

## Capítulo 4. Análisis de resultados

### 4.1 Introducción

Con el propósito de evaluar el régimen hidrodinámico durante dos condiciones de rotura distintas (voluta y descrestamiento), el presente capítulo introduce la comparación de resultados numéricos con los datos experimentales publicados por Ting y Kirby (1994).

El modelo numérico se valida con las observaciones en el laboratorio recopiladas por Ting y Kirby (1994). En concreto se comparan a lo largo del canal de laboratorio, parámetros como, superficie libre, amplitud de ola y el nivel medio del agua. Una vez validado, el modelo numérico es utilizado como una herramienta diagnóstica a fin de evaluar a detalle cada uno de los procesos involucrados en la generación del gradiente de presión. Para ello, se utiliza la ecuación de Euler, definida por la siguiente ecuación:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + \nabla P = 0 \quad (\text{ecuación 4.1})$$

En la ecuación (4.1), el primer término define a la aceleración total en el fluido (local más convectiva) y el segundo determina al gradiente de presión. A diferencia de la ecuación general, la aproximación de Euler al gradiente de presión no incluye los efectos de turbulencia, ni gravedad. En este trabajo, se utiliza esta expresión a fin de determinar el comportamiento de cada uno de los términos de la aceleración total, en la generación de cierto gradiente de presiones. El propósito de este estudio consiste en observar y explicar el comportamiento del gradiente de presiones bajo dos condiciones de rotura distintas, a fin de poder identificar procesos asociados al transporte de sedimentos en playas.

## 4.2 Rotura tipo Voluta

### 4.2.1 Validación

La primera parte de este estudio, consiste en validar el modelo numérico para las condiciones de rotura seleccionadas. Para este propósito, se emplean las condiciones de oleaje definidas por Ting y Kirby (1994). Para la rotura en voluta, la altura y periodo de la ola seleccionada fueron de 0.128m y 5s, respectivamente. En particular, se escogió una ola cnoidal, la cual posee más asimetría vertical que una onda sinusoidal. La razón de esta selección, según Ting y Kirby (1994) consiste en que cerca de la costa las olas regulares cambian de forma para volverse más asimétricas.

La comparación de los resultados obtenidos por medio del modelo numérico se realizó en los puntos donde se colocaron sensores de nivel a lo largo del perfil de la playa impermeable. La Figura 4.1 presenta parte de estos resultados, en la que se comparan valores experimentales y numéricos de la envolvente máxima y mínima de la superficie libre, junto con el valor medio de cada serie de tiempo (setup). En todos los casos, es posible ver que el modelo reproduce las condiciones medidas en laboratorio. Especialmente, para la envolvente mínima y la sobre elevación del nivel medio o setup ( $\zeta_{min} - \bar{\zeta}$  y  $\bar{\zeta}$ ), se observa un buen ajuste de la herramienta numérica. Por otra parte, para la envolvente máxima de la superficie libre ( $\zeta_{máx} - \bar{\zeta}$ ), se observa un buen ajuste aunque con pequeñas diferencias respecto a este valor en el punto de rotura. El modelo numérico predice el punto de rotura en  $x=9.8$  m con un  $\zeta_{máx} - \bar{\zeta}$  de 14.1 cm, mientras que los datos de laboratorio definen al mismo punto  $x=9.8$  m, con un  $\zeta_{máx} - \bar{\zeta}$  de 16.03 cm. Sin embargo, estas diferencias son mínimas y se puede concluir que el modelo reproduce satisfactoriamente los parámetros analizados.

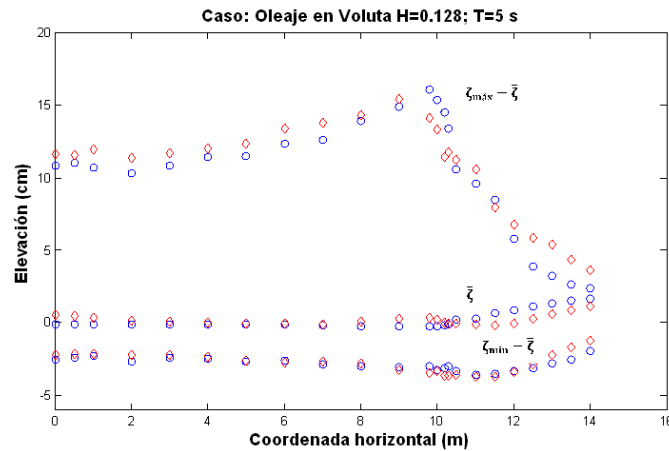


Figura 4.1 Comparación de envolvente máxima, media y mínima de la superficie libre para rotura tipo voluta; círculos azules - Ting y Kirby (1994); diamantes rojos - modelo numérico.

Además de estos parámetros, es posible comparar la variación temporal de la superficie libre en todos los sensores colocados por Ting y Kirby (1994). Por lo que se obtuvieron a través del modelo numérico, mediciones de superficie libre en estos puntos. Las Figuras 4.2 y 4.3 presentan un resumen de estas comparaciones. La primera de ellas, presenta los resultados obtenidos para los sensores del número 2 al número 12, mientras que la Figura 4.3 presenta los resultados para los sensores 13 al 22.

En ambas figuras, se aprecia que el modelo reproduce muy bien el desplazamiento de la superficie libre a lo largo del canal de oleaje en laboratorio. En los primeros sensores (Figura 4.2) se aprecia la forma cnoidal de la ola y se observa como ésta evoluciona y se peralta cerca del punto de rotura (sensor 12). Después de este punto, es posible identificar la disipación de energía ocasionada por la rotura, ya que se aprecia el decaimiento de la altura de ola, y la forma de la superficie libre similar a la de un remanso turbulento que se propaga en profundidades reducidas.

Estas comparaciones indican la capacidad del modelo numérico para reproducir las condiciones de oleaje en rotura tipo voluta, por lo que se abre la posibilidad de realizar un estudio más detallado de este régimen hidrodinámico. Además de las variables comparadas hasta ahora, el

modelo posee la capacidad de analizar la turbulencia, la presión y las componentes horizontal y vertical de la velocidad del fluido.

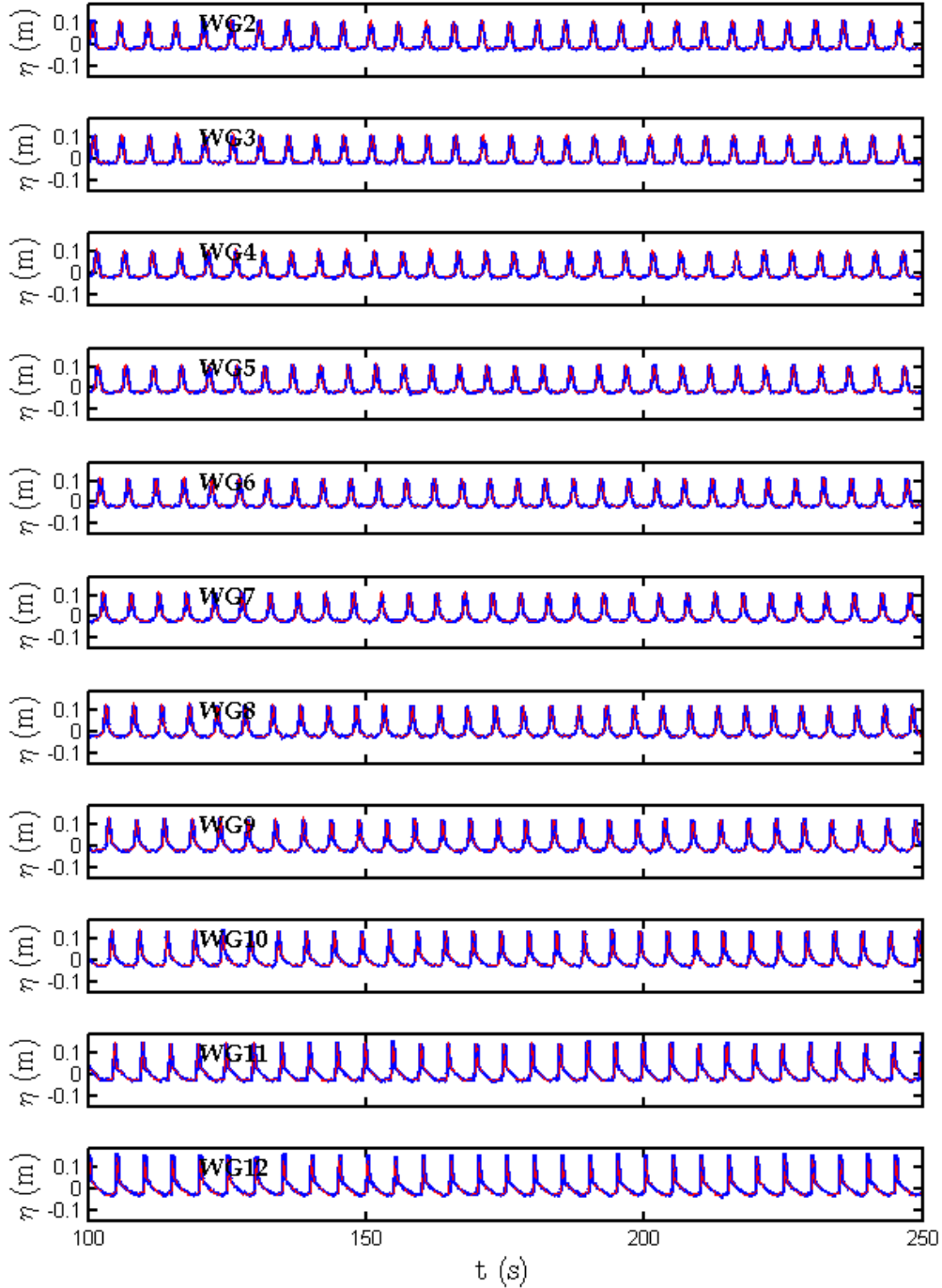


Figura 4.2 Perfil de la superficie libre en el intervalo de tiempo (100-250 seg), obtenido por los sensores 2 al 12; en rotura en tipo voluta. Datos de laboratorio en color azul y datos modelo en color rojo.

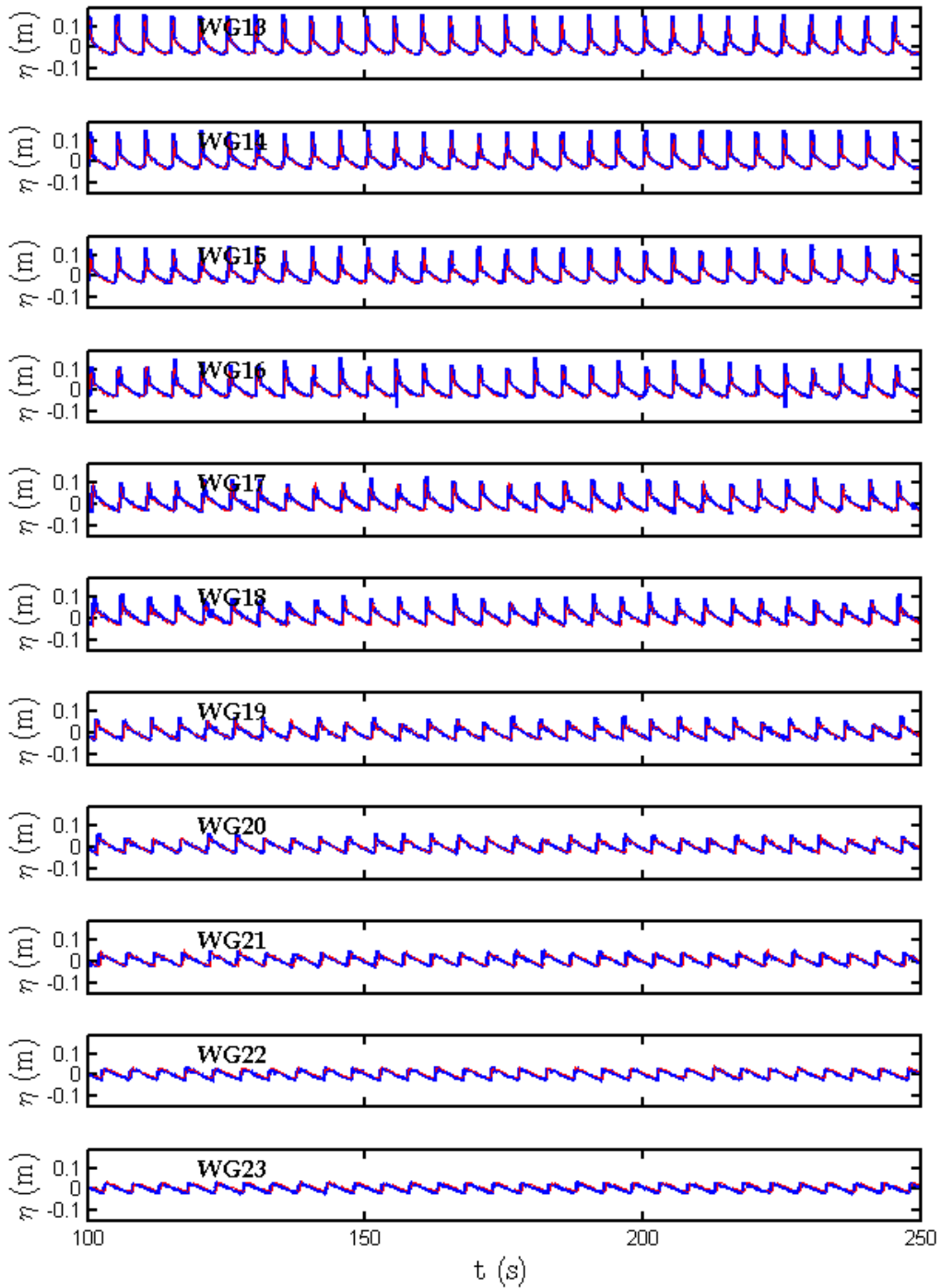


Figura 4.3 Perfil de la superficie libre en el intervalo de tiempo (100-250 seg), obtenido por los sensores 13 al 23; en rotura en tipo voluta. Datos de laboratorio en color azul y datos modelo color rojo.

Así entonces, con el propósito de observar la evolución espacio-temporal de estas variables, se utilizó la herramienta numérica para obtener instantes de turbulencia, velocidad horizontal  $u$ , velocidad vertical  $w$  y presión, durante la acción de una ola sobre la playa impermeable. En el caso de la rotura tipo voluta, el periodo de la ola es de 5 segundos por lo que se obtuvieron seis instantes durante este intervalo de tiempo.

La Figura 4.4 ilustra los seis instantes seleccionados para valores de la energía cinética de la turbulencia adimensional ( $k$ ). En estas imágenes, el color blanco indica ausencia de turbulencia y los colores cálidos indican una mayor intensidad. La historia del ascenso de la ola comienza en el panel superior izquierdo, en el que se aprecia la ola muy peraltada ( $t=110s$ , a punto de romper) con bajos niveles de turbulencia en general. Hacia el panel superior derecho ( $t=111 s$ ), se observa la ola impactando sobre la superficie de agua formando lo que se conoce como un remanso turbulento o bore, identificado en esta imagen por los colores intensos asociados a altos niveles de energía cinética turbulenta. La evolución de este remanso turbulento se ilustra en los paneles medios (izquierdo  $t=112 s$  y derecho  $t=113 s$ ), en los que se aprecia la distribución de la energía cinética de la turbulencia en la columna de agua y el ascenso de este bore sobre la pendiente de la playa. Por su parte, los paneles inferiores presentan la parte final de la disipación de la energía de la ola, ilustrada por la disminución de la intensidad de la energía cinética de la turbulencia sobre la playa.

En estos paneles es posible observar que la energía cinética de la turbulencia es transportada hacia la costa. Una observación que coincide con lo reportado por Ting y Kirby (1994). El hecho de que el modelo reproduzca un transporte de la turbulencia hacia la costa, confirma su capacidad para reproducir la influencia de transporte hacia la costa, el cual ha estado asociado a las olas rompiendo en voluta sobre las costas.

Por otra parte, se aprecia que la generación de la mayor intensidad de la turbulencia se presenta al momento de la rotura, y esta disminuye conforme la ola se aproxima a la costa. Lo cual es lógico desde el punto de vista físico del proceso.

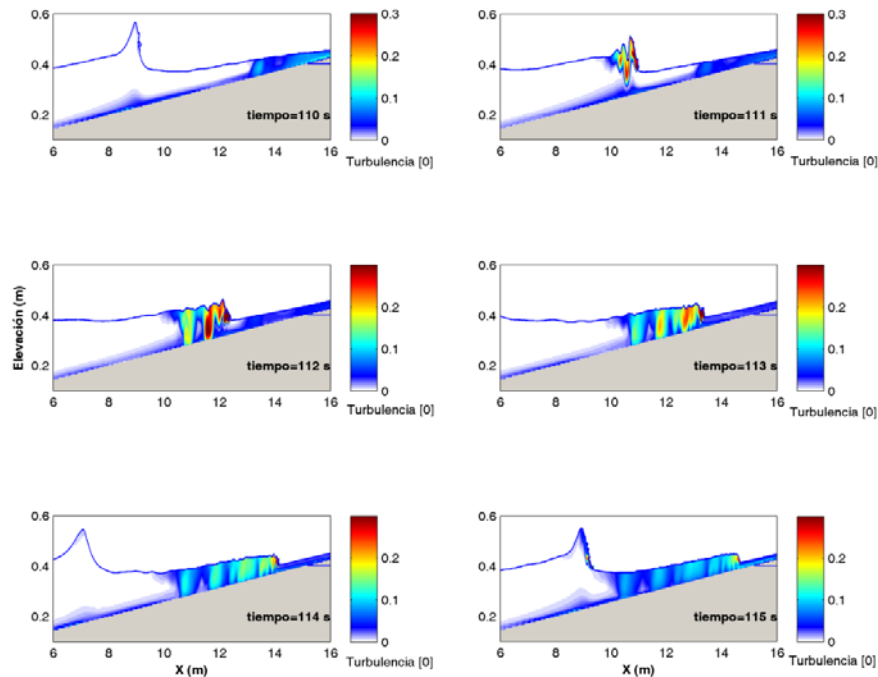


Figura 4.4 Campo de turbulencia obtenida por el modelo COBRAS en rotura en voluta, la escala de color representa la intensidad de turbulencia adimensional.

En la figura 4.5 se presentan los mismos instantes espacio-temporales que en la Figura 4.4 pero en este caso se grafica la variación de la velocidad horizontal  $u$ , durante la rotura de la ola sobre el perfil de la playa.

La estructura espacial que se revela en estas imágenes es muy interesante, en los paneles superiores, al inicio de la rotura de la ola, se observa una distribución uniforme de la velocidad horizontal en la columna de agua. Las velocidades hacia la costa (positivas) están asociadas a la cresta de la ola en ascenso, la cual está limitada a una región angosta en comparación con la región de velocidad hacia el mar (negativa), que está distribuida en una mayor área. Además, se observa que la velocidad horizontal  $u$ , toma valores máximos cerca de la superficie libre en el punto de rotura (paneles medios), con lo que se aprecia cierta estructura vertical en el perfil de velocidades (similar al modelo propuesto por Svendsen, 1984).

Cerca de la costa, en las coordenadas horizontales  $x > 12\text{m}$ , los paneles medios e inferiores presentan una estructura vertical del perfil de velocidades completamente uniforme, lo cual está

en concordancia con observaciones realizadas por diversos investigadores en la zona de lavado (Pedrozo-Acuña, 2005).

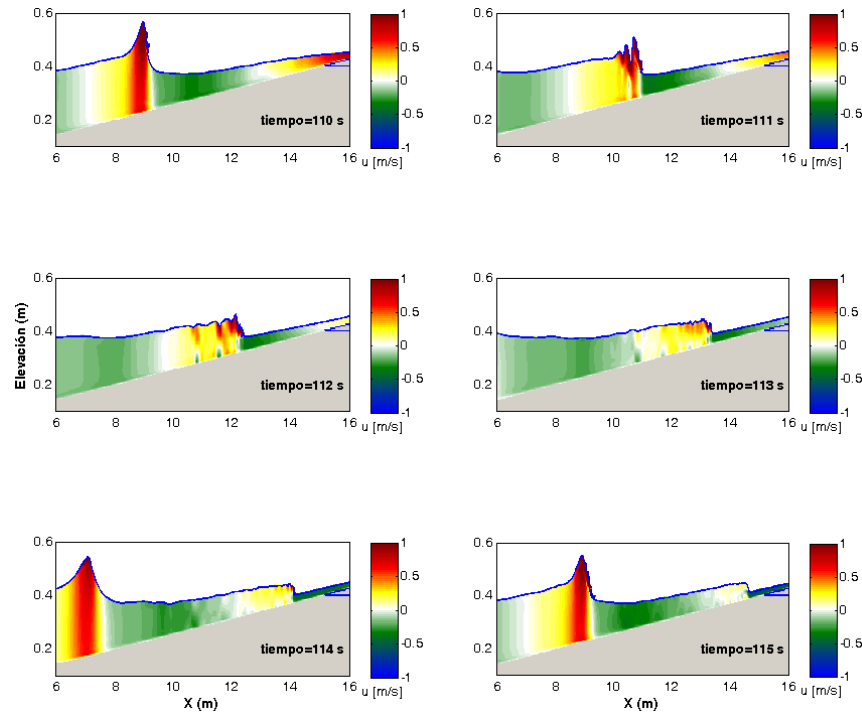


Figura 4.5 Campo de velocidad  $u$  obtenida por el modelo COBRAS en rotura en voluta, la escala de color representa la magnitud de velocidad  $u$ .

La figura 4.6 presenta, para los mismos seis instantes la variación espacio-temporal de la velocidad vertical  $w$ . En este caso, los paneles superiores de la Figura ( $t=110$  s y  $t=111$  s), indican que la velocidad vertical  $w$  tiene una influencia concentrada en la región de la cresta de la ola. Mientras que cerca del fondo, esta componente tiene valores pequeños, por lo que se espera una reducción en la contribución a procesos de transporte. Esta observación se confirma en los paneles medios, en los que se aprecian magnitudes muy pequeñas para todo el campo de velocidades verticales.



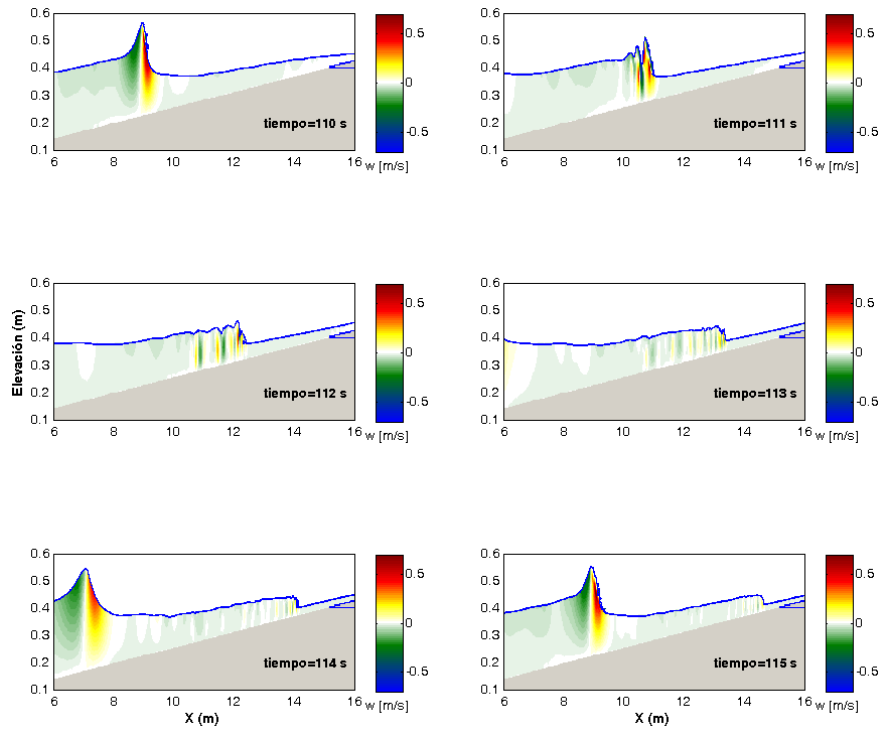


Figura 4.6 Campo de velocidad  $w$  obtenida por el modelo COBRAS en rotura en voluta, la escala de color representa la magnitud de velocidad  $w$

Por último, la figura 4.7 presenta los instantes asociados con los valores espacio-temporales de la presión inducida por esta condición de rotura. Al comienzo de la ola, se observa una distribución uniforme de la presión. Tomando valores máximos cerca del fondo, mientras que cerca de la superficie libre los valores son pequeños.

Por otra parte, se aprecia que la presión disminuye al momento de la rotura y conforme la ola se aproxima a la costa, esta disminuye. Esta observación se confirma en los paneles medios, en donde la magnitud de la presión disminuye en la escala de colores cálidos. Lo cual es lógico debido al proceso físico de la presión, a mayor columna de agua mayor presión y a menor columna de agua menor presión, lo cual sucede en las cercanías de la costa. Por otra parte, se aprecian ciertos valores pico en la presión durante la propagación del remanso turbulento sobre la playa (ver panel  $t=111s$ ), estos resultados indican la posible presencia de presiones impulsivas

que han sido reportadas para este tipo de rotura como consecuencia de los violentos impactos de la ola sobre la playa (Pedrozo-Acuña et al. 2008).

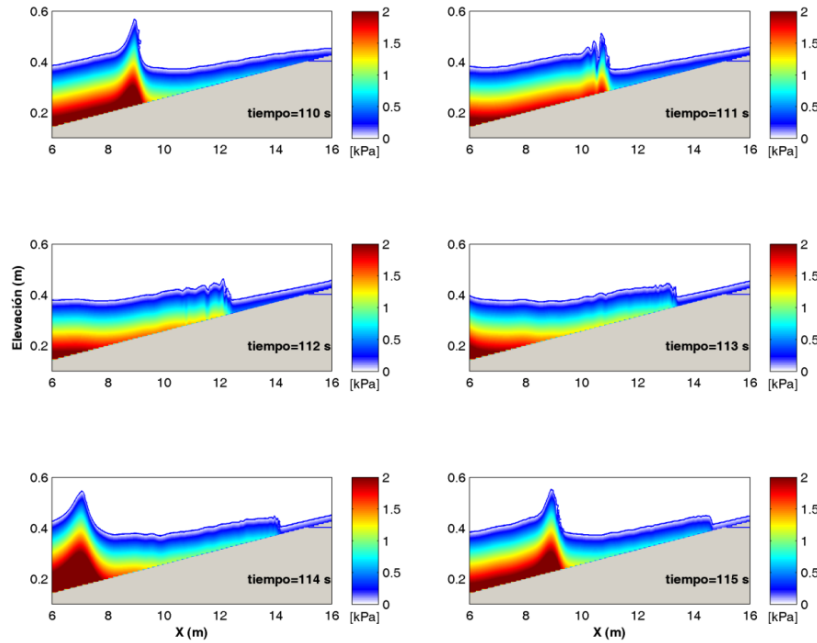


Figura 4.7 Campo de presiones obtenidas por el modelo COBRAS en rotura en voluta, la escala de color representa la magnitud de presión.

#### 4.2.2 Términos de la ecuación de Euler

Esta sección presenta un estudio detallado de los términos de la ecuación de Euler (ecuación 4.2). La cual se realiza por medio de los resultados obtenidos a través del modelo numérico. El modelo, basado en las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes describe al gradiente de presiones de acuerdo con la ecuación 4.3, la cual se diferencia de la hipótesis de Euler en que incluye los términos asociados a la turbulencia y la acción de la gravedad.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P \quad (\text{ecuación 4.2})$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\overline{\delta(u'_i u'_j)}}{\delta x_j} \quad (\text{ecuación 4.3})$$

Este estudio, utiliza la ecuación de Euler para el gradiente de presión a fin de identificar de forma más precisa, la contribución de cada uno de los términos asociados a la aceleración total. Para analizar de forma más precisa la variación de estos términos, se estudio su evolución temporal en tres posiciones diferentes sobre el perfil de la playa. La selección de estos puntos se presenta en la Figura 4.8, donde se aprecia que se seleccionaron un punto antes de la rotura, otro después de la rotura y uno más en la zona de lavado cerca de la línea de costa. El análisis de estos términos se realizó para celdas del modelo numérico cerca del fondo en el entendido de que es en esta región del fluido donde se presenta el forzamiento que induce el transporte de sedimentos en playas.

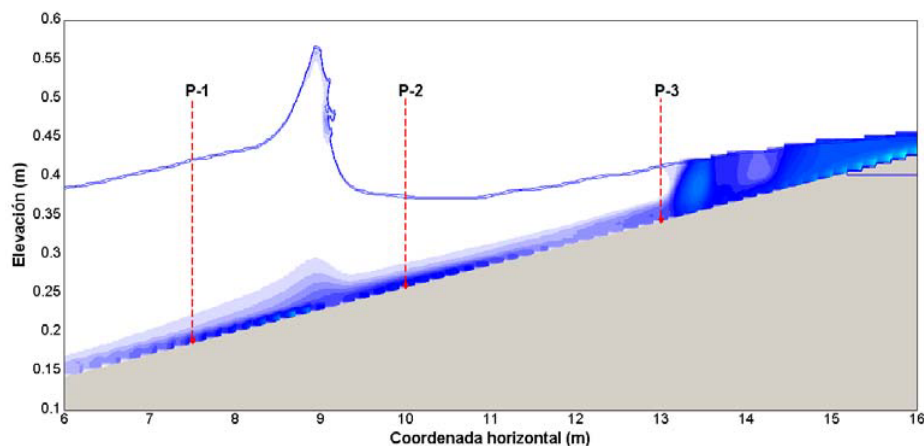


Figura 4.8 Ubicación de los puntos de comparación para los términos de la ecuación de Euler, para rotura en voluta.

En cada una de estas ubicaciones, se realizaron gráficas de todos los términos de la aceleración total, además de la sumatoria de los tres términos de aceleración a fin de compararla con la magnitud del gradiente de presión calculado. Estas gráficas se realizaron a fin de caracterizar la variación de cada uno de estos términos para una rotura tipo voluta.

Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 4.9. Los paneles superiores ilustran la variación del gradiente de presión horizontal (línea sólida) y su comparación con la sumatoria de los tres términos de aceleración total en la horizontal (línea punteada). Se entiende que la aceleración total tiene una buena aproximación al gradiente de presión horizontal, por lo cual la Ecuación de Euler podría ser válida. Sin embargo, en los paneles superiores se puede observar

una pequeña variación en la línea que describe la sumatoria de los tres términos de la aceleración total en la horizontal, por lo que se sugiere que existe una pequeña contribución de la turbulencia y las tensiones tangenciales. De hecho, las mayores desviaciones se aprecian en aquellos instantes en los que pasa la cresta de la ola sobre el punto de análisis.

Por otra parte, los paneles medios superiores presentan para los tres puntos seleccionados, resultados del término de aceleración local (línea punteada,  $du/dt$ ) junto con el resultado obtenido para el gradiente de presión horizontal en los mismos puntos. En todas estas figuras se observa un muy buen ajuste del gradiente de presión horizontal con el término de aceleración local. Este resultado está en sintonía con las observaciones realizadas por Hoefel y Elgar (2003), quienes propusieron a la aceleración local como sustituto de la influencia del gradiente de presiones en el transporte de sedimentos. Los paneles medios inferiores e inferiores, presentan resultados de los términos de advección horizontal ( $u du/dx$ ) y vertical ( $w du/dz$ ), respectivamente.

Respecto al término de aceleración advectiva horizontal, el panel medio inferior ilustra aportaciones relativamente pequeñas en los tres puntos de análisis. Sin embargo, algo interesante es la variación espacial de este término, debido a que su contribución cambia de sentido dependiendo del punto de análisis. Así, para el caso de la ola a punto de romper su contribución es hacia dentro de la costa y después de la rotura cambia de dirección con sentido hacia fuera de la costa. Por lo cual, refleja su relativa importancia en el balance de procesos de transporte de sedimentos. Por lo que respecta al término de advección vertical, ilustrado en los paneles inferiores, se observa que la contribución de este término es despreciable por lo que para el caso de análisis su contribución podría ser ignorada. Esta observación está en línea con lo propuesto por Foster et al. (2006) quienes sugirieron una parametrización del transporte de sedimentos en función de la suma de la aceleración local y el término de advección horizontal ( $du/dt + u du/dx$ ).

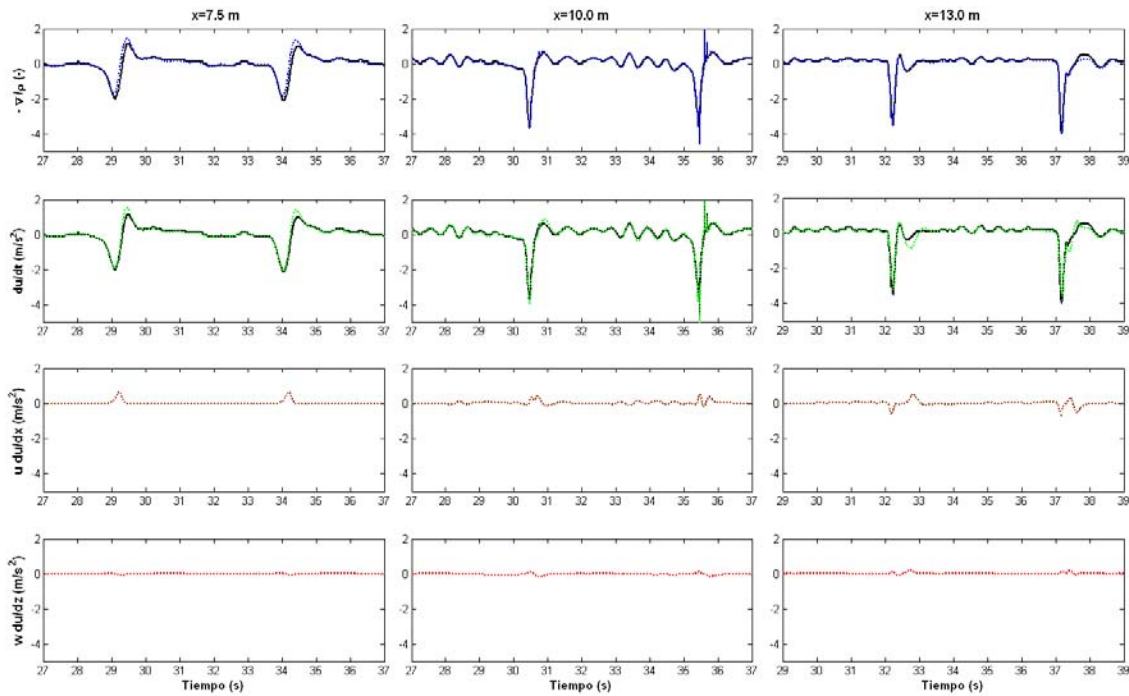


Figura 4.9 Gráficas de los términos de la ecuación de Euler para P-1 ( $x=7.5$  m), P-2 ( $x=10.0$  m) y P-3 ( $x=13.0$  m); para rotura de tipo voluta

### 4.3 Rotura tipo descrestamiento

#### 4.3.1 Validación

En esta sección se valida el modelo numérico con las condiciones de oleaje definidas por Ting y Kirby (1994), para rotura en descrestamiento. La altura de ola y periodo de la ola seleccionada fueron de 0.125 m y 2 s, respectivamente. Del mismo modo, que para voluta, se eligió una ola cnoidal.

Los resultados obtenidos por medio del modelo numérico se compararon en los puntos donde se localizaban los sensores del nivel a lo largo del perfil de la playa impermeable (Ting y Kirby, 1994). La Figura 4.10 muestra parte de los resultados obtenidos, en la que se comparan los valores experimentales y numéricos de la envolvente máxima y mínima de la superficie libre, junto con el valor medio de cada serie (setup). En todos los casos, se observa que el modelo

reproduce las condiciones medidas en laboratorio. Para la envolvente mínima y la sobre elevación del nivel medio (setup) ( $\zeta_{min} - \bar{\zeta}$  y  $\bar{\zeta}$ ), se observa un buen ajuste de la herramienta numérica, con pequeñas variaciones especialmente después del punto de rotura. Por otra parte, para la envolvente máxima de la superficie libre ( $\zeta_{m\acute{a}x} - \bar{\zeta}$ ), el ajuste es muy parecido, sin embargo se presenta un pequeño desplazamiento de las elevaciones en el modelo. El modelo numérico predice el punto de rotura en  $x=7.9$  m con un  $\zeta_{m\acute{a}x} - \bar{\zeta}$  de 14.5 cm, mientras que los datos del laboratorio para el mismo punto son  $x=7.9$  m con un  $\zeta_{m\acute{a}x} - \bar{\zeta}$  de 13.5 cm. Por lo tanto, se puede concluir que los datos reproducidos por el modelo son satisfactorios, debido a que las diferencias son mínimas.

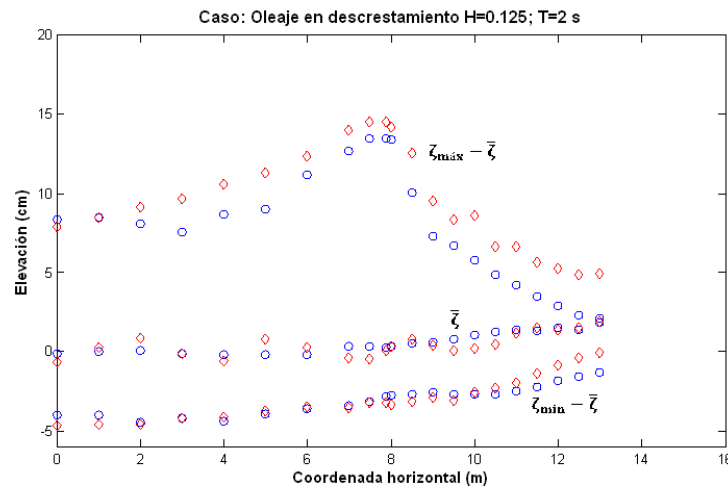


Figura 4.10 Comparación de envolvente máxima, media y mínima de la superficie libre para rotura tipo descrestamiento; círculos azules - Ting y Kirby (1994); diamantes rojos - modelo numérico.

Para este tipo de rotura, también es posible comparar la variación temporal de la superficie libre en todos los sensores colocados por Ting y Kirby (1994). Las mediciones de superficie libre en dichos puntos, se obtuvieron a través del modelo numérico. Un resumen de estas comparaciones se presenta en las Figuras 4.11 y 4.12. La primera, muestra los resultados obtenidos para los sensores del número 2 al número 12, mientras que la Figura 4.12 muestra los resultados para los sensores del 12 al 21.

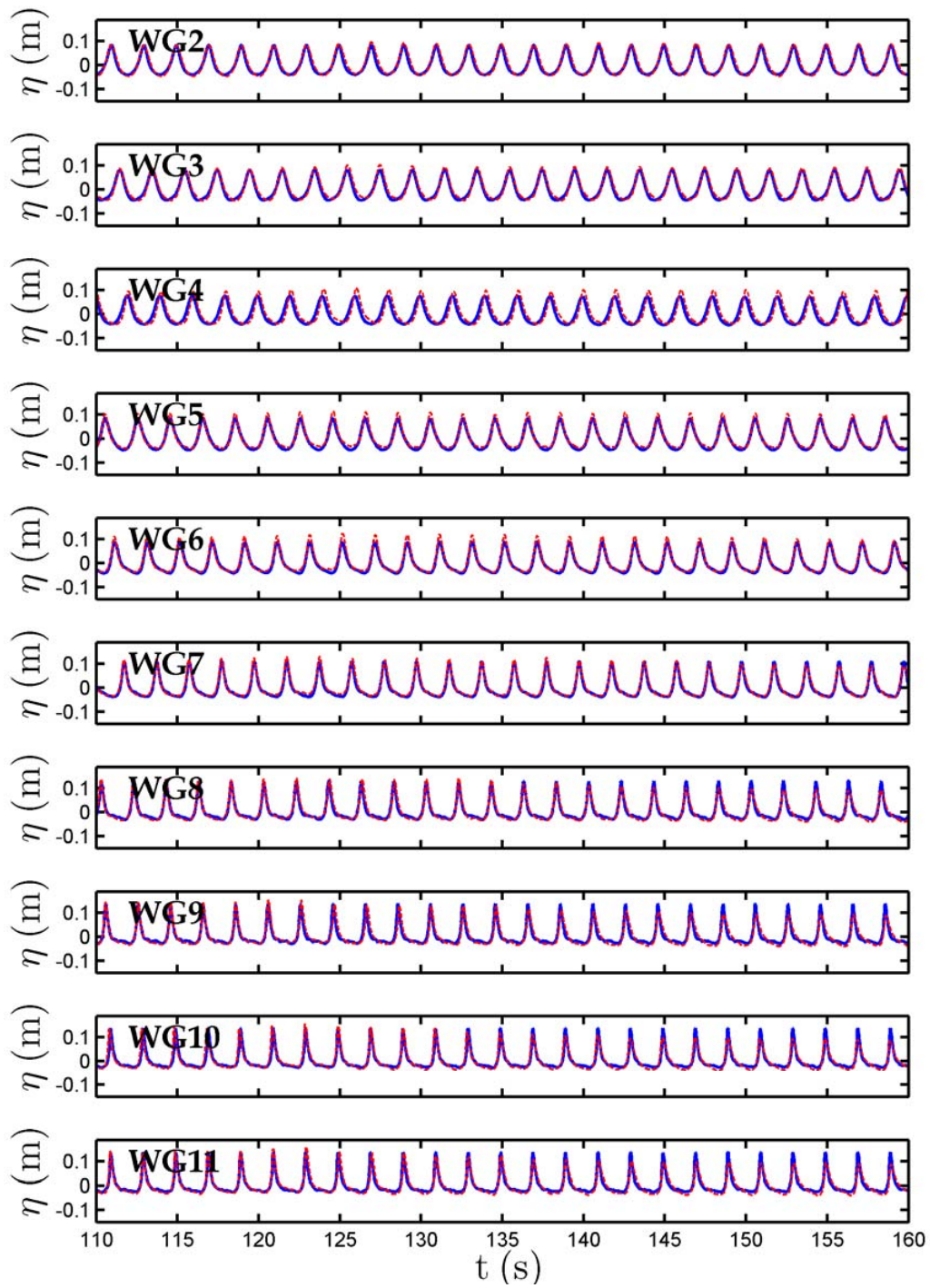


Figura 4.11 Perfil de la superficie libre en el intervalo de tiempo (110-160 seg), obtenido por los sensores 2 al 11; en rotura en tipo descrestamiento. Datos de laboratorio en color azul y datos modelo color rojo.



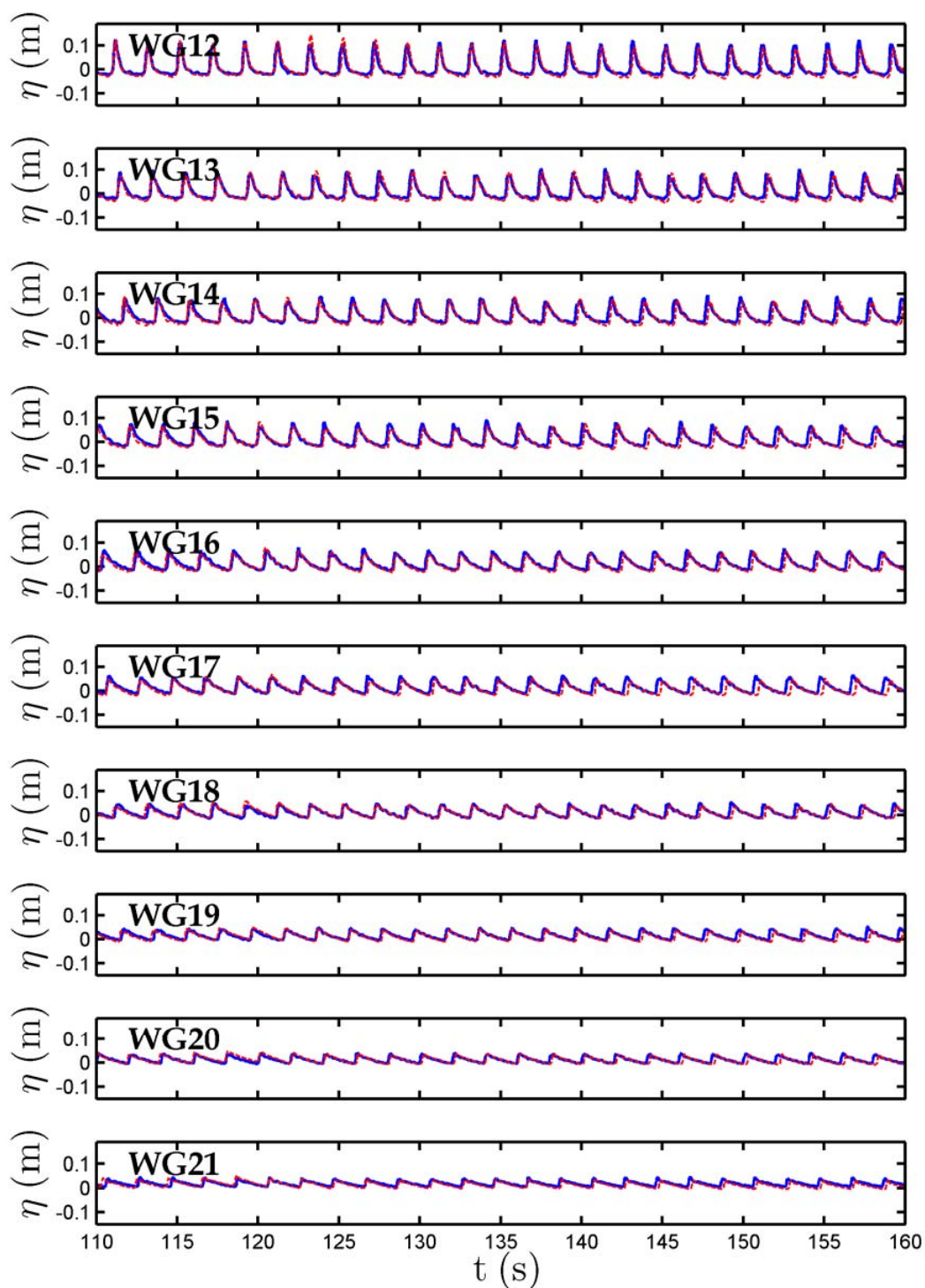


Figura 4.12 Perfil de la superficie libre en el intervalo de tiempo (110-160 seg), obtenido por los sensores 12 al 21; en rotura en tipo descrestamiento. Datos de laboratorio en color azul y datos modelo color rojo.



Ambas figuras, reproducen el desplazamiento de la superficie libre a lo largo del canal de oleaje observado en el laboratorio. En la primera figura (Figura 4.11) se aprecia la forma cnoidal de la ola y se observa como ésta evoluciona y se peralta cerca del punto de rotura (sensor 9). Después de este punto, se observa el decaimiento de la altura de ola, y la forma de la superficie libre similar a la de un remanso turbulento que se propaga en profundidades reducidas.

Además de estas variables, tal como en el caso de la rotura en tipo voluta, se obtuvieron instantes de turbulencia, velocidad horizontal  $u$ , velocidad vertical  $w$  y presión, durante la acción de una ola sobre la playa impermeable, se analizó la evolución espacio-temporal de dichas variables. En este caso, el periodo de la ola es de 2 segundos por lo que los intervalos de tiempo para estos instantes fueron cada 0.4 segundos, obteniendo de igual manera seis imágenes.

La Figura 4.13 ilustra los seis instantes seleccionados para valores de la energía cinética de la turbulencia adimensional ( $k$ ). La ola comienza el ascenso en el panel superior izquierdo ( $t=140.4s$ ) con un nivel de turbulencia medio, la cual llega cerca del fondo. Hacia el panel superior derecho la ola se peralta ( $t=140.8s$ ), la intensidad de la turbulencia aumenta bajo la cresta de la ola, en ella se aprecia una difusión de la turbulencia a lo largo de la columna de agua y hasta el fondo de la playa. En los paneles medios, se observa como la ola avanza hacia delante, con una gran intensidad en la cresta, sin embargo en el panel correspondiente a  $t=141.6$ , se observa que ha habido una disipación considerable de la turbulencia, en especial para la primera ola rota. Mientras que en los paneles inferiores, es posible apreciar que para esta ola la turbulencia es mínima, lo que indica el decaimiento en la intensidad del proceso. Por otra parte, la mayor parte de colores intensos se debe a olas rompiendo cerca del punto de rotura.

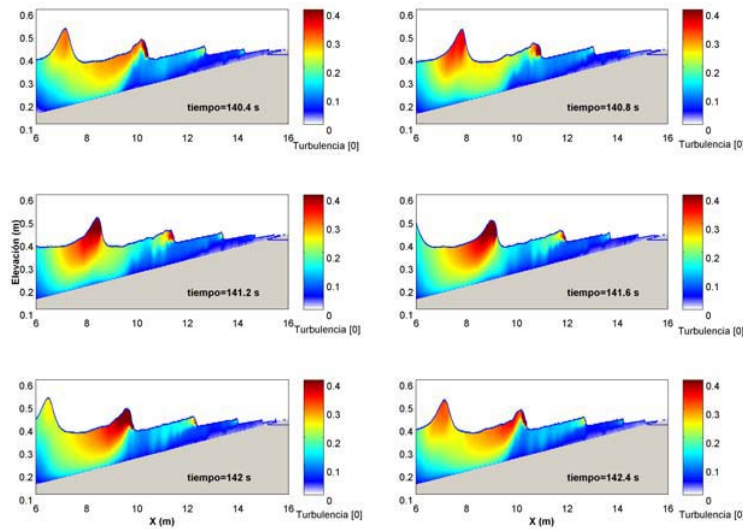


Figura 4.13 Campo de turbulencia obtenida por el modelo COBRAS en rotura en descrestamiento, la escala de color representa la intensidad de turbulencia adimensional.

En general, se puede observar que la energía cinética de la turbulencia viaja en la parte trasera de la cresta. En este tipo de rotura, la generación de la mayor intensidad de la turbulencia se presenta al momento del peraltamiento de la ola, bajo la cresta, y esta se va quedando atrás y va disminuyendo, conforme la ola se acerca a la costa.

En la figura 4.14 se presentan los mismos instantes espacio-temporales que en la figura anterior pero en este caso se grafica la variación de la velocidad horizontal  $u$ , durante la rotura de la ola sobre el perfil de la playa.

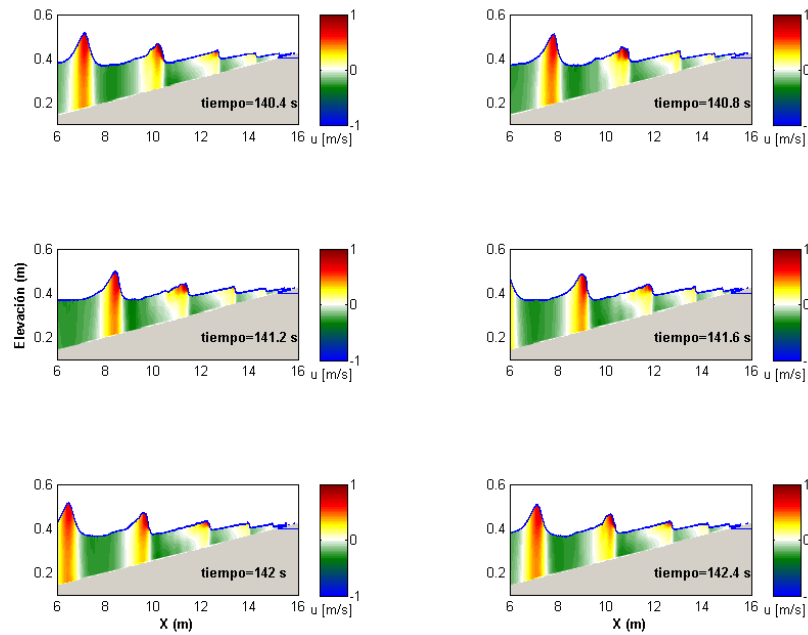


Figura 4.14 Campo de velocidades horizontales  $u$ , obtenida por el modelo COBRAS en rotura en descrestamiento, la escala de color representa la magnitud de velocidad horizontal.

En los paneles superiores, al inicio del ascenso de la ola, se observa una distribución uniforme de la velocidad horizontal  $u$  en la columna de agua. Las velocidades hacia la costa (positivas) están asociadas a la cresta de la ola en ascenso, la cual está limitada a una región angosta en comparación con la región de velocidad hacia el mar (negativa), que está distribuida en una mayor área. Esta predominancia espacial de los valores negativos para la velocidad horizontal, indican la generación de la corriente de resaca bajo estas condiciones de rotura. Además, es posible notar que debajo de la cresta de la ola las velocidades horizontales son máximas (hacia la costa), tal y como lo propone el modelo de la rotura de Svendsen (1984).

La figura 4.15 presenta, para los mismos instantes la variación espacio-temporal de la velocidad vertical  $w$ . Se puede observar, que la velocidad vertical tiene una influencia concentrada en la región de la cresta de la ola. Mientras que en la región del valle, así como en el fondo tienden a ser valores muy pequeños; por lo cual es posible asumir que no contribuye de manera significativa a los procesos de transporte de sedimentos.

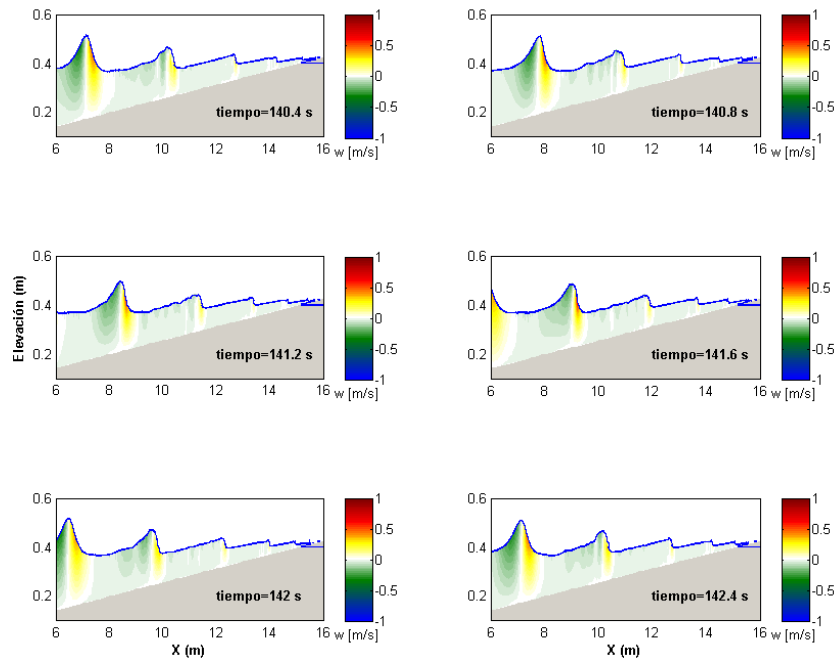


Figura 4.15 Campo de aceleración vertical  $w$ , obtenida por el modelo COBRAS en rotura en descrestamiento, la escala de color representa la magnitud de aceleración vertical.

Por último, la figura 4.16 presenta los instantes asociados con los valores espacio-temporales de la presión. En este caso, los paneles indican que la presión presenta el mismo comportamiento para la ola en todo momento, debido a que la presión mayor se genera en el fondo, mientras que cerca de la superficie se tendrán valores más pequeños y conforme la ola se acerca a la costa los valores de la presión tienden a cero. En este caso, la presión no da muestras de presiones impulsivas y todos los contornos de presión parecen uniformes en los instantes seleccionados. Esto se debe a que en este caso no ocurre el colapso violento de la ola que se observa en el caso de la rotura en voluta.

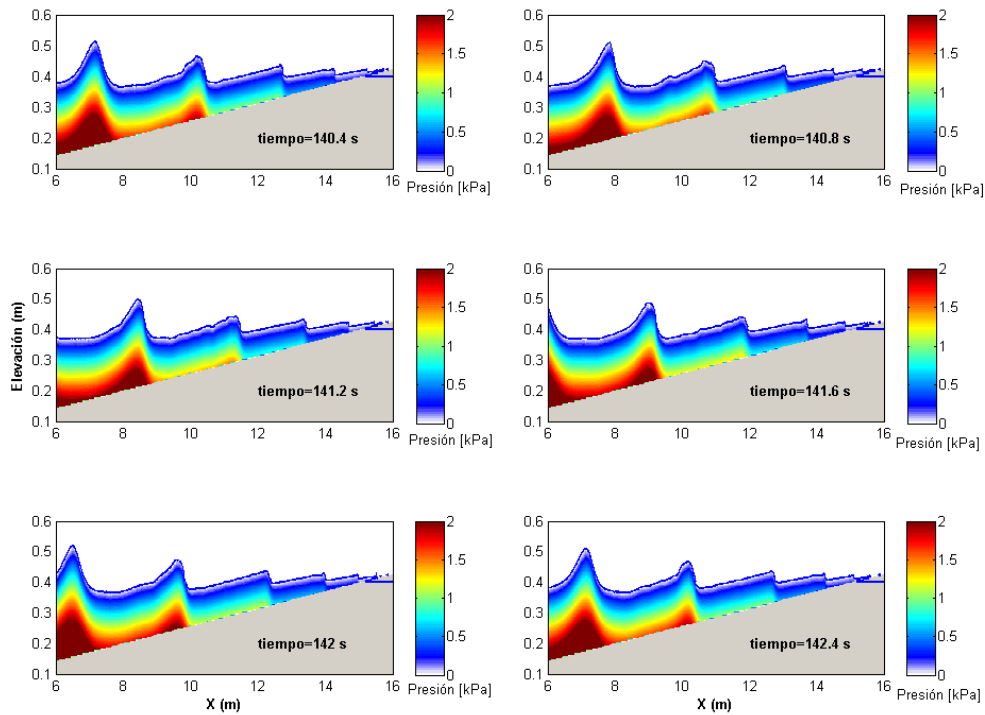


Figura 4.16 Campo de presión, obtenida por el modelo COBRAS en rotura en descrestamiento, la escala de color representa la magnitud de presión.

#### 4.3.2 Términos de la ecuación de Euler

De igual manera, que para rotura en voluta, se utilizó la ecuación de Euler para el gradiente de presión. En tres posiciones diferentes sobre el perfil de la playa. La localización de estos puntos se presenta en la Figura 4.17, donde se aprecia que se seleccionó un punto en la zona de peraltamiento de la ola (P-1), otro donde se presenta la rotura (P-2) y por último uno más en la zona de lavado, cerca de la línea de costa (P-3). Dicho análisis se realizó para celdas del modelo numérico ubicadas cerca del fondo, zona en la que se presenta el esfuerzo cortante que induce el movimiento de arena y eventual transporte de sedimentos.

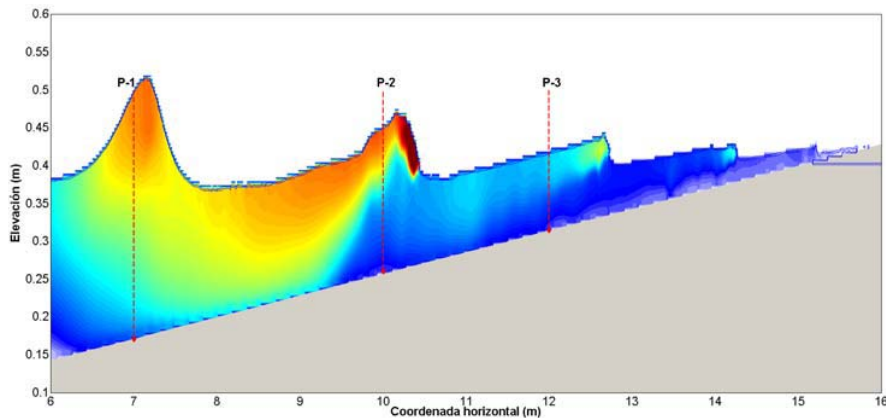


Figura 4.17 Ubicación de los puntos de comparación para los términos de la ecuación de Euler, para rotura en descrestamiento.

Para cada una de estas ubicaciones, se elaboraron gráficas de los términos de la aceleración total, aceleración local y términos de advección vertical y horizontal; además de la sumatoria de los tres términos de aceleración.

Los resultados se presentan en la Figura 4.18. Los paneles superiores muestran la variación del gradiente de presión horizontal (línea sólida) y su comparación con la sumatoria de los tres términos de aceleración total en la horizontal (línea punteada). Se presenta un muy buen ajuste de ambas líneas, incluso mejor que aquél observado durante el caso de rotura en tipo voluta. La diferencia estriba en que las contribuciones del término de advección horizontal son muy pequeñas. Lo que a su vez señala que el gradiente de presión puede ser parametrizado en función de la aceleración local.

Lo anterior se confirma en los paneles medios superiores que presentan para los tres puntos seleccionados, los resultados del término de la aceleración local (línea punteada,  $du/dt$ ) junto con el resultado obtenido para el gradiente de presión horizontal. Al igual que en el caso de rotura en tipo voluta, se observa un muy buen ajuste del gradiente de presión horizontal con este término ( $du/dt$ ). Lo que indica la validez de la hipótesis presentada por Hoefel y Elgar (2003) para ambos tipos de rotura estudiados en este trabajo.

En los paneles medios inferiores se presentan los resultados de los términos de advección horizontal ( $u \, du/dx$ ), el cual ilustra aportaciones mínimas en los tres puntos de análisis. Sin embargo, se revela una complicada variación espacial de su contribución, ya que su magnitud depende del punto de análisis. Por ejemplo, en la zona de peraltamiento de la ola (P-1), su contribución tiene una dirección marcada hacia fuera de la costa, mientras que en la región de rotura (P-2) y en la zona de lavado (P-3) tiene una dirección hacia la costa (i.e. positivo). Por último, los paneles inferiores ilustran la variación temporal del término de advección vertical en estos tres puntos, en estas gráficas es posible determinar que para este caso de análisis la contribución de dicho término es despreciable. Al igual que en el caso de la rotura en voluta, estas observaciones están en sintonía con lo propuesto por Foster et al. (2006), quienes propusieron la caracterización del gradiente de presiones en función de la aceleración local y el término de advección horizontal ( $du/dt + u \, du/dx$ ).

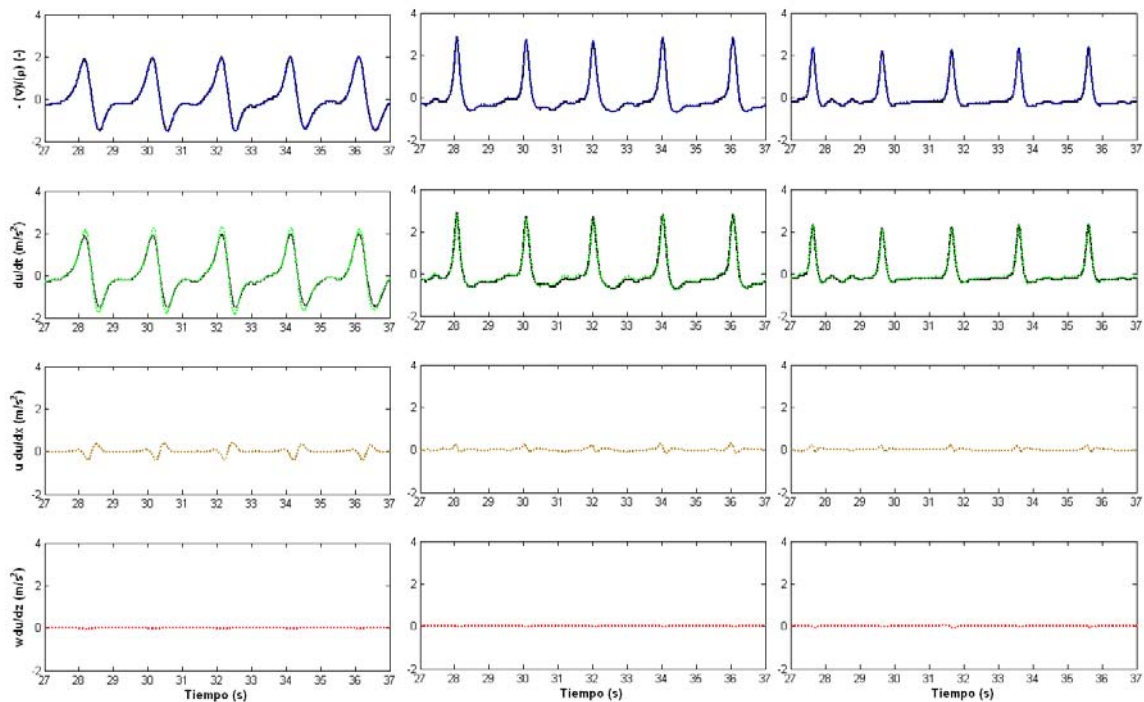


Figura 4.18 Gráficas de los términos de la ecuación de Euler para P-1 ( $x=7.0$  m), P-2 ( $x=10.0$  m) y P-3 ( $x=12.0$  m); para rotura de tipo descrestamiento.

#### 4.4 **Discusión de diferencias entre ambos tipos de rotura**

En esta última sección se discutirán las diferencias entre los resultados obtenidos bajo ambas condiciones de rotura seleccionadas. En ambos casos las olas que se utilizaron para la propagación fueron ondas cnoidales, que presentan una asimetría vertical más pronunciada respecto a sus contrapartes regulares. Siendo la única diferencia entre ambas pruebas, el tipo de rotura que se presenta sobre la pendiente de la playa.

La diferencia en las condiciones de rotura del oleaje presentadas, generaron diferencias en los mecanismos de disipación de energía y comportamiento de la amplitud de la ola a lo largo del canal. Se pudo observar que para el caso de descrestamiento el proceso de rotura es iniciado antes sobre la pendiente de la playa, con lo que se amplía la región conocida como zona de rompientes. Esto permite que la disipación de energía sea más lenta que en el caso de rotura en voluta, en el que se aprecia una disipación más rápida de la energía, la cual está asociada a la intensa turbulencia que se genera como consecuencia del impacto de la ola sobre la playa.

Además, los resultados numéricos indicaron un comportamiento totalmente distinto respecto al transporte de la energía (i.e. intensidad de la turbulencia). A partir de la comparación de los mapas espacio temporales de las variables de interés, turbulencia, velocidades y presión, se pudieron identificar claras divergencias entre el régimen hidráulico asociado a cada condición de rotura. Por ejemplo, en la condición de rotura en voluta fue posible identificar una predominancia en el transporte de la turbulencia hacia la costa, mientras que en el descrestamiento se observa más una predominancia hacia el mar. Estas observaciones están de acuerdo con lo reportado por Ting y Kirby (1994), quienes concluyeron que ambos tipos de rotura están asociados a procesos de acreción (voluta) y erosión (descrestamiento) de una playa.

Por lo que respecta a la comparación de la presión generada bajo ambas condiciones, para las condiciones de rotura tipo voluta, fue posible identificar ciertos valores pico en la región donde la ola se colapsa sobre la pendiente de la playa. Estos valores han sido observados por otros investigadores en pruebas de laboratorio a escala prototipo (Pedrozo-Acuña et al. 2008), durante la acción de oleaje tipo voluta. Sin embargo, las magnitudes aquí presentadas por el gradiente de

---



presión no es tan significativa, esto se debe a que la rotura se puede clasificar como una voluta suave y no una voluta violenta.

En la parte final del análisis se incorporó un análisis del gradiente de presión en función de la descripción propuesta por Euler, que desprecia las contribuciones de la turbulencia y la gravedad. Para ambos casos se observó un comportamiento similar, que el gradiente de presión horizontal puede ser bien aproximado por la aceleración total, lo que indica una trascendencia menor de la contribución de los efectos de turbulencia y gravedad en el flujo. Por otra parte, ambos casos aquí estudiados demostraron la validez de la propuesta realizada por Hoefel y Elgar (2003), quienes caracterizaron al gradiente de presión horizontal en función solamente de la aceleración local ( $du/dt$ ). En ambos casos, la aproximación de la aceleración local al gradiente de presiones horizontal fue excelente pues ambas gráficas están prácticamente superpuestas en las dos condiciones.

Se demostró a su vez, que el término de la advección horizontal ( $u du/dx$ ), juega un papel muy importante en ambos casos de rotura, mientras que para ambos casos la contribución del término de advección vertical ( $w du/dz$ ) puede ser considerada despreciable.