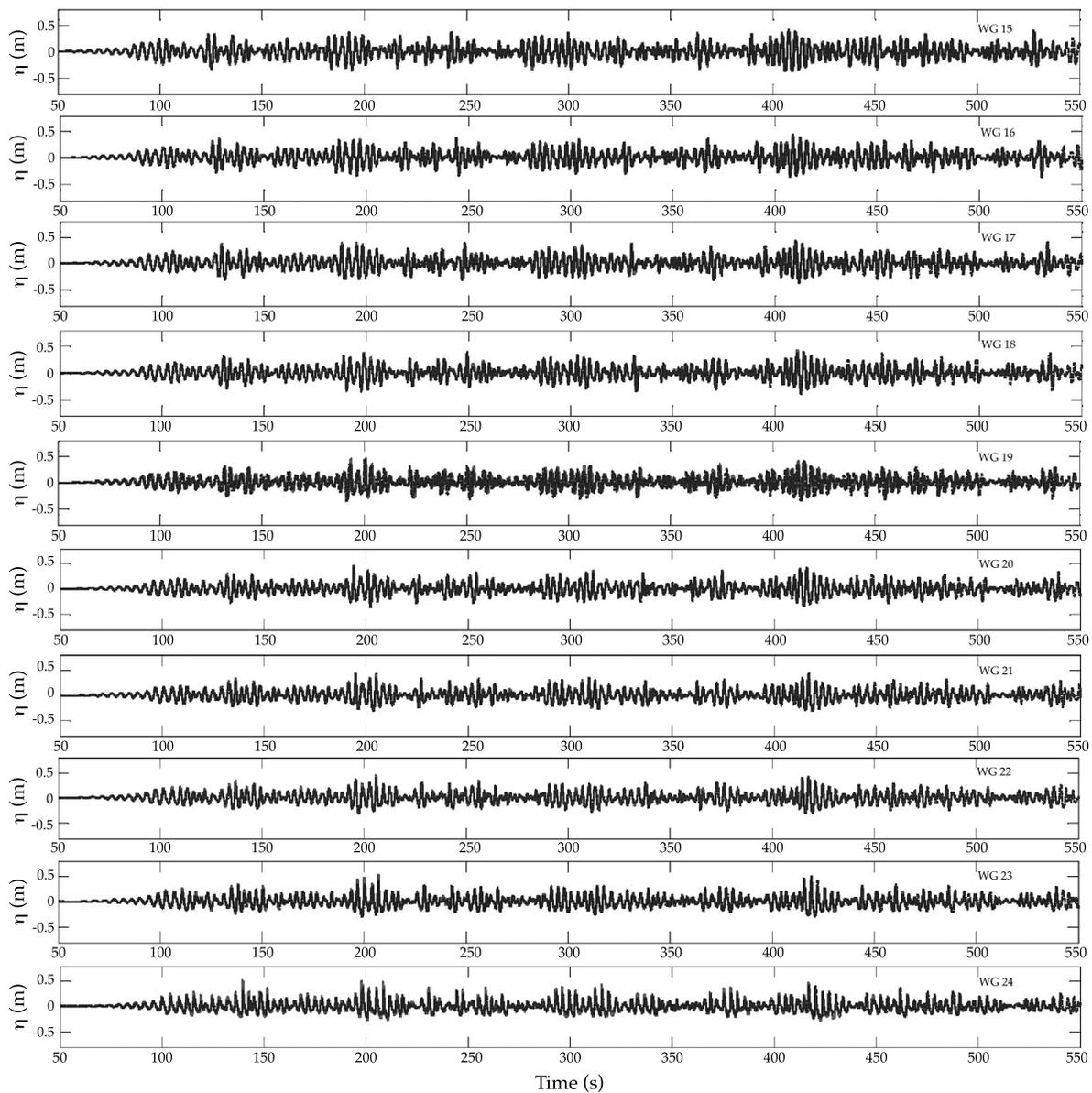


Figura 3. Comparación de superficie libre medida en laboratorio (línea discontinua) *versus* simulación numérica con las RANS (línea continua) para los diferentes sensores de oleaje.

espectro de energía de superficie libre. Por otro lado, en este trabajo se muestra la comparación de las series de tiempo de velocidad horizontal en un punto dentro de la zona de rompientes para oleaje irregular (Caso 1C: $H_s = 0.1$ m, $T_p = 3.33$ s). La figura 5a muestra la localización exacta del ADV en la columna de agua en un punto entre las barras dentro de la zona de

rompientes. La serie de velocidad es extraída para el mismo punto de la malla de cálculo en el modelo numérico. En las figuras 5b y 5c se muestran las series temporales de velocidad correspondientes a las altas y bajas frecuencias. La onda-corta (altas frecuencias) y onda-larga (bajas frecuencias) son obtenidas al aplicar un filtro paso alto y paso bajo, respectivamente.

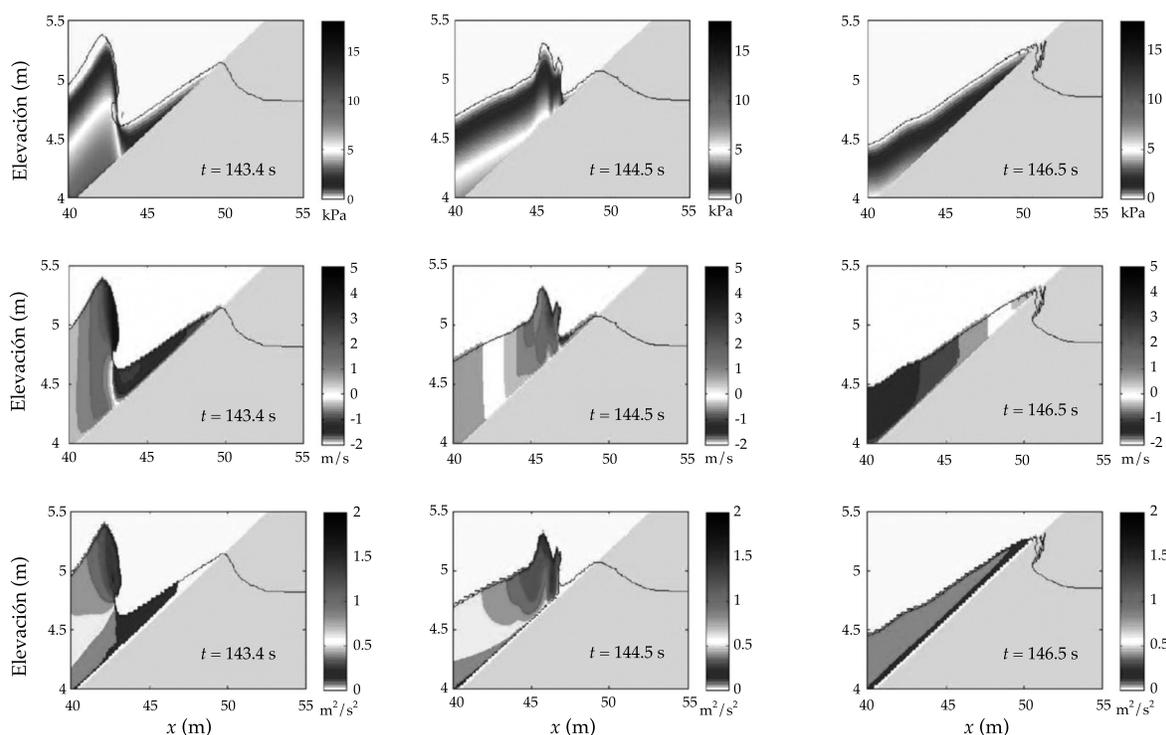


Figura 4. Simulación numérica con las RANS para tres instantes en el tiempo $t = 143.5, 144.5, 146.5$ s.

Paneles superiores – presión; paneles medios – velocidad horizontal (u);

paneles inferiores – energía cinética turbulenta (k).

Además de demostrar la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente el campo de velocidades (parámetro de segundo orden), los resultados demuestran la capacidad para resolver las diferentes escalas (onda-corta y onda-larga) del movimiento del fluido dentro de la zona de rompientes.

Casos de aplicación

En la sección anterior se contrastó el modelo numérico con mediciones de laboratorio en una playa de gravas y otra con fondo impermeable. La capacidad del modelo para cuantificar la superficie libre y el campo de velocidades da confianza en su aplicación en el estudio de otro tipo de procesos asociados con la rotura del oleaje en playas. En esta sección, el modelo numérico es aplicado para el estudio

de la transformación del oleaje en una playa de arena con pendiente suave, coronada por una duna en su parte superior. Los resultados numéricos en esta sección se presentan, a manera de ejemplo, con el objeto de proporcionar al lector una perspectiva completa sobre el tipo de problemas que se pueden abordar por medio de la aplicación de estos modelos. Por un lado se discute la complejidad del flujo generada por el *bore* y su viaje ascendente en la zona de lavado y, por otro, se presenta el rebase del oleaje sobre una duna en la parte superior de una playa de arena. Este último es de gran importancia en la determinación de zonas vulnerables a inundaciones debidas a un determinado clima marítimo.

La figura 6 muestra el dominio de cálculo seleccionado, junto con la discretización de la malla, que para este caso fue definida como

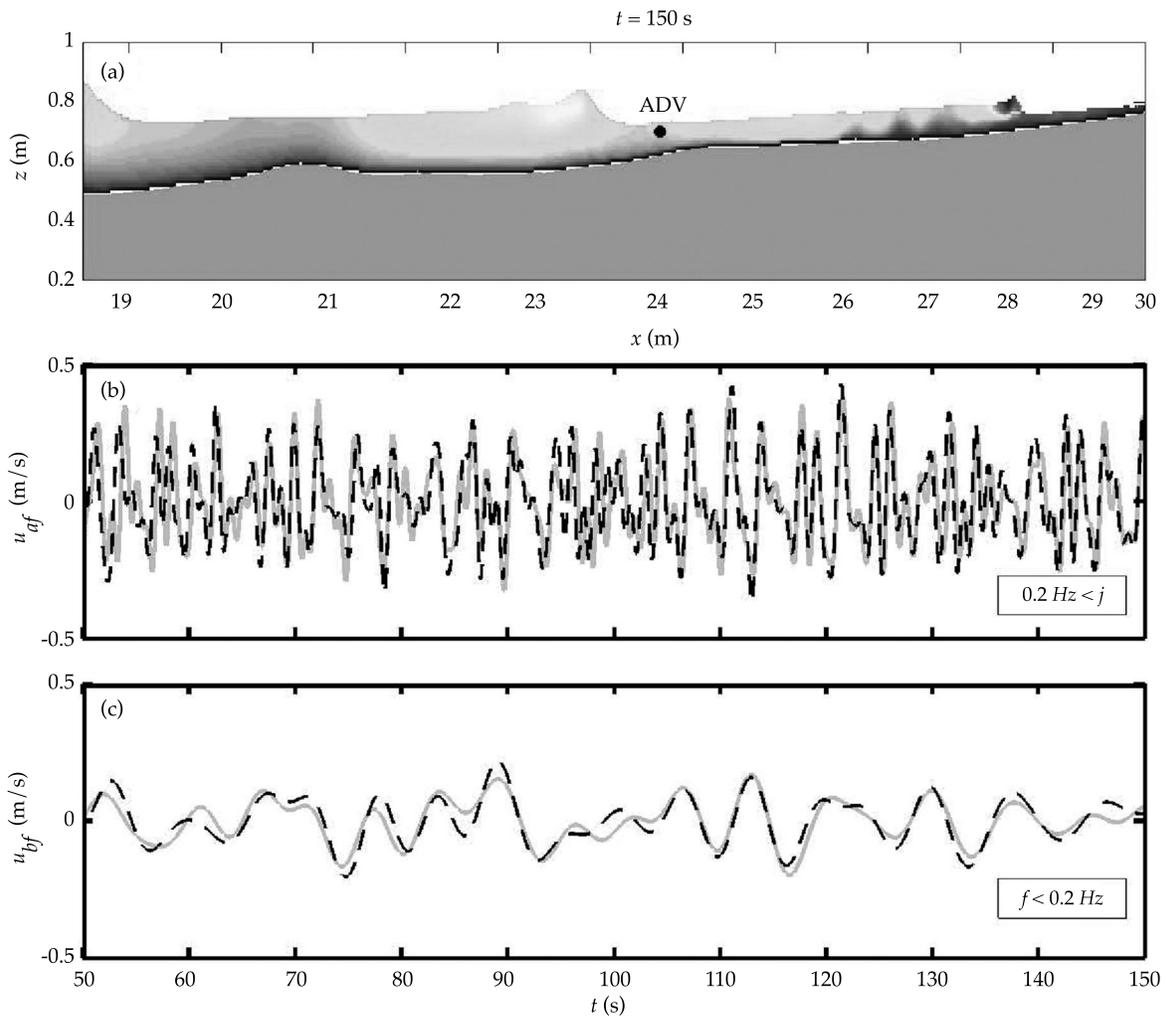


Figura 5. Simulación del caso 1C de los ensayos de Boers (1996); (a) localización del ADV utilizado para la medición de velocidades instantáneas en la columna de agua dentro de la ZR. Comparación de las series temporales de velocidad horizontal (modelo: línea discontinua; observaciones: línea continua) asociadas con oleaje de (a) onda corta ($f > 0.2$ Hz) y (b) onda larga ($f < 0.2$ Hz).

variable en ambas direcciones. La malla incrementa gradualmente su resolución hasta alcanzar una discretización de $\Delta x = \Delta y = 5$ mm en la zona de lavado. Esto permite obtener la variación vertical del flujo en esta zona. En este caso, la playa de arena es considerada como un elemento fijo impermeable y su geometría es definida utilizando el programa *Coral*.

El modelo numérico es forzado con un espectro JONSWAP con $H_s = 0.2$ m y $T_p = 2.4$ s.

La figura 7 presenta un ejemplo del nivel de detalle en la solución que se obtiene para este caso en el contorno tierra-agua. Se presentan tres instantes en el tiempo para una ola rompiendo en voluta sobre el perfil de la playa, donde la escala de grises indica la magnitud de la velocidad horizontal. El panel superior muestra la complejidad de la superficie libre en el momento del impacto de la rotura del oleaje. Tal y como se observa en este panel, las

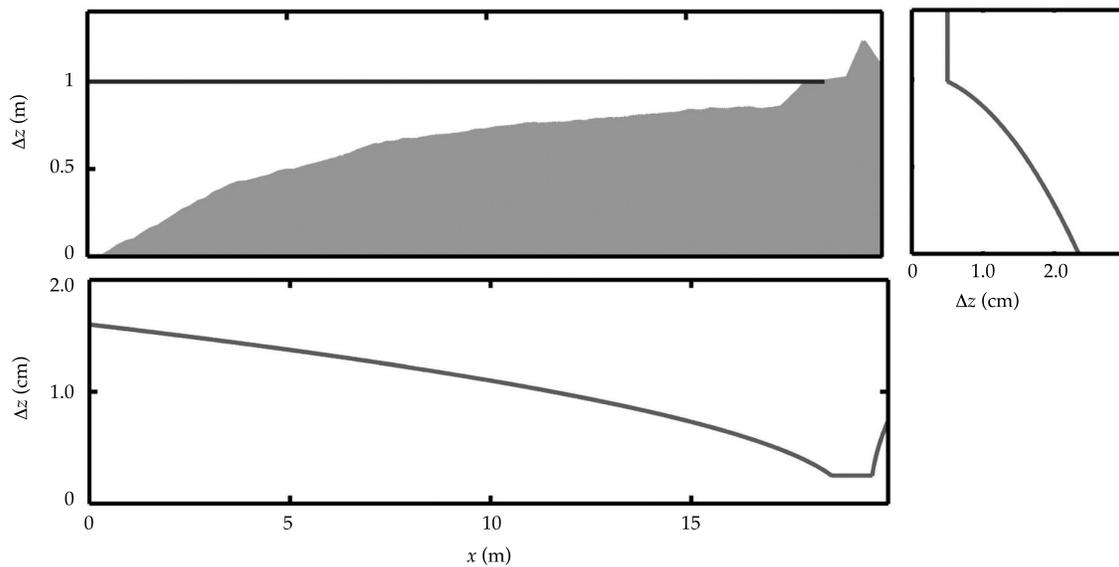


Figura 6. Dominio de cálculo y discretización de la malla.

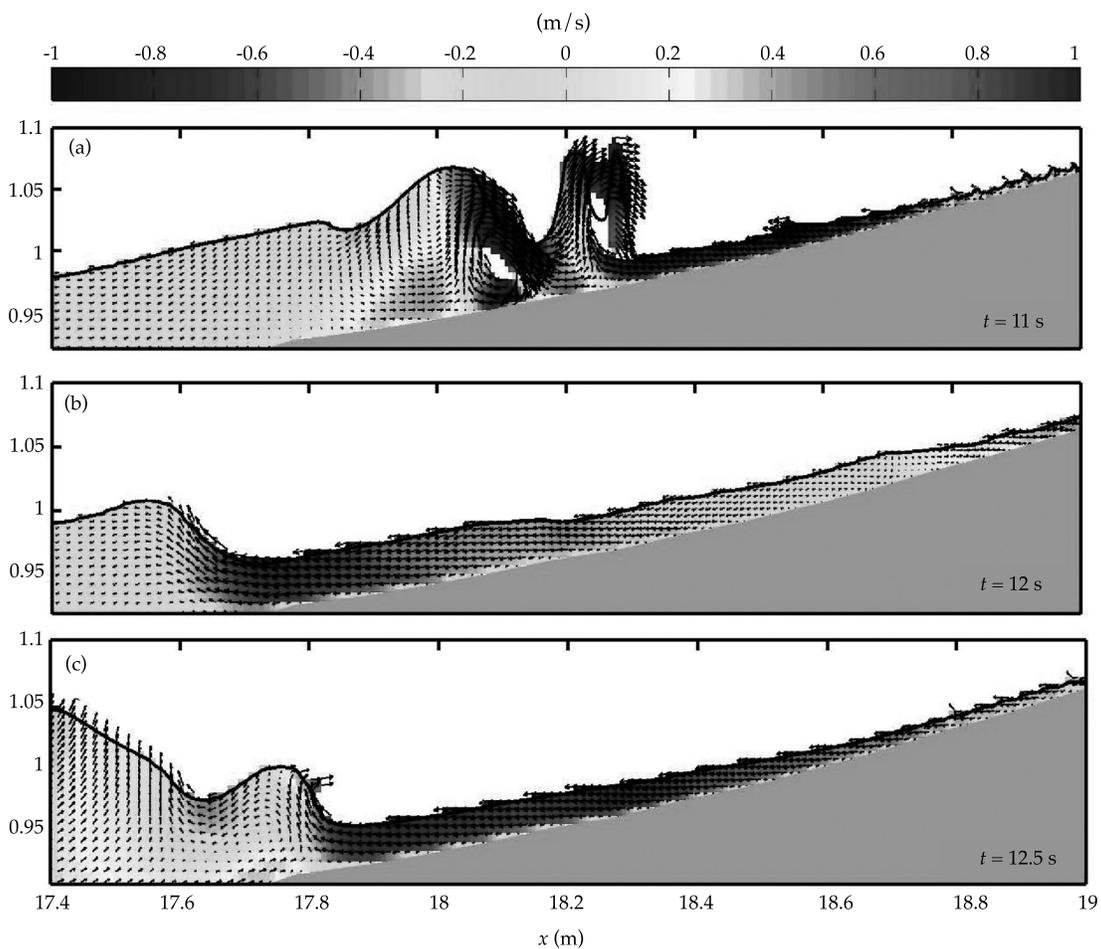


Figura 7. Transformación del oleaje en la zona de lavado; (a) rotura y ascenso, (b) divergencia del flujo y (c) descenso.

velocidades máximas se presentan en la zona donde el *bore* se colapsa, indicando que es allí donde se presentarán los mayores esfuerzos cortantes y, como consecuencia, el mayor transporte de sedimentos. Estas observaciones coinciden con los resultados presentados por Puleo *et al.* (2000), quienes a partir de mediciones en campo demostraron que durante la fase de ascenso del oleaje se presentan las mayores concentraciones de sedimento en suspensión.

Por otra parte, el panel medio de la misma figura 7b ilustra las características principales durante el inicio de la fase de descenso del oleaje. Es en este instante en el que se presenta la divergencia del flujo, es decir, se da un cambio de sentido de la velocidad de ascenso (valores +) a descenso (valores -), tal y como se observa en la coordenada $x = 18.75$ m. El panel inferior (c) muestra un instante posterior en el que se ilustra la compleja interacción entre el flujo en descenso con el siguiente *bore* incidente sobre la playa (coordenada $x = 17.8$ m). Asimismo, se observa un incremento en la capa límite conforme el flujo se acelera. Los resultados mostrados en esta figura coinciden con la discusión presentada por Brocchini y Baldock (2008), lo cual hace evidente la ventaja que ofrece el modelo para examinar a detalle la zona de lavado.

Por último, la figura 8 presenta un caso de aplicación que corresponde al del rebase del oleaje sobre la duna que corona la playa. Es evidente que la cantidad de agua que desborde la duna es directamente proporcional al potencial de inundación costera generada por el oleaje. Una vez más el evento se presenta dividido en tres instantes; en este caso, la escala de grises en la figura representa la intensidad de la energía cinética de la turbulencia generada, donde los tonos claros representan la mayor intensidad y el color negro indica la ausencia de turbulencia. El inicio del evento está ilustrado en el panel superior (a), donde se aprecia una zona de rompientes relativamente extensa, donde se observa la rotura en tipo descrestamiento, ambas características de eventos de tormenta. En este panel se pueden

observar dos puntos de rotura localizados en $x = 13.5$ m y $x = 18.5$ m. Posteriormente, la rotura del oleaje cerca de la costa da lugar a la fase de inundación presentada en el panel medio (b), donde se observa una porción de la masa de agua derramando sobre la duna. El fenómeno de rebase ha sido cuantificado, para el caso de rompeolas, con un modelo numérico similar al que aquí se ha presentado (Losada *et al.*, 2008). Finalmente, el panel inferior (c) representa el descenso del oleaje sobre la playa y el inicio de la rotura de la siguiente ola propagándose en el dominio de cálculo.

Los resultados numéricos revelan la capacidad del modelo para simular la rotura del oleaje, y el ascenso y descenso del oleaje en la cara de la playa.

Conclusiones

En virtud del cada vez más frecuente uso de modelos de alta resolución espacial y temporal basados en las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS), este artículo presentó dos casos de aplicación de tales ecuaciones para la transformación de oleaje irregular dentro de la zona de rompientes de dos playas con geometrías y, por lo tanto, tipos de rotura distintas.

Así, los resultados presentados ilustraron las ventajas que posee este tipo de modelos, por ejemplo, cuando se desea estudiar a detalle procesos del oleaje que son infranqueables con otras herramientas numéricas (por ejemplo, rotura y turbulencia). Los ejemplos descritos fueron seleccionados, a fin de ilustrar tanto el nivel de detalle en la descripción del flujo que se logra con este tipo de modelos como el rango amplio de aplicación. Para este propósito se eligieron dos playas con características morfológicas diferentes asociadas con distintos ambientes.

Los resultados mostrados en ambas playas confirman que los modelos basados en las ecuaciones RANS son una excelente herramienta para el estudio de procesos relacionados con la

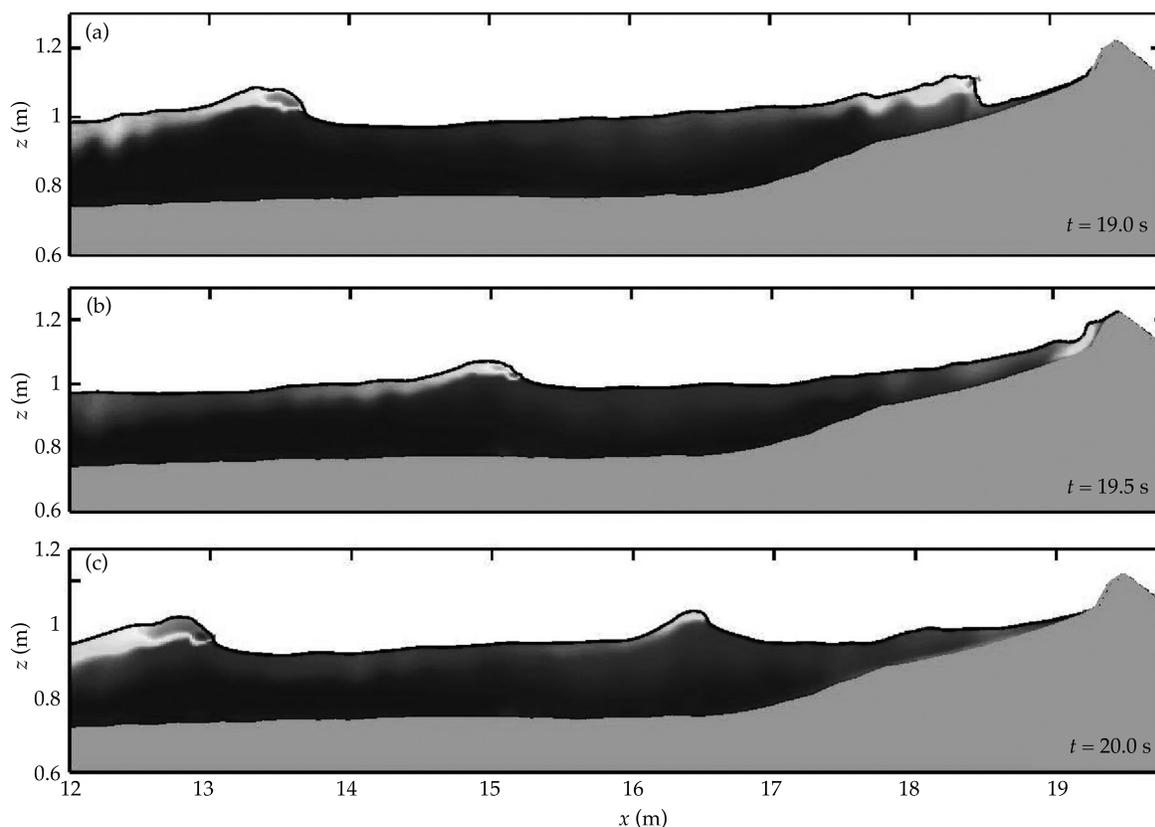


Figura 8. Evento de rebase de la cresta de la berma debido a la acción del oleaje: (a) rotura, (b) rebase y (c) descenso.

rotura, sobre todo en aquellas zonas de la playa donde el oleaje es altamente no lineal.

En particular, para el caso de la playa de grava, quedó demostrada la capacidad de esta herramienta para describir la transformación del oleaje desde aguas intermedias hasta la zona de rompientes. Esto se constató por medio de comparaciones de la superficie libre predicha con mediciones realizadas en laboratorio en distintas posiciones a lo largo del perfil de playa.

Más aún, resultados correspondientes a las presiones inducidas, velocidades horizontales y turbulencia generadas por una ola rompiendo en voluta sobre la playa de grava, pusieron de manifiesto la capacidad del modelo para reproducir la compleja estructura espacial y temporal del flujo. En consecuencia, quedó demostrado el potencial de estos modelos para

mejorar el entendimiento de fenómenos como la rotura en voluta, turbulencia y estructura vertical del flujo en la zona de lavado.

Para el caso de la playa con barras, se demostró la capacidad del modelo numérico para predecir las diferentes escalas del campo de velocidades dentro de la ZR. Finalmente se presentaron resultados numéricos de dos aplicaciones potenciales del modelo numérico: por una parte, se discutió la complejidad del flujo generada por el *bore* y su viaje ascendente en la zona de lavado; por otro lado, se presentó el evento de rebase o inundación producido por el rebase del oleaje sobre una duna, ubicada en la parte superior de una playa de arena. Para el caso de la propagación del *bore* en la zona de lavado, se encontró que los resultados numéricos presentados son consistentes con observaciones realizadas en campo (Puleo

et al., 2000), lo que confirmó una vez más la capacidad diagnóstica de esta herramienta. En la simulación correspondiente al rebase de la duna por el oleaje, los resultados numéricos revelaron la capacidad del modelo para simular procesos sumamente complejos de forma satisfactoria, lográndose reproducir de forma simultánea la rotura de tipo descrestamiento y la inundación producida por el oleaje.

A juicio de los autores, el gran valor de este tipo de modelos estriba en su capacidad diagnóstica, por lo que no será sorprendente que en el futuro próximo este tipo de herramientas se utilice para hacer estudios que revelen procesos que hasta el momento se encuentran escondidos debido a las limitaciones de instrumentación existente. Es evidente que la combinación de este tipo de herramientas con mediciones de campo y/o laboratorio tendrá un rol primordial en el desarrollo de la ingeniería de costas en los años por venir.

Agradecimientos

Adrián Pedrozo Acuña agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico y al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo recibido a través de los proyectos ININ106610 y A2. Alec Torres Freyermuth agradece el apoyo de Conacyt (proyectos M00230806106400 e I0007091116901) y del Instituto de Ingeniería de la UNAM (proyecto A1). También se agradece la introducción a este tipo de modelos por parte del profesor Iñigo Losada y el doctor Javier L. Lara de la Universidad de Cantabria.

Recibido: 17/03/09

Aprobado: 25/08/10

Referencias

- BRADFORD, S. Surf zone characterization for integration with remote sensing data. *Coastal Engineering*. Vol. 56, No. 5-6, doi: 10.1016/j.coastaleng.2008.12.006, 2009, pp. 591-598.
- BROCCHINI, M. and BALDOCK, T.E. Recent advances in modelling swash zone dynamics: Influence of Surf-Swash interaction on near shore hydrodynamics and morphodynamics. *Reviews of Geophysics*. Vol. 46, 2008.
- CHEN, Q., KIRBY, J.T., DALRYMPLE, R.A., SHI, F., and THORNTON, E.B. Boussinesq modelling of long shore currents. *J. Geophys. Res.* Vol. 108, C11, 3362, doi: 10.1029/2001JC001308, 2003.
- DALLY, W.R., DEAN, R.G., and DALRYMPLE, R.A. Wave height variation across beaches of arbitrary profile. *J. Geophys. Res.* Vol. 90, C6, 1985, pp. 11 917-11 927.
- DODD, N. A numerical model of wave run up, overtopping and regeneration. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.* Vol. 124, No. 2, 1998, pp. 73-81.
- ELGAR, S. and GUZA, R.T. Shoaling gravity waves: a comparison between data, linear finite depth theory and a nonlinear model. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 158, 1985, pp. 47-70.
- GÓMEZ-GESTEIRA, M. and DALRYMPLE, R.A. Analysis of single waves impact on coastal structures by means of a 3D SPH method. *Proc. Long Waves Symposium*. IAHR, Tessaloniki, 2003, pp. 1-10.
- GOTOH, H. and SAKAI, T. Key issues in the particle method for computational mechanics of wave breaking. *Coast. Eng.* Vol. 53, 2005, pp. 171-179.
- HIBBERD, S. and PEREGRINE, D.H. Surf and run up on a beach: a uniform bore. *J. Fluid Mechanics*. Vol. 95, No. 2, 1979, pp. 323-345.
- HUBBARD, M.E. and DODD, N. A 2D numerical model of wave run up, overtopping and inundation. *Coastal Engineering*. Vol. 47, 2002, pp. 1-26.
- KHAYYER, A., GOTOH, H., and SHAO, S.D. Corrected incompressible SPH method for accurate watersurface tracking in breaking waves. *Coastal Engineering*. Vol. 53, No. 9, 2008, pp. 723-735.
- KENNEDY, A.B., CHEN, Q., KIRBY, J.T., and DALRYMPLE, R.A. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and run up. I: 1D. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.* Vol. 126, No. 1, 2000, pp. 39-47.
- KOBAYASHI, N., DE SILVA, G.S., and WATSON, K.D. Wave transformation and swash oscillation on gentle and steep slopes. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 94, C1, 1989, pp. 951-966.
- KOBAYASHI, N., OTTA, A.K., and ROY, I. Wave reflection and run up on rough slopes. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. Vol. 113, No. 3, 1987, pp. 282-298.
- KOTHE, D.B. and MJOLNESS, R.C. RIPPLE: A New Model for Incompressible Flows with Free Surfaces. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos. *AIAA Journal*. Vol. 30, No. 11, 1992, pp. 2 694-2 700.
- KOSHIZUKA, S., NOBE, A., and OKA, Y. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semiimplicit method. *Int. J. Numer. Mech. Fluids*. Vol. 26, 1998, pp. 751-769.
- HSU, T.J. and LIU, P.L.F. Toward modeling turbulent suspension of sand in the near shore. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 109, C06018, 2004.

- HSU, T.J., SAKAKIYAMA, T., and LIU, P.L.F. A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. *Coastal Engineering*. Vol. 46, 2002, pp. 25-50.
- LARA, J.L., GARCÍA, N., and LOSADA, I.J. RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*. Vol. 53, No. 34, 2006a, pp. 395-417.
- LARA, J.L., LOSADA, I.J., and LIU, L.F. Breaking waves over a mild gravel slope: experimental and numerical analysis. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111, C11, C11019, 2006b.
- LARA, J., LOSADA, I., DEL JESUS, M., BARAJAS, G., and GUANCHE, R., IH-3VOF: A three-dimensional Navier-Stokes model for wave and structure interaction. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*, North America, 1, Jan. Available at: <http://journals.tdl.org/ICCE/article/view/1393>, 2010.
- LIN, P. and LIU, P.L.F. A numerical study of breaking waves. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 359, 1998a, pp. 239-264.
- LIN, P. and LIU, P.L.F. Turbulence transport, vorticity dynamics, and solute mixing under plunging waves in surf zones. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 103, No. 15, 1998b, pp. 15 677-15 694.
- LIN, P. and XU, W. NEWFLUME: a numerical water flume for two dimensional turbulent free surface flows. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 44, No. 1, 2006, pp. 79-83.
- LIU, P.L.F. Model equations for wave propagations from deep water to shallow water. *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Liu, P.L.F. (editor). Singapore: World Scientific, 1994, pp. 125-156.
- LÓPEZ DE SAN ROMÁN-BLANCO, B. *Dynamics of gravel and mixed, sand and gravel, beaches*. PhD Thesis. London: Imperial College, University of London, 2003.
- LÓPEZ DE SAN ROMÁN-BLANCO, B., COATES, T.T., HOLMES, P., CHADWICK, A.J., BRADBURY, A., BALDOCK, T.E., PEDROZO-ACUÑA, A., LAWRENCE, J., and GRÜNE, J. Large scale experiments on gravel and mixed beaches: Experimental procedure, data documentation and initial results. *Coastal Engineering*. Vol. 53, No. 4, 2006, pp. 349-362.
- LOSADA, I.J., LARA, J.L., GUANCHE, R., and GONZÁLEZ-ONDINA, J.M. Numerical analysis of wave overtopping of high mound breakwaters. *Coastal Eng.* Vol. 55, No. 1, 2008, pp. 47-62.
- LYNETT, P. Wave breaking velocity effects in depth integrated models. *Coastal Engineering*. Vol. 53, No. 4, 2006, pp. 325-333.
- MASSELINK, G., and PULEO, J.A. Swash zone morphodynamics, *Continental Shelf Research*. Vol. 26, 2006, pp. 661-680.
- PEDROZO-ACUÑA, A., SIMMONDS, D.J., OTTA, A.K., and CHADWICK, A.J. On the cross shore profile change of gravel beaches. *Coastal Engineering*. Vol. 53. No. 4, 2006, pp. 335-347.
- PEDROZO-ACUÑA, A., SIMMONDS, D.J., CHADWICK, A.J., and SILVA, R. A numerical empirical approach for evaluating morphodynamic processes on mixed and gravel beaches. *Marine Geology*. Vol. 241, No. 12, 2007, pp. 1-18.
- PEDROZO-ACUÑA, A., SIMMONDS, D.J. and REEVE, D.E. Wave impact characteristics of plunging breakers acting on gravel beaches. *Marine Geology*. Vol. 253. No. 12, 2008, pp. 26-35.
- PEDROZO-ACUÑA, A., TORRES-FREYERMUTH, A., ZOU, Q. HSU, T.J., and REEVE, D.E. Diagnostic investigation of impulsive pressures induced by plunging breakers impinging on gravel beaches. *Coastal Engineering*. Vol. 57, 2010, pp. 252-266.
- PEREGRINE, D.H. Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 27, 1967, pp. 815-827.
- PULEO, J.A., BEACH, R.A., HOLMAN, R.A., and ALLEN, J.S. Swash zone sediment suspension and transport and the importance of bore generated turbulence. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 105, 2000, pp. 17 021-17 044.
- PULEO, J.A., FARHADZADEH, A., and KOBAYASHI, N. Numerical simulation of swash zone fluid accelerations. *J. Geophys. Res.* Vol. 112, 2007, C07007.
- RAUBENHEIMER, B., GUZA, R.T., ELGAR, S., and KOBAYASHI, N. Swash on a gently sloping beach. *J. Geophys. Res.* Vol. 100, C5, 1995, pp. 8751-8760.
- RAUBENHEIMER, B., GUZA, R.T., and ELGAR, S. Wave transformation across the inner surf zone. *J. Geophys. Res.* Vol. 101, C10, 1996, pp. 25 589-25 597.
- RAUBENHEIMER, B. Observations and predictions of fluid velocities in the surf and swash zones, *J. Geophys. Res.* Vol. 107, 3190, doi: 10.1029/2001JC001264, 2002.
- SCHÄFFER, H.A., MADSEN, P.A., and DEIGAARD, R. A Boussinesq model for waves breaking in shallow water. *Coastal Engineering*. Vol. 20, 1993, pp. 185-202.
- SHAO, S.D., JI, C., GRAHAM, D.I., REEVE, D.E., JAMES, P.W., and CHADWICK, A.J. Simulation of wave overtopping by an incompressible SPH model. *Coastal Engineering*. Vol. 53, No. 9, 2006, pp. 723-735.
- SHAO, S.D. Incompressible SPH flow model for wave interactions with porous media. *Coastal Engineering*. Vol. 57, No. 3, 2010, pp. 304-316.
- SVENDSEN, I.A. *Introduction to Near-shore Hydrodynamics. Advanced Series on Ocean Engineering*. Vol. 24. Singapore: World Scientific, 2005.
- SVENDSEN, I.A., VEERAMONY, J., BAKUNIN, J., and KIRBY, J.T. The flow in weak turbulent hydraulic jumps. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 418, 2000, pp. 25-57.
- TORRES-FREYERMUTH, A. and HSU, T.J. On the dynamics of wave mud interaction: A numerical study. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 115, C07014, 2010.
- TORRES-FREYERMUTH, A., LARA, J.L., and LOSADA, I.J. Numerical modelling of short and long wave transformation on a barred beach. *Coastal Engineering*. Vol. 57, 2010, pp. 317-330.

TORRES-FREYERMUTH, A., LOSADA, I.J., and LARA, J.L. Modeling of surf zone processes on a natural beach using Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 112, C09014, 2007.

WEI, G., KIRBY, J.T., GRILLI, S.T., and SUBRAMANYA, R. A Fully nonlinear Boussinesq Model for Surface Waves. I. Highly nonlinear, unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 11, 1995, pp. 1-27.

Abstract

PEDROZO-ACUÑA, A. & TORRES-FREYERMUTH, A. *On the use of Reynolds averaged Navier-Stokes equations in the field of coastal engineering. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 2, April-June, 2011, pp. 51-67.*

This paper presents a review on the usefulness of nonlinear wave propagation models in coastal waters. More specifically, on the use of high resolution spatiotemporal resolution models, such as those based on the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) Equations. With this type of models it is possible to carry out detailed studies of the processes before and after wave breaking occurs. In order to demonstrate its potential, some examples of their application are carefully selected showing the level of detail achieved in the description of the flow with this approach. Their diagnostic role to dissect each of the variables involved in the wave breaking process (e.g. velocity, turbulence, pressure gradients), is highlighted. The results presented here confirm that these models are also an excellent tool for studying processes related to wave breaking and wave transformation in the swash zone. It is anticipated that in the years to come, the combination of this type of tool with field or laboratory data will have an important role in coastal engineering development.

Keywords: RANS, surf zone hydrodynamics, wave breaking, coastal engineering.

Dirección institucional de los autores

Dr. Adrián Pedrozo-Acuña

Investigador
Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio 5, 2° piso, cubículo 317
Ciudad Universitaria
Delegación Coyoacán
04510 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5623 3600, extensión 8637
apedrozoa@ii.unam.mx

Dr. Alec Torres-Freyermuth

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Ingeniería
Campus Sisal
Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación
97355 Hunucma, Sisal, Yucatán, MÉXICO
Teléfono: +52 (999) 9266 492
atorresf@ii.unam.mx