

6.- Análisis comparativo, simulación numérica y observaciones

6.1.- Introducción

A continuación se presentan diversos estudios numéricos hidromorfodinámicos de la zona cercana a la costa, centrados principalmente en la evaluación de modelos a lo largo del perfil transversal de playa, para la simulación de los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en playas arenosas y en una escala de tiempo de unos pocos días. Los modelos de perfil están siendo utilizados en la actualidad para estimar tasas de transporte de sedimentos, la evolución de los perfiles de playa tras una regeneración artificial o para la predicción de los volúmenes de erosión en dunas. Sin embargo, la precisión en la predicción de los parámetros físicos involucrados en dichos procesos sigue siendo incierta. Para minimizar este problema, es esencial tener una idea clara del desarrollo natural de los perfiles de playa en varias escalas temporales y espaciales.

Desde el punto de vista de la ingeniería de costas, las escalas de tiempo más relevantes en los modelos de perfiles son: las escalas de tiempo de las tormentas, del orden de unas cuantas horas a unos pocos días y una escala estacional, de semanas a meses. Las tormentas que se aproximan a las costas generalmente provocan una erosión importante de la playa (e incluso de las dunas, si están presentes) y una migración hacia mar adentro de las barras, en función de la intensidad de la tormenta y del nivel alcanzado de la sobre-elevación del nivel medio del mar producido por la rotura del oleaje y por la marea meteorológica. En caso de que haya erosión, la playa se puede recuperar bajo condiciones menos energéticas, de clima suave (generalmente presentes durante el verano). Por otra parte, el comportamiento típico de las barras sumergidas en una escala de tiempo estacional es de una migración cíclica, moviéndose hacia el mar durante la estación invernal y hacia la costa (durante la recuperación de la propia playa) en la estación estival (en condiciones de oleaje de baja energía). La variación estacional resultante (que da lugar a los llamados perfil de invierno y perfil de verano) es una característica general del comportamiento morfodinámico de la zona cercana a la costa, pero el grado de “estacionalidad” es altamente variable. Por ejemplo, en algunas costas del Océano Pacífico, las barras sumergidas llegan a desaparecer durante el periodo estival y la arena de la barra se integra en la playa. En otras costas de otras partes del mundo, las barras sumergidas son una característica perenne. Es interesante mencionar que el conocimiento de la variabilidad estacional del perfil de playas ha aumentado considerablemente en los años recientes debido al uso de técnicas de percepción remota con imágenes de video. Por citar un par de ejemplos, Lippman *et al.* (1993) estudiaron el ciclo migratorio de las barras en la zona de rompientes (con una longitud de ≈ 100 m) en la playa Duck (USA), donde observaron tasas de migración hacia mar abierto de hasta 100 m y de 50 m en dirección a la costa durante el ciclo estacional. Por otra parte, Van Enckevort (2001) analizó las variaciones estacionales de la posición de la cresta de la barra (una barra sumergida de ≈ 150 m) en la playa de Noordwijk, en la costa holandesa. Basado en un análisis de la posición media de la cresta de la barra a lo largo de 2 km de costa, la variabilidad estacional en la posición (dirección transversal) de la

barra fue de cerca de 20 m para la migración de la barra exterior y de alrededor de 10 m para la de la barra interior. Ambas migraciones (hacia el mar y hacia la costa) se observaron en la escala de tiempo estacional en ambos casos (playa Duck y Noordwijk), pero el desplazamiento hacia el mar durante condiciones de tormenta fue dominante. Esto muestra que las barras sumergidas en la zona cercana a la costa pueden migrar una distancia del mismo orden de magnitud que su propia escala de longitud (0.2 a 1 L) en una escala de tiempo estacional (de semanas a meses).

En la escala de tiempo de décadas, las barras sumergidas, por lo regular, presentan un ciclo migratorio estacional en dirección a mar abierto sobre una longitud del orden de unas cuantas longitudes de la barra (hasta 5 L), con un decaimiento de la barra exterior en el borde exterior de la zona de rompientes y la generación de una nueva barra al pie de la playa (Wijnberg, 1995). Durante condiciones de tormenta, la barra exterior decae debido a la erosión de la arena en la cresta de la barra y al transporte del material erosionado en el flanco exterior de la barra interior, dando como resultado una migración hacia el mar de la barra interior. Durante tormentas menores, las condiciones pueden ser favorables para la generación de una nueva barra al pie de la playa. Este fenómeno fue claramente observado en la playa de Duck y en la costa Holandesa (Hoekstra *et al.*, 1996; Van Rijn, 1998; Shand *et al.*, 1999). El tiempo del ciclo de las barras en la costa central holandesa y en la playa de Duck es del orden de 5 a 15 años, dependiendo del tamaño de las barras. Considerando que estas escalas de tiempo están cercanamente relacionadas con las escalas espaciales, puede decirse que el comportamiento de la barra exterior y de la barra interior es, a largo término (del orden de años y en distancias del orden de 10 km de costa), generalmente bidimensional, en el sentido de que las barras son continuas y con la misma forma en la dirección longitudinal a la playa, y muestran el mismo patrón general migratorio (tanto en dirección a mar abierto como en dirección a la costa).

En el corto y mediano plazo de tormentas y estaciones, las barras no son completamente lineales y rectas, sino que presentan algunas no-uniformidades longitudinales como perturbaciones locales superpuestas a lo largo de la barra, dando lugar a un sistema morfológico 3D. Ejemplos de estas perturbaciones locales son el desarrollo de depresiones (canales de “rip”), patrones crescenticos y/o sinuosos que dan lugar a una ondulación a lo largo de la barra del orden de 100 a 1000 m (Lippmann & Holman, 1990; Van Rijn, 1998; Ruessink *et al.*, 2000; Van Enckevort & Ruessink, 2001 y Van Enckevort, 2001). El tiempo de residencia de estas características 3D es del orden de meses (e incluso de 1 año).

En resumen, la migración transversal a la costa de las barras sumergidas en un perfil de playa dado es del orden de 0.2 a 1 L (siendo L la longitud en la dirección transversal a la playa de la barra) en las escalas de tormentas y estacional, y es provocada por procesos de transporte de sedimentos, tanto longitudinal como transversal (comportamiento 3D). En escalas de tiempo mayores, del orden de décadas, la migración transversal de los perfiles individuales es del orden de 3 a 5 L, provocados principalmente por los procesos de transporte transversal (comportamiento 2D).

Aplicando los modelos de perfil de playa (2D) para predecir el comportamiento de las barras sumergidas, el dominio de estudio se simplifica a un sistema 2D que se basa en la suposición fundamental de la uniformidad longitudinal de la playa. Las barras sumergidas también se presuponen paralelas a la línea de orilla y sin la presencia de

posibles formas sinuosas o la existencia de canales de *rips*. Esto es a todas luces una limitación muy restrictiva en cuanto a las condiciones reales en una playa. Por lo tanto, la aplicabilidad de estos modelos es cuestionable. De aquí que una de las principales motivaciones del proyecto COAST3D (Soulsby, 2000) fuera el cuestionamiento de la aplicabilidad y validez de las simulaciones de la evolución morfológica mediante el modelado 2D del perfil, para ver si resultaba insuficiente y era necesaria una aproximación 3D para realizar buenas predicciones.

Considerando la información disponible de la variabilidad de perfiles individuales de playa debido a los procesos de transporte longitudinal y transversal de sedimentos, parece claro que no se puede aplicar un modelo de perfil 2DV a estos perfiles individuales, sino a un perfil promediado longitudinalmente a la playa con una distancia lo suficientemente grande como para eliminar los efectos de la variabilidad longitudinal (Van Rijn *et al.*, 2003). La predicción de la morfodinámica a escalas de tiempo del orden de décadas mediante modelado numérico 2D parece más apropiada, aunque hay que reconocer que la precisión de la predicción de la migración neta de las barras a esta escala de tiempo sigue siendo muy cuestionable.

En este capítulo se analiza la simulación numérica de los principales procesos involucrados en la evolución del perfil de la playa de Egmond (Holanda) bajo condiciones de pre-tormenta, tormenta y post-tormenta bajo el principio de que la precisión de la predicción numérica de los procesos físicos involucrados, y de la evolución del perfil, será baja cuando la variabilidad en las condiciones ambientales sea alta. Intuitivamente, parece claro que la precisión en la predicción de la evolución de las barras más alejadas (y estables) de la costa será mayor que la predicción de la evolución de las barras más cercanas (y dinámicas) a la línea de orilla y de la playa, puesto que es una zona que puede responder con cambios a prácticamente cada ola que llega.

En este apartado se resumen las actividades de modelado numérico en la playa de Egmond (figura 6.1) llevadas a cabo, dentro del marco del proyecto europeo COAST3D, con el modelo Limos 1D, comparando los resultados del modelado con los datos de campo, así como las limitaciones observadas en el modelado numérico de los procesos anteriormente mencionados.

Este tramo de costa fue seleccionado debido a que se trata de una playa de arena longitudinalmente homogénea y uniforme, sin la presencia de estructuras en sus proximidades. La zona de rompientes tiene una anchura aproximada de 500 a 600 m y el perfil de playa está caracterizado por la presencia casi permanente de 2 o 3 barras de arena. Esta costa se ve sometida tanto a oleaje tipo *sea* como tipo *swell*, y el rango de mareas habitual es del orden de 2 m.

En esta playa fueron llevados a cabo dos grandes experimentos. El primero, denominado experimento piloto se realizó en los meses de Abril y Mayo de 1998 y fue concebido para probar y calibrar los dispositivos (instrumental) de medida en condiciones reales de campo, así como el diseño experimental de la campaña principal. Los datos obtenidos fueron utilizados para llevar a cabo los pases preliminares de los modelos para poderlos comparar con los datos observados (Sierra *et al.*, 1999a,b).

La segunda campaña de campo (experimentos principales) fue llevada a cabo en los meses de Octubre y Noviembre de 1998. El objetivo de esta campaña fue la obtención

de una serie de datos más amplios para mejorar el entendimiento de los procesos morfodinámicos y para evaluar el desempeño de los modelos numéricos al tratar de simular los procesos observados. Estas medidas incluyeron:

- Medidas batimétricas a lo largo de varios días (16, 24, 31 de Octubre; 12 y 19 de Noviembre de 1998).
- Toma de muestras de sedimentos (distribución de tamaño de grano y densidad).
- Medidas del campo de oleaje (en mar abierto con una boya direccional y en 5 puntos a lo largo del perfil de playa).
- Medidas del nivel del mar (mareas astronómicas y meteorológicas).
- Medidas de las condiciones meteorológicas (velocidad y dirección del viento).
- Medidas del flujo de sedimento (determinación del modo, magnitud y dirección de los flujos de transporte sedimentario).



Figura 6.1.- Localización de la playa de Egmond.

Estas medidas se utilizaron para la validación y calibración del modelo morfodinámico LIMOS (Sierra *et al.*, 1997), desarrollado en el LIM-UPC. Los detalles de este modelo han sido descritos en el capítulo 5 y pueden verse en Sierra *et al.* (2001).

6.2.- Estudio comparativo de los modelos de disipación de energía por rotura de oleaje irregular

El estudio de la transformación que experimentan las olas, desde que se generan en mar abierto hasta que se propagan a la costa es de particular importancia en el campo de la Ingeniería Marítima y la Oceanografía Costera. Anteriormente se ha venido discutiendo que los principales cambios que experimentan las playas son los debidos al oleaje y las corrientes, turbulencia y ondas largas que se generan al romper el oleaje. En

consecuencia, las actuaciones de Ingeniería Costera deben ser concebidas en el marco del entendimiento de los procesos físicos derivados de la acción del oleaje. Si además se tiene en cuenta que, a través del oleaje, una gran cantidad de energía (que se transmite del campo de vientos en alta mar a la superficie libre) se propaga hacia la costa, donde se disipa en una franja muy estrecha al romper el oleaje, entonces el estudio de los patrones de rotura del oleaje y decaimiento de la altura de ola en la zona costera queda absolutamente justificado.

En el estado del arte hay descritos algunos modelos sobre la disipación de la energía del oleaje al romper. En este apartado se evalúan los modelos de Battjes & Janssen (1978), Battjes & Stive (1984) y Thornton & Guza (1983) aplicados a la playa de Egmond. El modelo de Battjes & Janssen (1978) depende de los parámetros α y γ , (este último en aguas someras se reduce al índice de rotura). Si bien Battjes & Stive (1984) proponen un valor de γ en función del peralte del oleaje en aguas profundas, existen evidencias de que también las características de la playa (pendiente, presencia de barras sumergidas, nivel de la marea, etc.) pueden influir en el valor de este parámetro. Por otra parte, Thornton & Guza (1983) proponen un modelo similar al de Battjes & Janssen (1978), pero profundizando en la descripción de la transformación de la función de densidad de probabilidad de la altura de ola media cuadrática H_{rms} . Thornton & Guza (1983) proponen un valor de $\gamma = 0.42$ de manera que su modelo pasa a ser función únicamente del parámetro B que es función de la intensidad de la rotura.

El uso del parámetro γ de rotura puede ser muy útil, por ejemplo, en el análisis de las transformaciones de altura de ola a medida que el oleaje se acerca progresivamente a la costa hasta que alcance una altura tal que corresponde al valor de γ en rotura en un punto de profundidad crítica en el cual la ola se hace inestable y rompe. Otra aplicación práctica puede efectuarse en el diseño de estructuras de protección costera, ya que la altura de la ola de diseño está limitada por la profundidad existente delante de la estructura, dado que las olas que tengan una mayor altura que la permitida por el parámetro γ de rotura habrán roto antes de llegar a la estructura.

Estos modelos se han aplicado a la playa de Egmond aan Zee, y utilizando el modelo de propagación del oleaje anteriormente descrito se ha determinado cuales son los valores del parámetro γ de Battjes & Janssen (1978) que mejor se ajustan a las medidas, dejando libre el valor del parámetro α , y se ha buscado la mejor combinación de α y γ que ajusta los datos. También se han contrastado los valores obtenidos del parámetro γ con el modelo de Battjes & Stive (1984). Con respecto al modelo de Thornton & Guza (1983), se ha buscado la mejor combinación de valores $B - \gamma$ y después el mejor valor de B dejando fijo el valor de $\gamma = 0.42$ (propuesto por los mismos autores).

De la misma manera se han establecido relaciones entre los parámetros libres de cada uno de los modelos (γ , α y B) y las características del oleaje en la playa. Finalmente se han comparado los resultados obtenidos por los diferentes modelos con el objetivo de averiguar cual es el que reproduce mejor los procesos de disipación de la energía del oleaje irregular cuando este se propaga sobre una playa con barras sumergidas.

6.2.1.- Datos disponibles

Los datos utilizados para la calibración de los modelos de disipación de Battjes & Janssen (1978), Battjes & Stive (1984) y Thornton & Guza (1983) fueron obtenidos en dos campañas de campo en la playa de Egmond, en el marco del proyecto COAST3D, denominadas *experimento piloto* y *experimento principal*, llevadas a cabo durante la primavera y el otoño de 1998 (Ruessink, 1999).

Durante las dos semanas del experimento piloto solo se produjeron tormentas moderadas, por lo que aún cuando se obtuvieron datos hidrodinámicos de excelente calidad, no se produjeron cambios importantes en la morfología de la playa. En cambio, durante el experimento principal, se registraron tormentas importantes, alcanzando alturas de ola significativa H_s , en aguas profundas, de hasta 5 m, las cuales produjeron cambios importantes en la morfología de la playa, junto con problemas logísticos en la adquisición de datos. Aún así, se obtuvieron datos hidrodinámicos muy representativos de estas condiciones extremas.

Los datos utilizados en este apartado se obtuvieron del experimento principal (6 semanas de duración entre Octubre y Noviembre de 1998):

- Niveles de agua en 15 puntos.
- Alturas y periodos del oleaje en 18 puntos.
- Velocidad y dirección de las corrientes en 14 puntos fijos y en un punto móvil.
- Concentración y transporte de sedimentos en un punto fijo y otro punto móvil.
- Formas de fondo.
- Medidas continuas de batimetría (en la zona cercana a la costa y en aguas intermedias).
- Medidas con trazadores fluorescentes.
- Imágenes ARGUS de la rotura del oleaje en las barras.
- Imágenes de Radar X de la propagación del oleaje.
- Parámetros meteorológicos.

La batimetría está caracterizada por tener 2 o 3 barras sumergidas, tal como se puede apreciar en la figura 6.2. Una de estas barras se encuentra muy próxima a la costa, aunque no siempre está presente (Wolf, 1997), una segunda en la zona de rompientes, que puede romperse por canales de corrientes de retorno y una tercera más exterior.

Se ha observado que la barra más dinámica es la que se encuentra situada en la zona de rompientes. Es en esta barra donde se han realizado la mayor parte de las medidas (figura 6.3)

Las alturas de ola significativa registradas durante el experimento principal oscilaban dentro de un rango comprendido entre 0.5 m y un máximo de 4.9 m. El rango de mareas fue de -1.1 m a +2.2 m respecto al nivel medio del mar (local). Las condiciones hidrodinámicas presentes durante la campaña produjeron cambios batimétricos importantes, pues las barras, en principio razonablemente rectas y uniformes, se volvieron sinuosas y seccionadas. En lo que se refiere a la configuración de la línea de orilla, las tormentas produjeron cambios de volumen de hasta 3 m³ por metro de anchura al día.

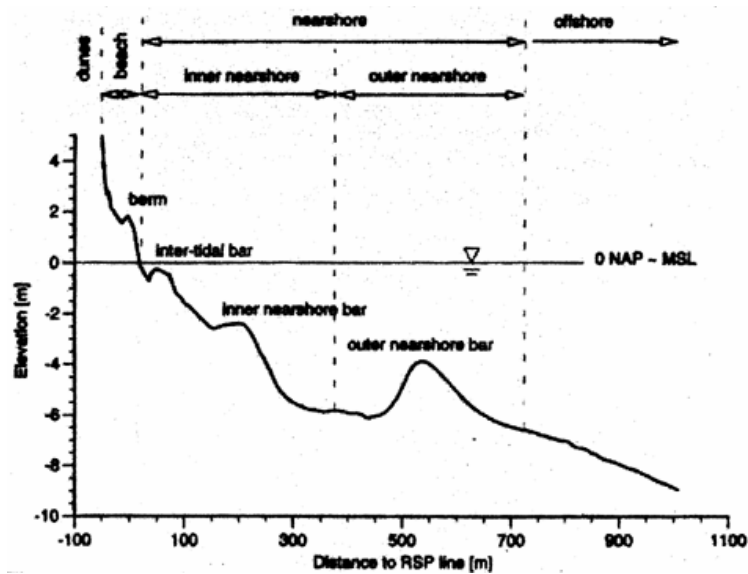


Figura 6.2.- Perfil transversal típico de la playa de Egmond (Wolf, 1997).

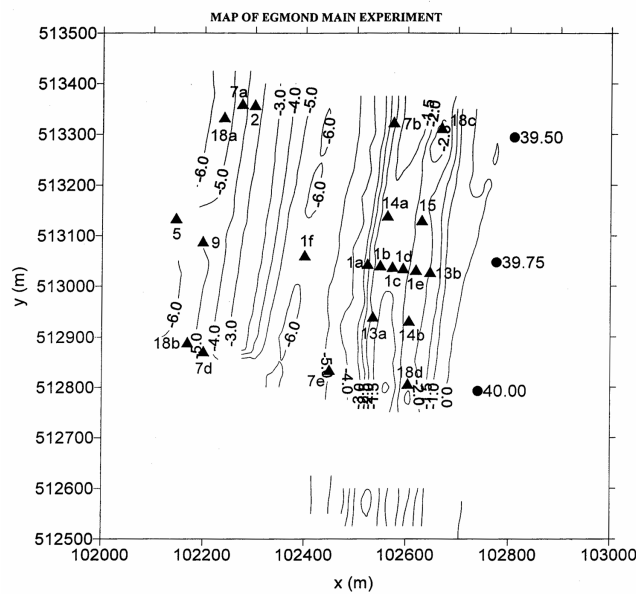


Figura 6.3.- Mapa batimétrico y localización de los dispositivos de medida durante el experimento principal de Egmond (Ruessink, 1999).

Para la calibración de los modelos de disipación, se utilizaron las siguientes medidas:

- Datos de la boya direccional fondeada a 15 m de profundidad, de donde se obtuvieron datos de altura de ola significativa H_s , periodo de pico T_p , ángulo de aproximación del oleaje (en grados sexagesimales respecto del norte) y nivel medio del mar.

- Medidas instrumentales en 5 puntos denominados 2, 1a, 1b, 1c y 1d, situados a 513.65 m, 253.82 m, 224.75 m, 199.75 m y 164.75 m de la línea de orilla respectivamente, en donde se ha medido la altura de ola significativa (figura 6.4).

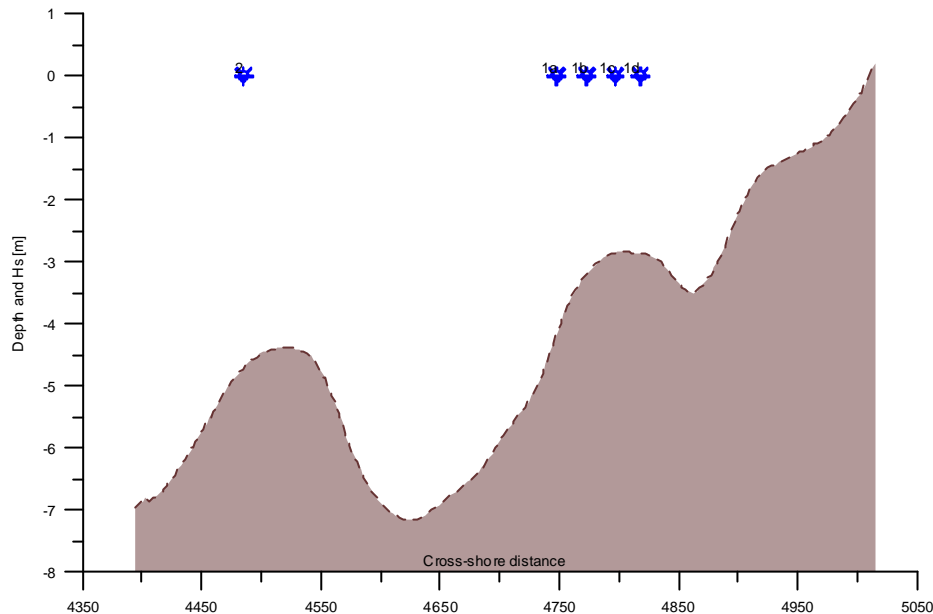


Figura 6.4.- Perfil transversal de la playa de Egmond (Experimento Principal) y localización del instrumental de medida.

6.2.2.- Aplicación de los modelos de disipación

En este punto se analizará el desempeño de cada uno de los modelos de disipación de la energía del oleaje debido a la rotura del oleaje. Primero se evaluará el modelo de Battjes & Janssen (1978), luego en modelo de Battjes & Stive (1984) y finalmente el modelo de Thornton & Guza (1983).

Para cada uno de estos modelos se ha procedido a obtener la combinación de parámetros que mejor ajustan la simulación con los datos de campo de alturas de ola en los puntos de medida, se han estudiado las diferentes relaciones de los parámetros de ajuste del modelo con las características del oleaje y de la playa y finalmente se ha analizado la exactitud del modelo en el cálculo de las alturas de ola en los puntos de control, calculando los errores cometidos.

6.2.2.1.- Modelo de Battjes & Janssen (1978)

El modelo de Battjes & Janssen (1978) es uno de los modelos más utilizados en el modelado de la rotura del oleaje irregular. Como ya se ha explicado anteriormente, se trata de un modelo que depende de dos parámetros: α y γ . El parámetro γ en aguas someras puede asimilarse al índice de rotura (relación entre la altura de ola en rotura y

la profundidad). Battjes & Janssen (1978) proponen que la altura del oleaje dentro de la zona de rompientes está limitada por la profundidad (γ) y que la tasa de disipación de energía depende la fracción de olas rotas (que a su vez es función de la relación entre la altura de ola media cuadrática en cualquier punto de la zona de rompientes y la altura de ola máxima) y del parámetro $\alpha = O(1)$. Los parámetros de entrada en el modelo de propagación son los datos de ola en aguas profundas (H_s), periodo de pico (T_p), ángulo de aproximación del oleaje, nivel medio del agua (correspondiente a cada *burst*¹) y la batimetría. Asignando valores a los parámetros α y γ de Battjes & Janssen (1978) se obtiene la altura de ola simulada en cada uno de los 5 puntos considerados (2, 1a, 1b, 1c y 1d) para cada *burst*.

En cada *burst* se ha variado el valor de entrada del parámetro α en un intervalo de [0.6 a 1.6] en incrementos de 0.1, mientras que el parámetro γ se ha variado en el intervalo de [0.5 a 1.3] en incrementos de 0.025. El par de α y γ seleccionado será el que minimice el error (R_{MAE}) entre los valores simulados y los valores medidos.

Los valores así obtenidos del parámetro α abarcan todo el rango considerado, como puede verse en la figura 6.5, aunque en general, se obtienen valores elevados. El parámetro γ también toma valores en todo el intervalo considerado. No obstante, es interesante notar que los valores más consistentes son los que están comprendidos entre 0.5 y 0.8.

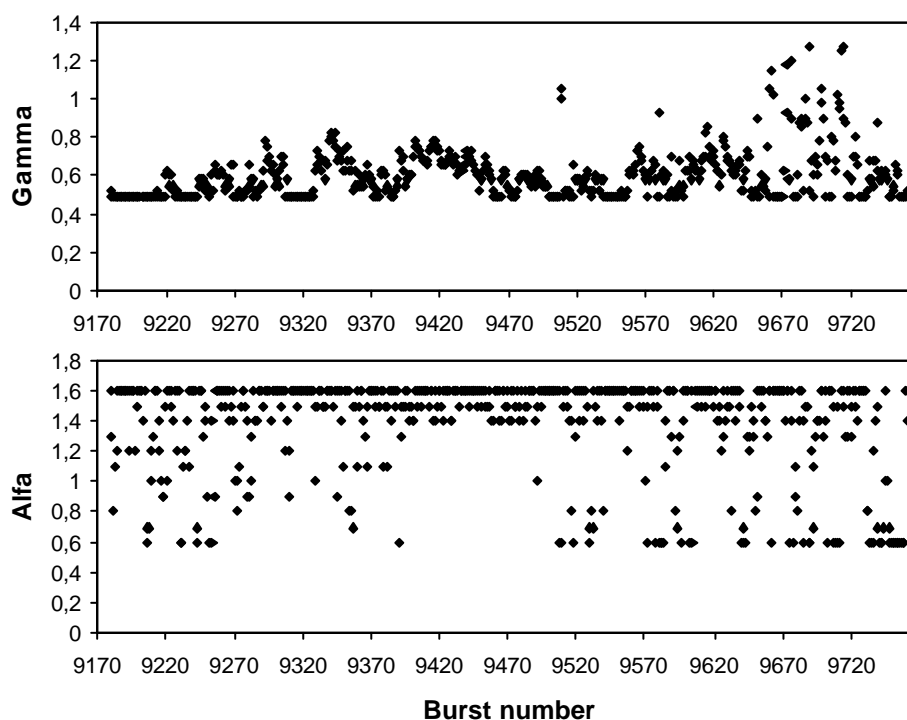


Figura 6.5.- Valores obtenidos de los parámetros α y γ del modelo de Battjes & Janssen (1978). Experimento Piloto Egmond.

¹ un dato cada hora, durante los 33 días que duró el experimento

Posteriormente se buscaron las posibles relaciones entre los parámetros α y γ con el peralte del oleaje y de la playa, así como con los valores adimensionales de Hs/h y Hs/d (siendo h y d el calado mínimo existente sobre cada una de las barras sumergidas, la exterior y la interior respectivamente). Los resultados obtenidos no mostraron ninguna relación significativa.

Cabe mencionar que durante la simulación de las alturas de ola evaluando los distintos valores de los parámetros γ y α , el modelo convergió en todas las simulaciones (series de tiempo) del periodo escogido. Por lo tanto, se dispone de un total de 589 alturas de ola calculada para cada punto (2, 1a, 1b, 1c y 1d) de medidas (figura 6.4). Los resultados de estas simulaciones pueden verse en las figuras 6.6, 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10. De estas simulaciones, puede verse que los puntos de media en la barra interior (1a, 1b y 1c), la simulación de alturas de ola se ajusta muy bien a las observaciones (figuras 6.7, 6.8 y 6.9), mientras que el ajuste para la barra exterior (punto 2), se puede apreciar que el modelo claramente infravalora las alturas de ola reales (figura 6.6). En cuanto al punto (1d) más cercano a la línea de orilla, puede verse que el ajuste del modelo con las medidas reales también es bastante bueno, aunque puede apreciarse un periodo en el cual las alturas de ola medidas son inferiores a las predichas por el modelo.

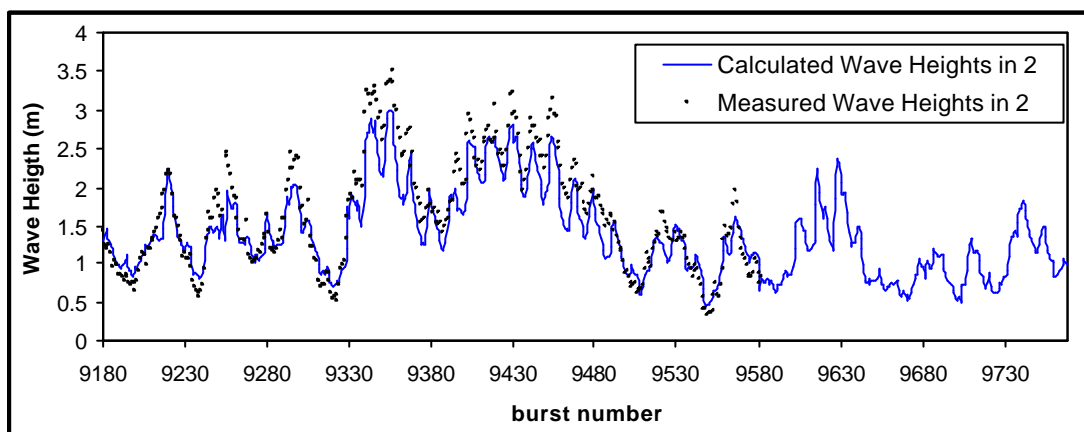


Figura 6.6.- Alturas de ola, simulada (Battjes & Janssen) y medida en el punto 2.

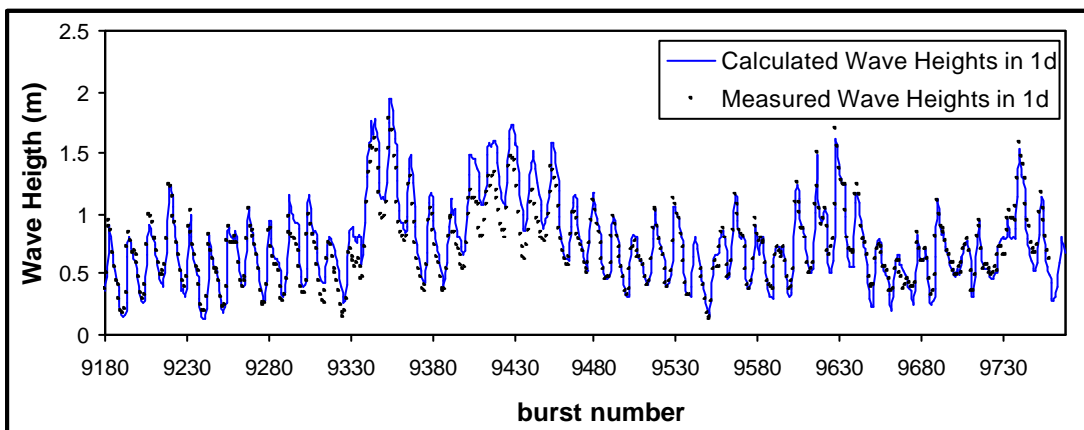


Figura 6.7.- Alturas de ola, simulada (Battjes & Janssen) y medida en el punto 1a.

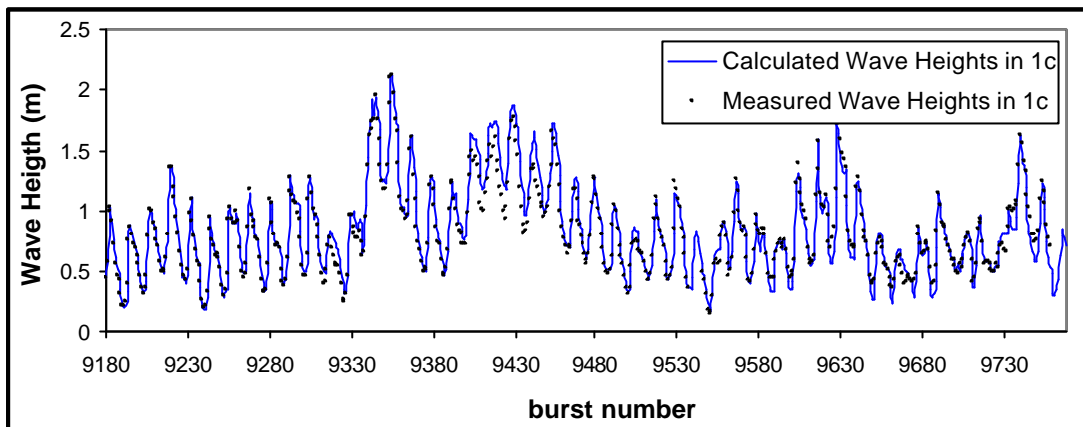


Figura 6.8.- Alturas de ola, simulada (Battjes & Janssen) y medida en el punto 1b.

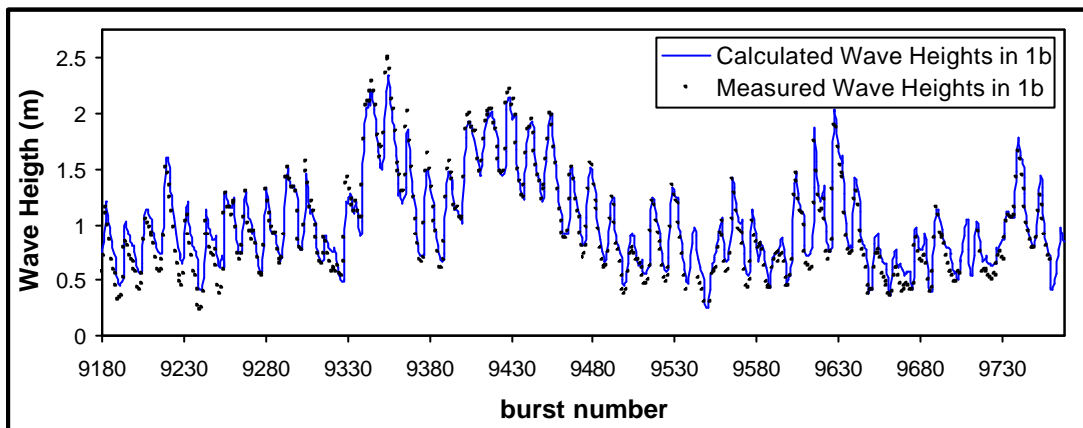


Figura 6.9.- Alturas de ola, simulada (Battjes & Janssen) y medida en el punto 1c.

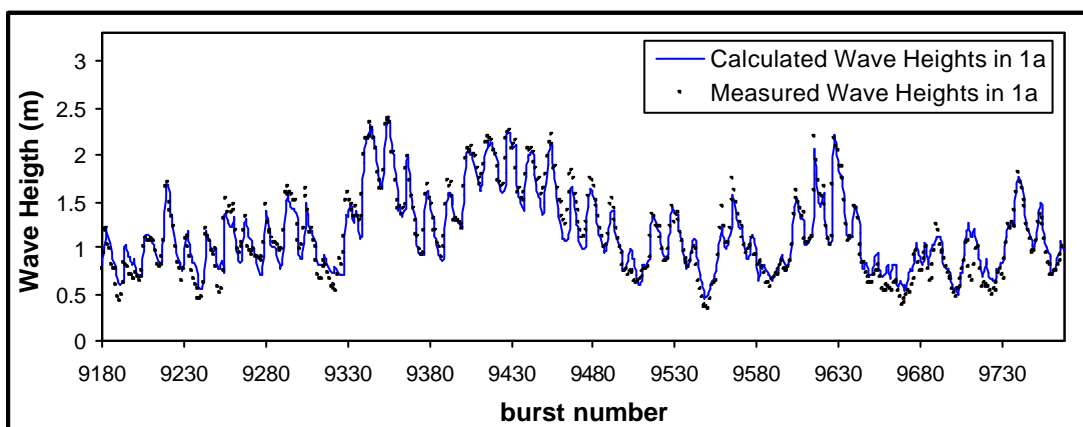


Figura 6.10.- Alturas de ola, simulada (Battjes & Janssen) y medida en el punto 1d.

También se ha analizado la relación entre las alturas de ola medidas (H_m) y las calculadas (H_c) por el modelo. Los resultados obtenidos pueden verse en las figuras (6.11, 6.12, 6.13, 6.14 y 6.15) donde se aprecia claramente que el ajuste de las predicciones del modelo de Battjes & Janssen (1978) son mejores para los puntos centrales (1a, 1b y 1c) que para los puntos extremos (2 y 1d). En los 3 puntos más exteriores (2, 1a y 1b), el modelo tiende a sobrevalorar las alturas de ola para olas pequeñas, mientras que para olas grandes, la tendencia es justamente la contraria, tendiendo a infravalorar los datos.

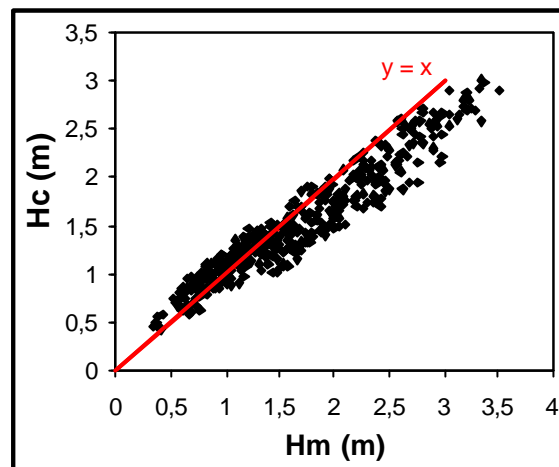


Figura 6.11.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Janssen, 1978) en el punto 2.

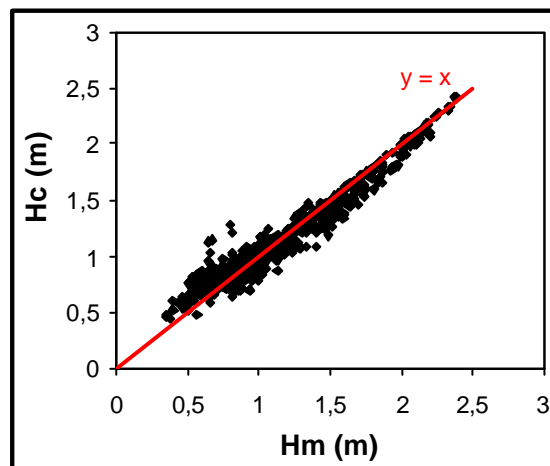


Figura 6.12.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Janssen, 1978) en el punto 1a.

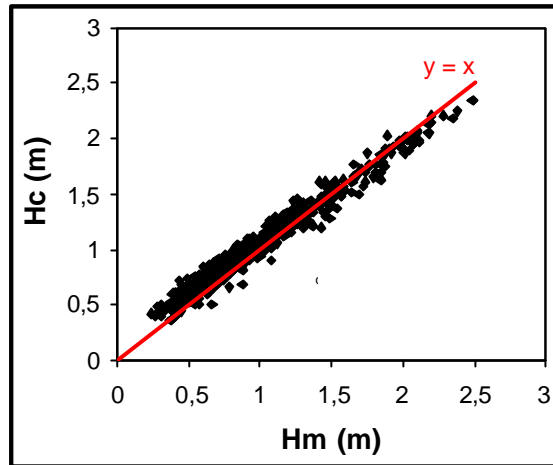


Figura 6.13.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Janssen, 1978) en el punto 1b.

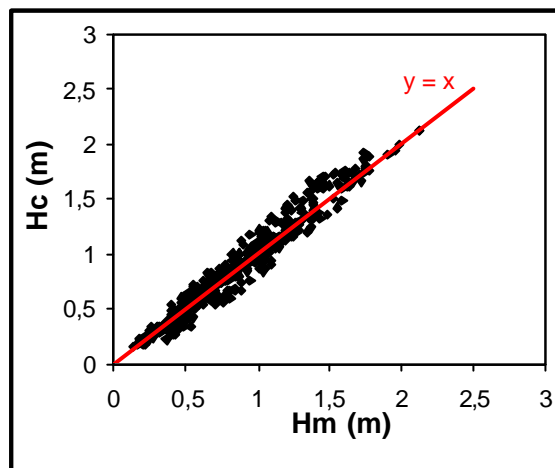


Figura 6.14.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Janssen, 1978) en el punto 1c.

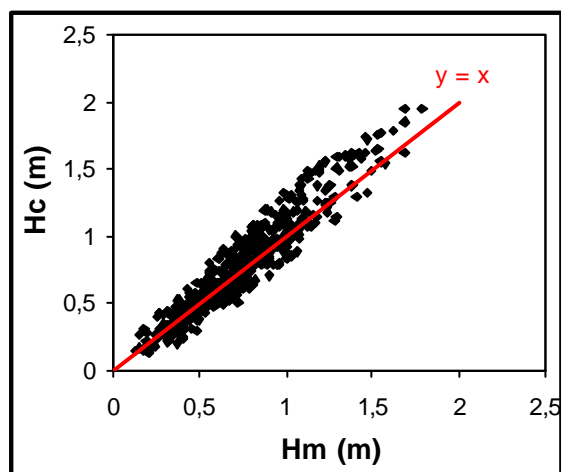


Figura 6.15.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Janssen, 1978) en el punto 1d.

Para cuantificar la precisión del modelo de Battjes & Janssen (1978), se ha calculado el error absoluto medio relativo:

$$R_{MAE} = \left\langle \frac{|X_{medida} - X_{calculada}|}{|X_{calculada}|} \right\rangle \quad [6.1]$$

donde X_{medida} es el valor registrado por los sensores y $X_{calculada}$ es el valor proporcionado por el modelo (X será H o v_l) y el operador $\langle \rangle$ indica los valores promediados. Esta expresión da una estimación de la diferencia media entre la altura del oleaje calculada por el modelo y la altura de ola media.

Los errores obtenidos en cada uno de los puntos de medida quedan resumidos en la tabla 6.1. Estos errores permiten cuantificar las desviaciones respecto a las alturas de ola medidas. Se puede observar que en el punto 2 (el más alejado de la costa) y en el punto 1d (el más cercano) el error cometido por el modelo es notablemente mayor que el resto de los puntos. No obstante, cabe recalcar que en el punto 2 hay un intervalo de tiempo bastante amplio durante el cual no se dispone de medidas, por lo que el R_{MAE} se calculó con menos datos (401) que los otros puntos.

| Punto de medida | Número total de datos | RMAE (%) |
|-----------------|-----------------------|----------|
| 2 | 401 | 13.60 |
| 1a | 588 | 7.16 |
| 1b | 559 | 7.70 |
| 1c | 570 | 6.17 |
| 1d | 572 | 11.19 |

Tabla 6.1.- R_{MAE} modelo de Battjes & Janssen con respecto a los puntos de medida (2, 1a, 1b, 1c y 1d).

También se ha calculado el error R_{MAE} cometido para cada ola propagada, es decir, para cada altura de ola considerada en los 5 puntos de medida. Los resultados obtenidos pueden verse en la figura 6.16. Tal como es de esperar, el error es mayor cuanto menor es la altura de ola significante H_s .

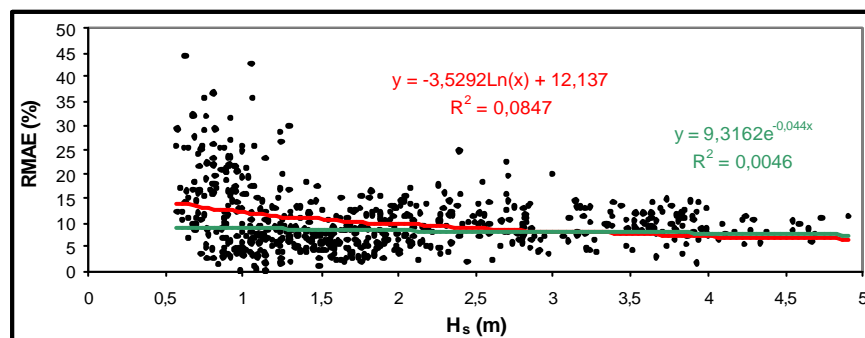


Figura 6.16.- R_{MAE} en función de la altura de ola significante (Battjes & Janssen).

En esta misma figura se muestran dos líneas de tendencia, una exponencial y otra logarítmica, donde se puede observar una disminución del R_{MAE} al incrementarse el valor de la altura de ola significativa. La mayoría de las predicciones tienen un R_{MAE} inferior al 20%, aunque en algunos casos, el error alcanza hasta un 45%.

De todo esto puede verse la efectividad del modelo propuesto por Battjes & Janssen (1978) para predecir cualitativa y cuantitativamente las características del oleaje medido en la zona cercana a la costa de Egmond, donde el R_{MAE} máximo sobre la barra exterior es del 13.6% y del 11.19% sobre la barra interior.

6.2.2.2.- Modelo de Battjes & Stive (1984)

Como se ha comentado en el capítulo 2, Battjes & Stive (1984) aplicaron el modelo de disipación de energía de oleaje irregular en rotura desarrollado por Battjes & Janssen (1978) a un gran conjunto de datos con el propósito de calibrarlo y verificarlo. La calibración de este modelo se llevo a cabo estimando los valores óptimos del parámetro γ (restringiendo el valor del parámetro $\alpha = 1$), con lo que obtuvieron un rango de valores de γ de [0.60 a 0.83], que se pueden considerar físicamente realistas. De aquí concluyeron que el parámetro γ no cambiaba de manera significativa con la pendiente de la playa, pero encontraron una dependencia sistemática de γ con el peralte del oleaje en aguas profundas s_0 , por lo que propusieron una parametrización de γ en función del peralte del oleaje en aguas profundas:

$$\gamma = 0.5 + (0.4 \tanh(33 s_0)) \quad [6.2]$$

Mediante la aplicación del modelo de Battjes & Stive (1984) se ha obtenido, para cada *burst*, el valor del parámetro γ mediante la parametrización establecida por los autores del modelo y con este valor se ha podido simular el decaimiento de la altura de ola en cada uno de los 5 puntos de medida localizados en el perfil de playa (2, 1a, 1b, 1c y 1d) conociendo los parámetros del oleaje en aguas profundas (H_s , T_p , nivel medio del mar y ángulo de propagación del oleaje incidente, además de imponer $\alpha = 1$).

El rango de valores obtenidos del parámetro γ aplicando el modelo de Battjes & Stive (1984) oscila entre [0.58 a 0.77]. Como se puede observar de la figura 6.17, los valores son similares a los considerados por los autores como físicamente realistas.

Como en el análisis de los parámetros obtenidos con el modelo de Battjes & Janssen (1978), aquí también se buscaron las posibles relaciones entre el parámetro γ del modelo de Battjes & Stive (1984) con las características del oleaje y de la playa, así como con H_s/h y H_s/d . Los resultados obtenidos tampoco mostraron ninguna relación significativa.

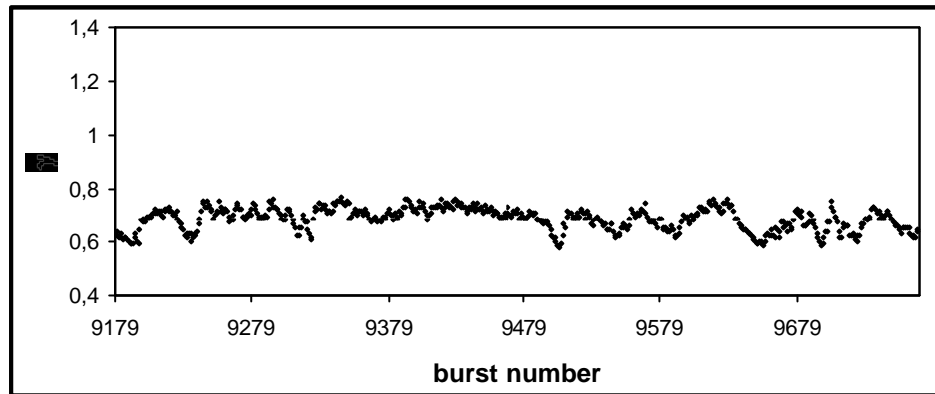


Figura 6.17.- Valores obtenidos del parámetro γ del modelo de Battjes & Stive (1984). Experimento Piloto Egmond.

Al igual que la validación anterior, el modelo de Battjes & Stive (1984) convergió en todos los pases, por lo que se ha podido evaluar un total de 589 medidas de alturas de ola en cada uno de los puntos de medida (2, 1a, 1b, 1c y 1d).

El resultado de dichas simulaciones puede verse en las figuras 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 y 6.22. A simple vista se puede observar que, en comparación con el modelo de Battjes & Janssen (1978), en este modelo, en general se producen mayores desviaciones de la simulación respecto a los datos. En el punto más alejado de la costa, situado en la primera barra (punto 2), se producen pequeñas desviaciones. Cabe recalcar que no hay ninguna tendencia clara del modelo a subestimar o sobreestimar las alturas de ola simuladas con respecto a las medidas, dado que las desviaciones se producen de manera irregular en lo que “al signo” se refiere. En cambio, en los otros puntos de medida (todos ellos situados en la segunda barra, ver figura 6.4), las desviaciones son más acusadas, y hay una clara tendencia a sobreestimar las alturas de ola.

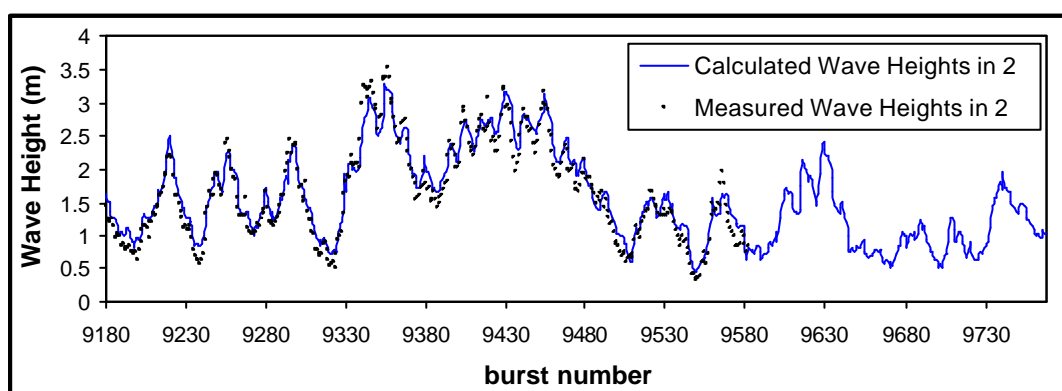


Figura 6.18.- Altura de ola, simulada (Battjes & Stive) y medida en el punto 2.

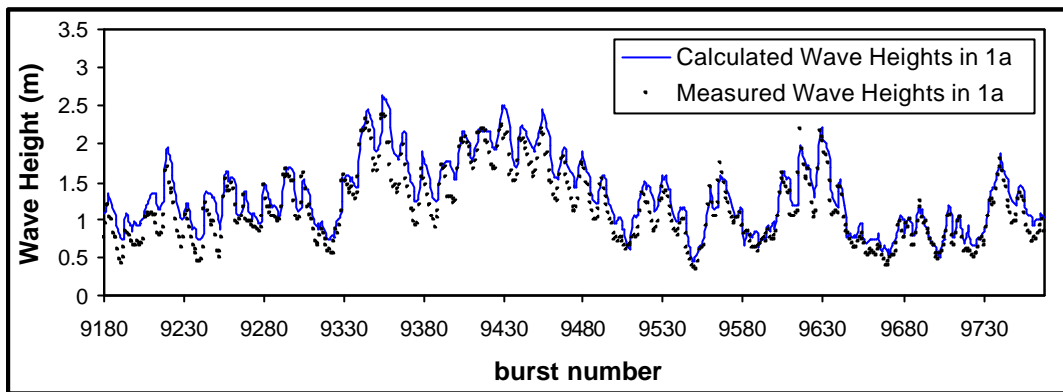


Figura 6.19.- Altura de ola, simulada (Battjes & Stive) y medida en el punto 1a.

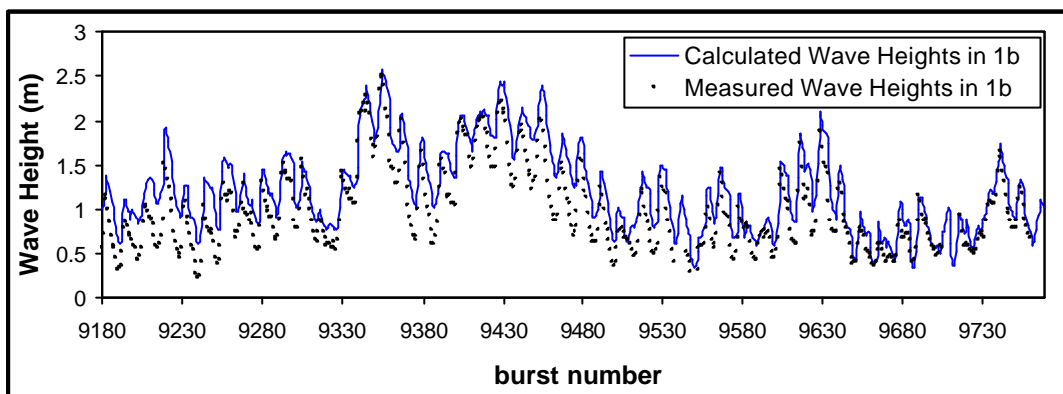


Figura 6.20.- Altura de ola, simulada (Battjes & Stive) y medida en el punto 1b.

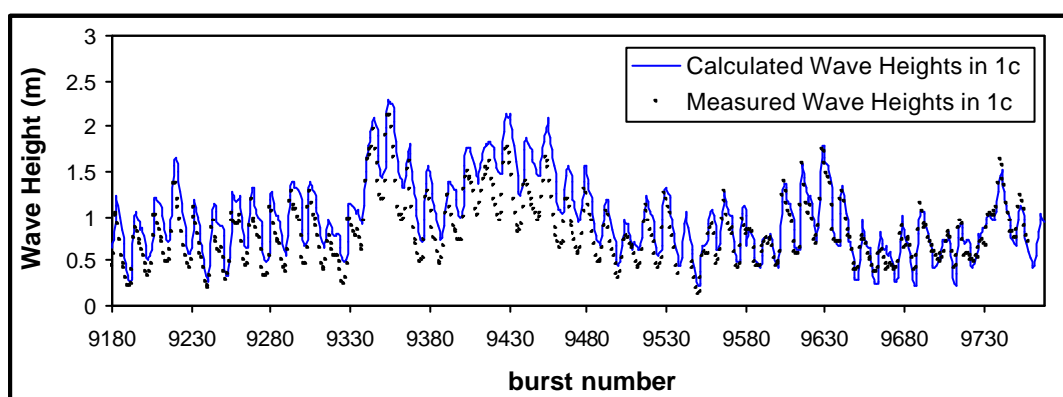


Figura 6.21.- Altura de ola, simulada (Battjes & Stive) y medida en el punto 1c.

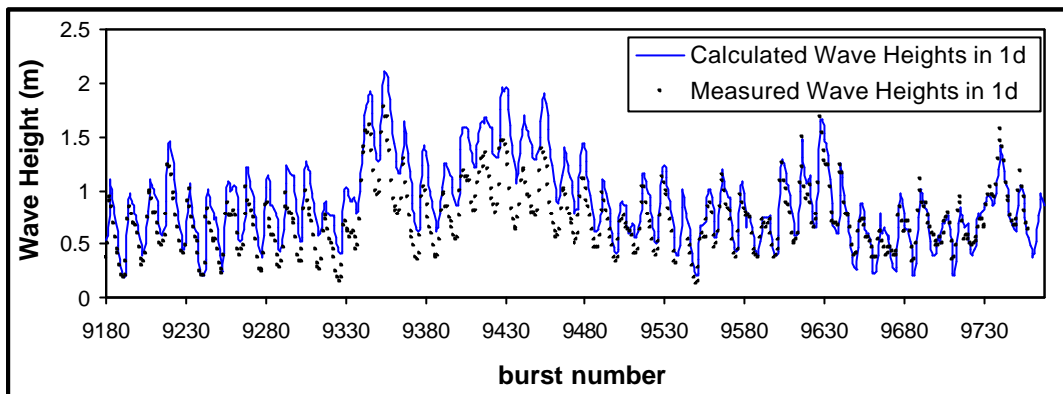


Figura 6.22.- Altura de ola, simulada (Battjes & Stive) y medida en el punto 1d.

También se ha analizado la relación entre la altura de ola medida H_m y la altura de ola calculada por el modelo H_c . Los resultados de este análisis (ver figuras 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 y 6.27) muestran que el modelo de Battjes & Stive (1984) muestra un buen desempeño en la predicción de la altura de ola sobre la barra más alejada de la costa, mientras que en los puntos más cercanos (1a, 1b, 1c y 1d) el modelo sobreestima la altura de ola.

Aún cuando en el punto 2 se obtiene un buen ajuste, se puede observar que el modelo tiene a sobreestimar las alturas de la ola cuando las olas son pequeñas.

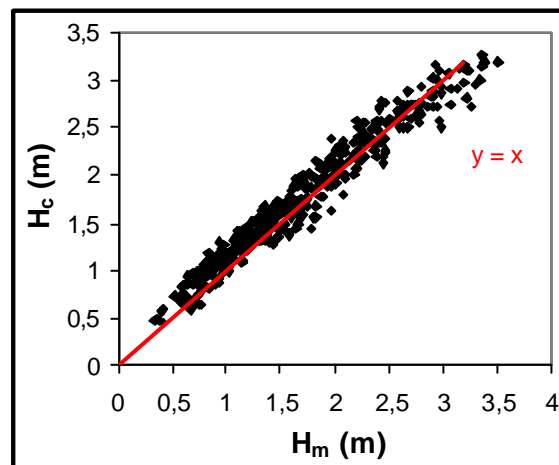


Figura 6.23.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Stive, 1984) en el punto 2.

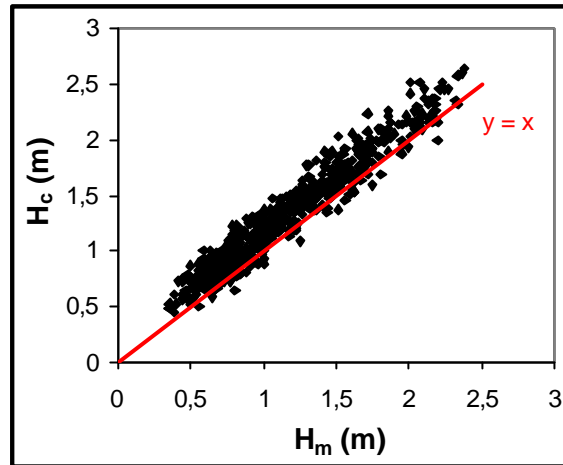


Figura 6.24.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Stive, 1984) en el punto 1a.

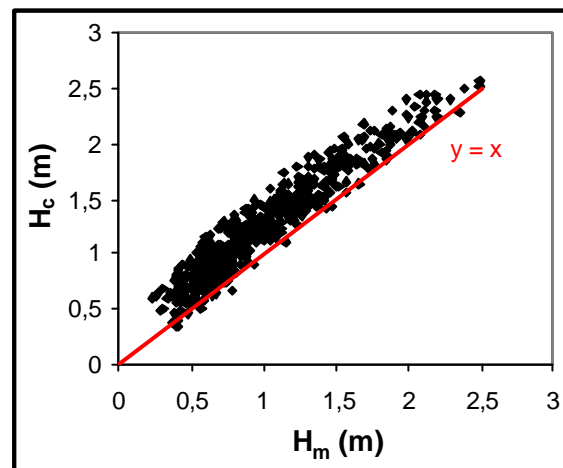


Figura 6.25.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Stive, 1984) en el punto 1b.

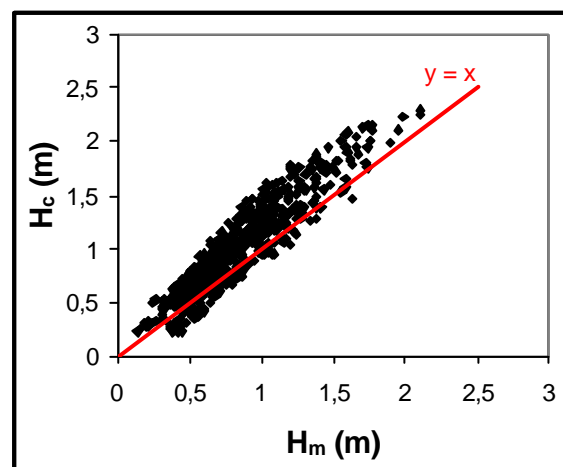


Figura 6.26.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Stive, 1984) en el punto 1c.

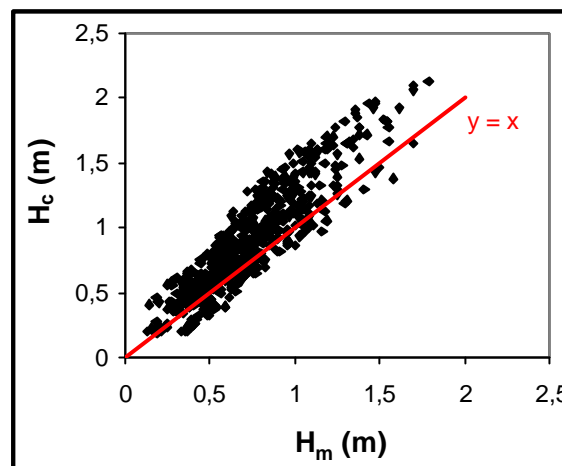


Figura 6.27.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Battjes & Stive, 1984) en el punto 1d.

De la misma manera que para el modelo de Battjes & Janssen (1978), la cuantificación de la precisión del modelo de Battjes & Stive (1984), se ha calculado el error absoluto medio relativo R_{MAE} .

Los errores obtenidos en cada uno de los puntos de medida quedan resumidos en la tabla 6.2. Aquí es posible observar que cuanto más cerca de la costa, mayor es el R_{MAE} . En comparación con el modelo de Battjes & Janssen (1978), en éste se obtienen mayores errores, salvo en el punto 2, donde contrariamente el error es menor. Por lo tanto, se puede afirmar que el modelo de Battjes & Stive (1984) mejora la simulación de la altura de la ola sobre la primera barra, en la primera rotura, mientras que la predicción del decaimiento del oleaje sobre la segunda barra da resultados más inexactos que el modelo de Battjes & Janssen (1978). De hecho era de esperar que los errores cometidos fueran mayores con el modelo de Battjes & Stive (1984), ya que el hecho de fijar el valor del parámetro $\alpha = 1$ (respecto al modelo de Battjes & Janssen) deja solamente un grado de libertad.

| Punto de medida | Número total de datos | RMAE (%) | |
|-----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| | | Battjes & Stive (1984) | Battjes & Janssen (1978) |
| 2 | 401 | 8.82 | 13.60 |
| 1a | 588 | 15.05 | 7.16 |
| 1b | 559 | 24.27 | 7.70 |
| 1c | 570 | 23.48 | 6.17 |
| 1d | 572 | 26.62 | 11.19 |

Tabla 6.2.- R_{MAE} modelo de Battjes & Stive con respecto a los puntos de medida (2, 1a, 1b, 1c y 1d).

También se ha calculado el R_{MAE} cometido para cada ola propagada en cada uno de los 5 puntos de medida. Los resultados obtenidos pueden verse en la figura 6.28. Como era de esperar, el error es mayor cuanto menor es la altura de ola significativa. En términos generales, el error en función de la altura de ola es bastante mayor en el caso de la

predicción realizada con el modelo de Battjes & Stive (1984) que en la realizada con el modelo de Battjes & Janssen (1978).

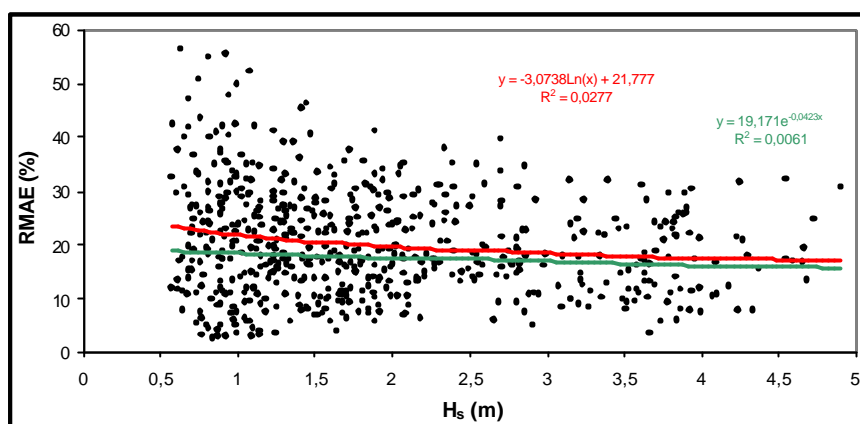


Figura 6.28.- R_{MAE} en función de la altura de ola significativa (Battjes & Stive).

En resumen, se ha aplicado el modelo de Battjes & Stive (1984), el cual describe la tasa de disipación media de la energía del oleaje irregular en aguas poco profundas sobre un rango amplio de condiciones de oleaje en una playa con la presencia de barras sumergidas. Se ha utilizado la parametrización de γ propuesta por los autores y se ha comprobado que no representa una mejor sustancial respecto al modelo de Battjes & Janssen (1978) que justifique su utilización. Además, analizando los resultados obtenidos, vale la pena mencionar que con el modelo de Battjes & Stive (1984) se obtienen valores del error R_{MAE} mayores que con el modelo de Battjes & Janssen (1978). En otras palabras, la predicción del decaimiento de la altura de ola para la playa de Egmond no ha sido tan efectiva como el modelo de Battjes & Janssen (1978), con la excepción del punto 2 (en la barra exterior), donde la predicción fue mejor (y se obtuvo un valor menor del R_{MAE}) que la realizada por el modelo de Battjes & Janssen (1978).

6.2.2.3.- Modelo de Thornton & Guza (1983)

Thornton & Guza (1983) desarrollaron un modelo para describir la transformación del oleaje irregular y la disipación de la energía durante la rotura, que es conceptualmente similar al desarrollado por Battjes & Janssen (1978).

El modelo de Thornton & Guza (1983) depende de dos parámetros, γ y B . Para el parámetro γ de rotura del oleaje, obtuvieron, a partir de observaciones de campo, un valor de 0.42. Así, de acuerdo con los autores, el único parámetro libre es B , que se espera que sea de $O(1)$, que representa la proporción de espuma en la cara de la ola rompiendo, es decir, es una medida de la intensidad de la rotura del oleaje. Para su aplicación a las medidas obtenidas en el experimento principal de la playa de Egmond (a diferencia de lo que sugieren los autores), el modelo de disipación de energía se ejecutará variando los valores de ambos parámetros.

Como en los apartados anteriores, se modelarán las medidas de campo desde el *burst* 9180 al 9768, es decir, 589 datos tomados en aguas profundas. Para cada uno de estos 589 *bursts*, mediante el modelo de Thornton & Guza (1983) se ha obtenido lo siguiente:

- i.* La mejor combinación $\gamma - B$ que ajusta los datos, y con esta combinación y a partir de los datos del oleaje en aguas profundas (H_s , T_p , nivel medio del mar y ángulo de propagación del oleaje), se ha simulado la altura de ola que debería haber en cada uno de los 5 puntos de control (2, 1a, 1b, 1c y 1d).
- ii.* La mejor B para un valor fijo de $\gamma = 0.42$. Con los valores obtenidos de B , de la misma manera que para el primer caso, se simulan las alturas de ola en cada uno de los 5 puntos de medida.

A continuación se estudia cada uno de estos dos casos.

6.2.2.3.1.- Mejor ajuste del modelo con los parámetros $\gamma - B$ libres

Para cada *burst* se ha hecho variar el valor del parámetro γ dentro del intervalo [0.3 a 1], en incrementos de 0.02, y el valor del parámetro B dentro del intervalo [0.7 a 1.7] en incrementos de 0.05. Se ha tomado como mejor combinación $\gamma - B$ la pareja de valores tales que minimicen el error entre los valores obtenidos a partir de la simulación y los valores registrados en cada uno de los 5 puntos de medida.

Los valores obtenidos para el parámetro γ aplicando el modelo de Thornton & Guza (1983) se encuentran dentro del intervalo [0.3 a 0.6], excepto en 5 *bursts* para los cuales se ha obtenido un valor de $\gamma = 1$. No obstante se puede observar una clara tendencia a valores del parámetro γ entorno a valores entre 0.3 y 0.4 (figura 6.29). Estos resultados se ajustan al valor sugerido por los autores de $\gamma = 0.42$, el cual obtuvieron a partir de sus observaciones de campo.

En cambio, para el parámetro B , se han obtenido valores que recorren todo el intervalo considerado (figura 6.29), aunque también se puede ver que predomina $B = 1.65$ (figura 6.30). En general, los valores obtenidos para el parámetro B son altos, aunque se encuentran dentro del rango esperado según Thornton & Guza (1983).

Al igual que para los resultados de los modelos de Battjes & Janssen (1978) y Battjes & Stive (1984), se buscaron posibles relaciones entre los parámetros libres del modelo y las características del oleaje y de la playa, así como con H_s/h y H_s/d , sin que se encontrara ninguna relación clara.

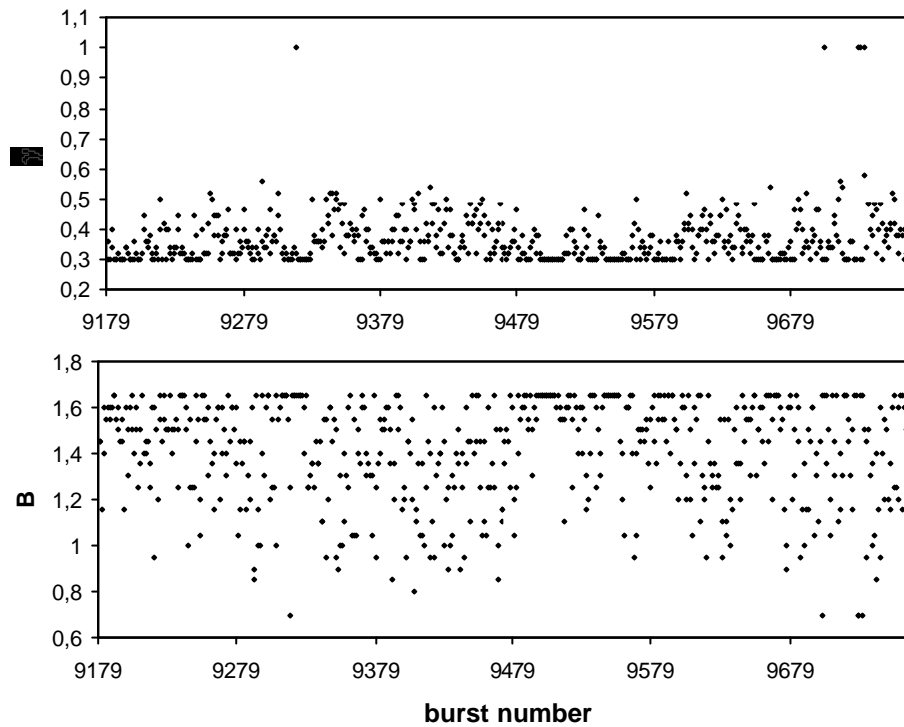


Figura 6.29.- Valores obtenidos de los parámetros γ y B .

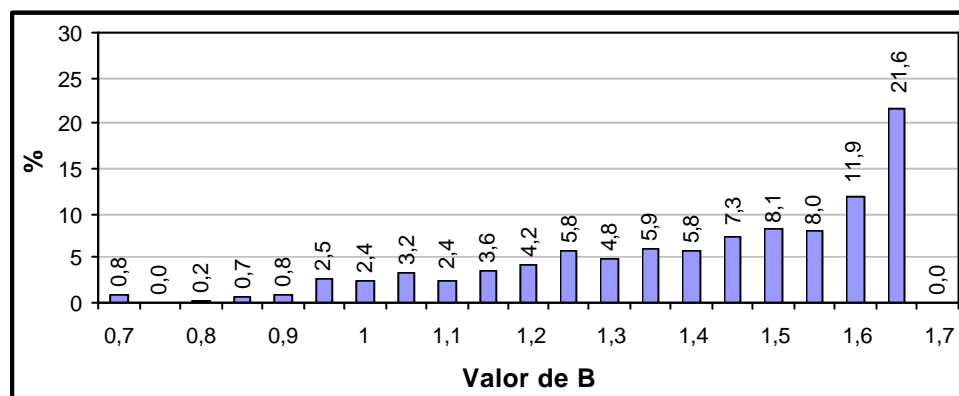


Figura 6.30.- Valores del parámetro B y el porcentaje correspondiente a cada uno de los valores obtenidos (valor de γ variable).

Para finalizar con este análisis, falta evaluar la exactitud del modelo de Thornton & Guza (1983) en la simulación de las alturas del oleaje respecto a las medidas tomadas en los 5 puntos a lo largo del perfil transversal de la playa de Egmond (2, 1a, 1b, 1c y 1d).

Como en los análisis anteriores, el modelo a convergido a una solución para cada uno de los pases realizados, es decir, en cada punto de medida se cuenta con un total de 589 datos calculados por el modelo. En las figuras 6.31, 6.32, 6.33, 6.34 y 6.35, se pueden observar los resultados de las simulaciones en comparación con las medidas realizadas en cada uno de los puntos de control. De aquí puede verse que el modelo predice relativamente bien las alturas del oleaje. En los puntos de medida 2 y 1b se tiene una

cierta tendencia a subestimar la altura de ola, mientras que en el punto 1d (el más cercano a la costa), las alturas de ola predichas por el modelo son sistemáticamente mayores a las medidas. En los puntos 1a y 1c el modelo ha dado los mejores ajustes entre las predicciones y las medidas.

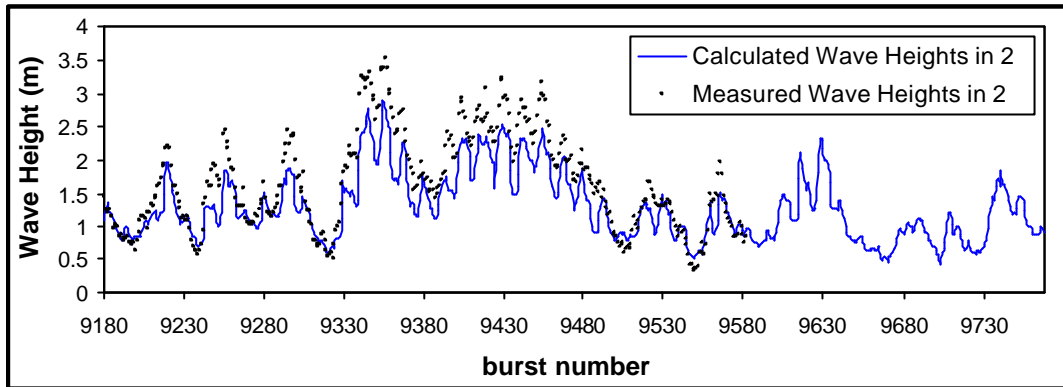


Figura 6.31.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 2.

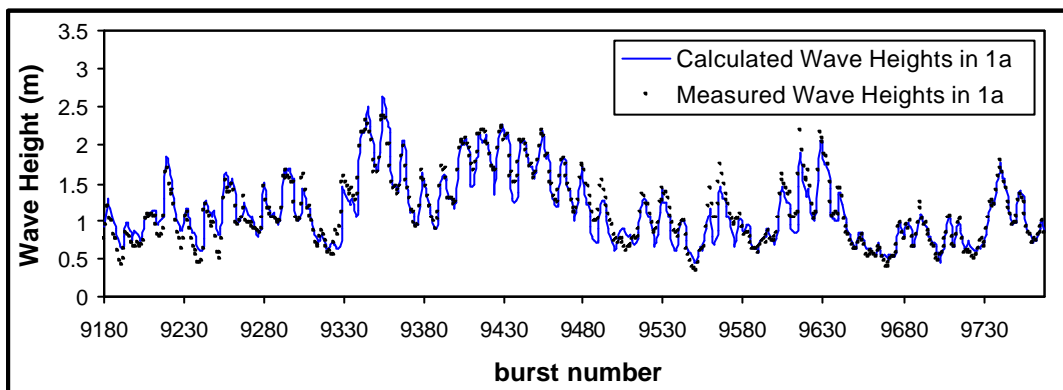


Figura 6.32.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 1a.

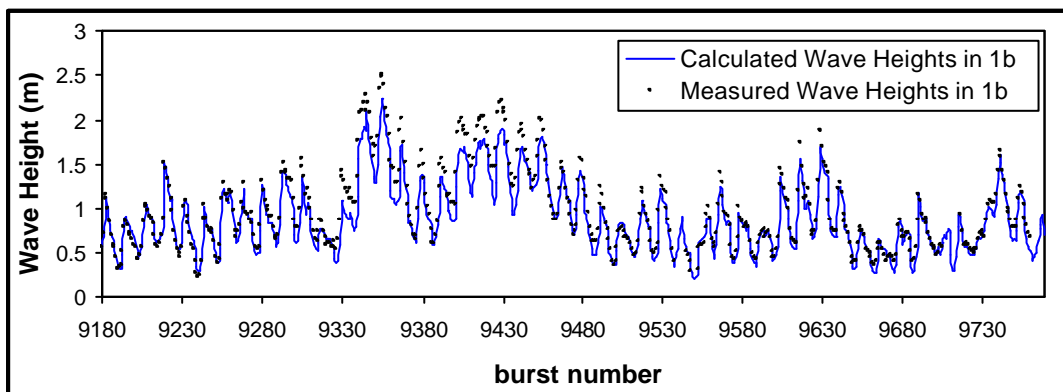


Figura 6.33.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 1b.

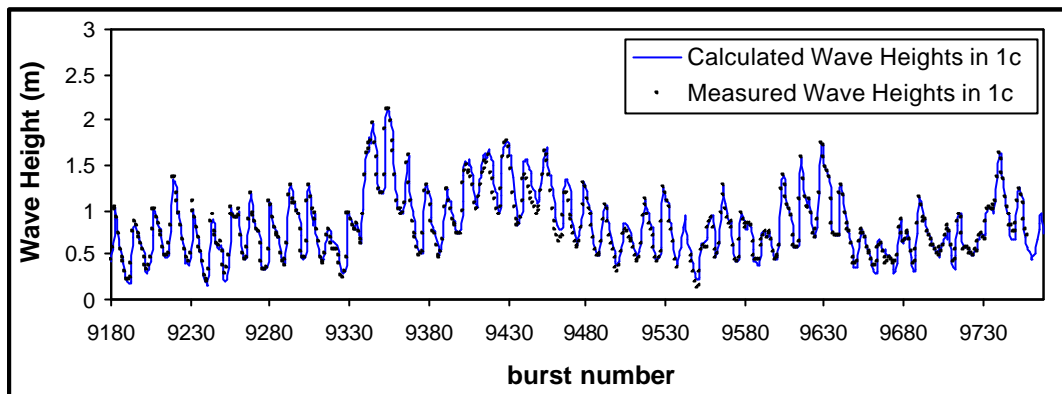


Figura 6.34.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 1c.

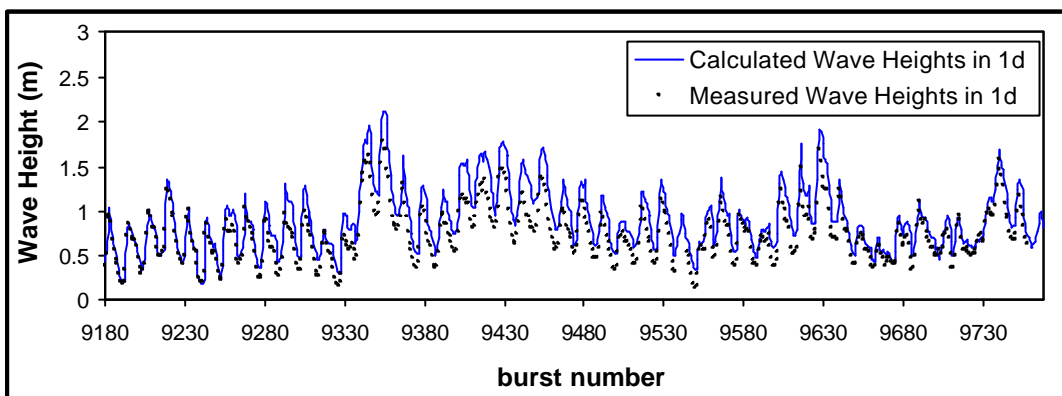


Figura 6.35.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 1d.

Por otra parte, se ha estudiado la relación entre las alturas de ola medida (H_m) y las alturas de ola calculadas por el modelo (H_c). Los resultados obtenidos de muestran en las figuras 6.36, 6.37, 6.38, 6.39 y 6.40).

De aquí puede verse que, efectivamente en el punto 2 el modelo subestima las alturas de ola, y la desviación es mayor cuanto más grande es la ola. Una situación similar puede verse en el punto 1b, pero con una desviación menor. En cambio, en los puntos 1a y 1c las predicciones se ajustan mejor a las medidas. Por último, en el punto 1d se observa una sobreestimación de las alturas de ola, tal como se había comentado anteriormente.

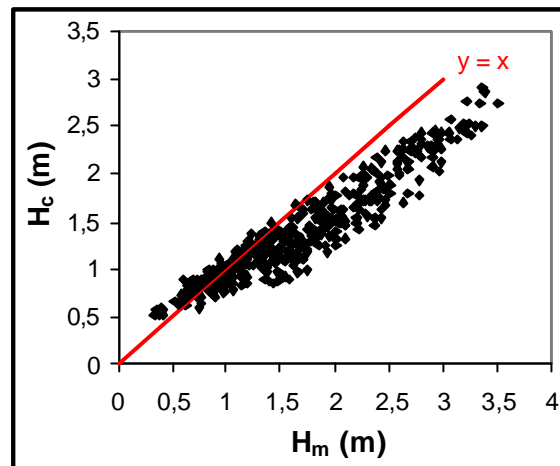


Figura 6.36.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 2.

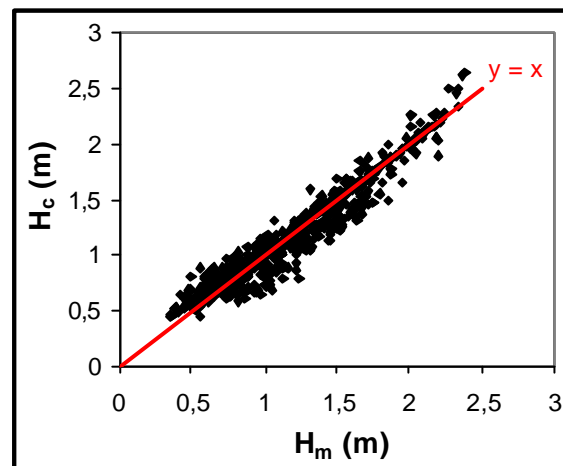


Figura 6.37.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 1a.

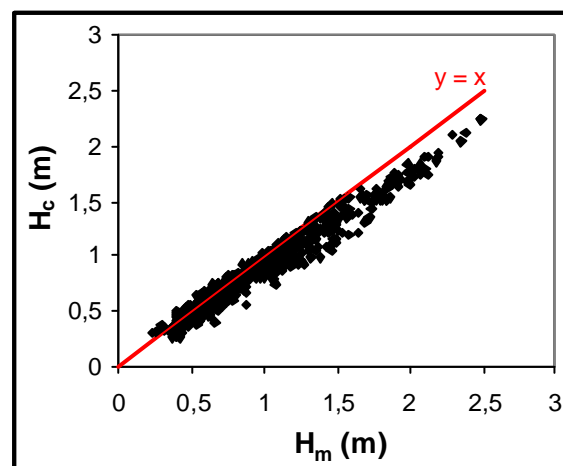


Figura 6.38.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 1b.

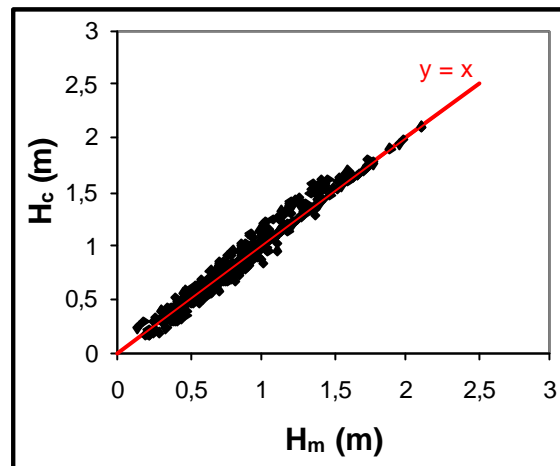


Figura 6.39.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 1c.

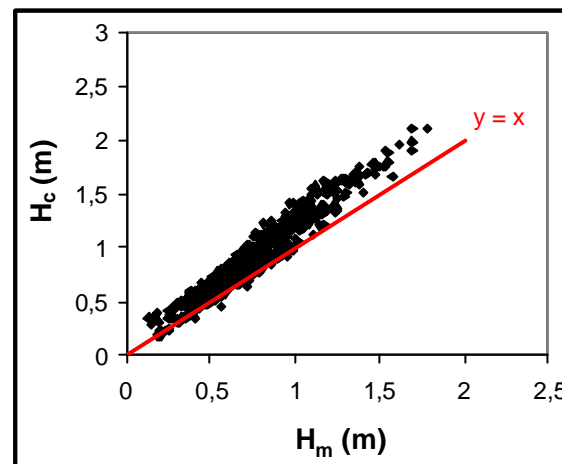


Figura 6.40.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 1d.

Al igual que se hizo con los modelos de Battjes & Janssen (1978) y Battjes & Stive (1984), se ha calculado el R_{MAE} para el modelo de Thornton & Guza (1983). En la tabla 6.3 se resumen los errores en la predicción de las alturas de ola en cada uno de los 5 puntos de medida. Como se puede observar, en los puntos 2 y 1d (los puntos más alejado y más cercano de la línea de orilla respectivamente), el error es mayor que en los puntos centrales (1a, 1b y 1c).

| Punto de medida | Número total de datos | RMAE (%) |
|-----------------|-----------------------|----------|
| 2 | 401 | 18.86 |
| 1a | 588 | 7.52 |
| 1b | 559 | 10.28 |
| 1c | 570 | 4.57 |
| 1d | 572 | 21.79 |

Tabla 6.3.- R_{MAE} modelo de Thornton & Guza con respecto a los puntos de medida (2, 1a, 1b, 1c y 1d).

De la misma manera, se ha calculado el error R_{MAE} cometido para cada altura simulada (figura 6.41) así como sus tendencias, logarítmica y lineal. Contrariamente a los resultados obtenidos en el modelo de Battjes & Janssen (1978) y Battjes & Stive (1984), no se observa una tendencia clara en la disminución del error conforme aumenta la altura de ola.

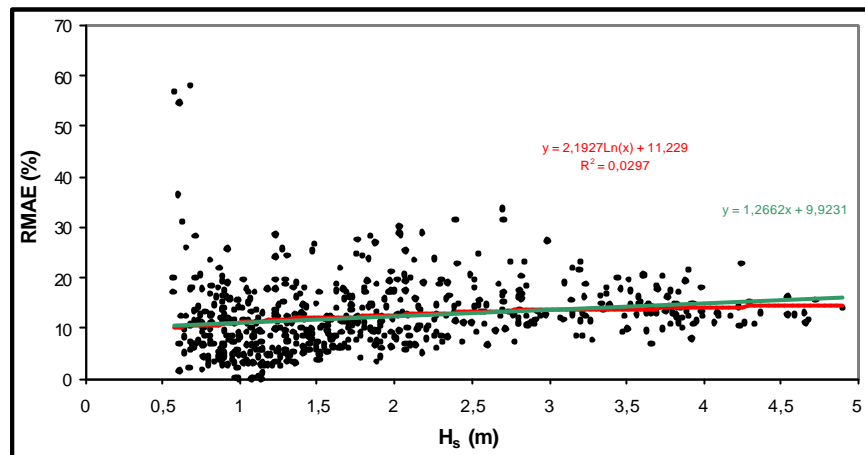


Figura 6.41.- R_{MAE} en función de la altura de ola significativa (Thornton & Guza).

Por lo tanto, el modelo de Thornton & Guza (1983), tomando valores variables del parámetro γ describe razonablemente bien el decaimiento de la altura del oleaje a través de su propagación en la zona de rompientes, excepto en los puntos más alejado y más cercano de la línea de orilla, en los cuales los errores R_{MAE} son de 18.86% y 21.79% respectivamente.

6.2.2.3.2.- Mejor ajuste del modelo con el parámetro B libre y $\gamma = 0.42$ (fijo)

Para este caso se ha ejecutado el modelo dejando fijo el valor del parámetro $\gamma = 0.42$ y dejando libre el valor del parámetro B , dentro del mismo intervalo que en el caso anterior [0.7 a 1.7], en intervalos de 0.05. Como se puede ver en la figura 6.42, para $\gamma = 0.42$, los valores obtenidos del parámetro B se encuentran en el rango [0.7 a 1.65]. Cabe destacar, no obstante, que en la mayoría de los *bursts* simulados, el parámetro B adquiere valores superiores a 1.2. Concretamente en el 60.4% de los casos se ha obtenido un valor de $B = 1.65$ (ver figura 6.43).

También se han buscado las posibles relaciones entre el parámetro B con las características del oleaje y de la playa, así como con H_s/h y H_s/d , sin que se encontrara ninguna relación clara.

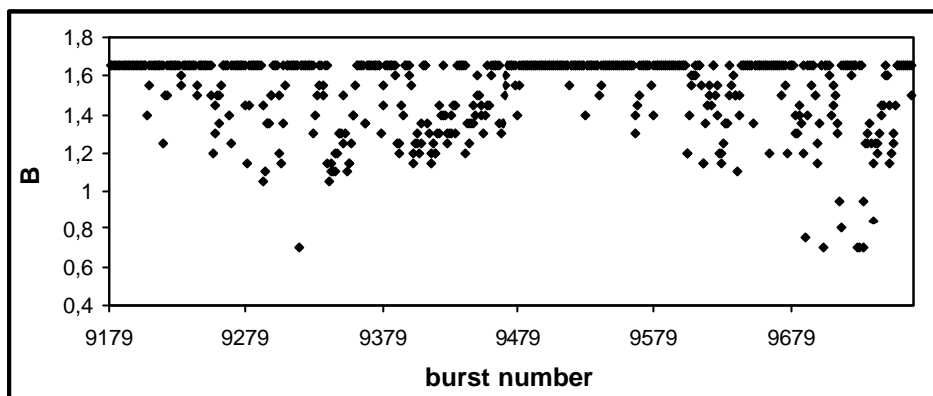


Figura 6.42.- Valores obtenidos del parámetro B para un valor fijo de $\gamma = 0.42$ (Thornton & Guza, 1983).

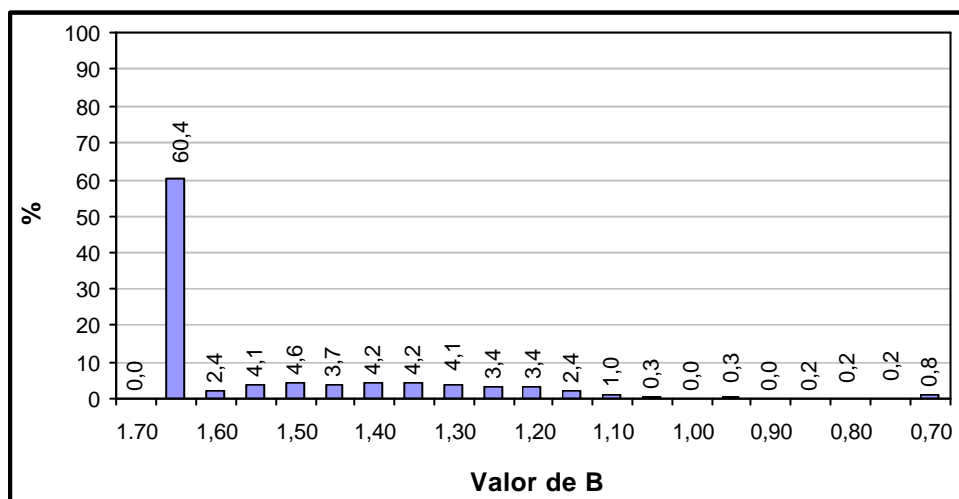


Figura 6.43.- Valores del parámetro B y el porcentaje correspondiente a cada uno de los valores obtenidos (valor de $\gamma = 0.42$ fijo).

Para finalizar el estudio del modelo de Thornton & Guza (1983), queda evaluar globalmente la precisión en la simulación de las alturas de ola respecto a las registradas en los 5 puntos de medida (2, 1a, 1b, 1c y 1d).

El programa ha convergido en todos los pases realizados, por lo que se cuenta con un total de 589 alturas de ola simuladas con el modelo en cada uno de los puntos de medida. En las figuras 6.44, 6.45, 6.46, 6.47 y 6.48 se muestran los resultados de las simulaciones en comparación con las medidas realizadas en cada uno de los 5 puntos de control. Las desviaciones del modelo de Thornton & Guza (1983) (con $\gamma = 0.42$ fijo) son cualitativamente similares a las obtenidas en el caso anterior del mismo modelo, con γ variable. En los puntos de medida 2 y 1b se puede observar una clara tendencia a subestimar la altura de la onda, mientras que en el punto 1d (el más cercano a la línea de orilla), las alturas de ola calculadas son superiores a las medidas. El ajuste en los puntos 1a y 1c son bastante mejores.

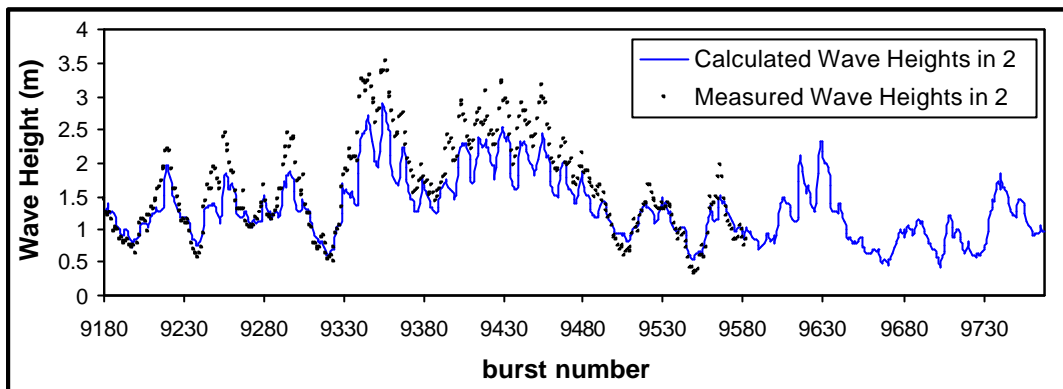


Figura 6.44.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 2 ($\gamma = 0.42$ fijo).

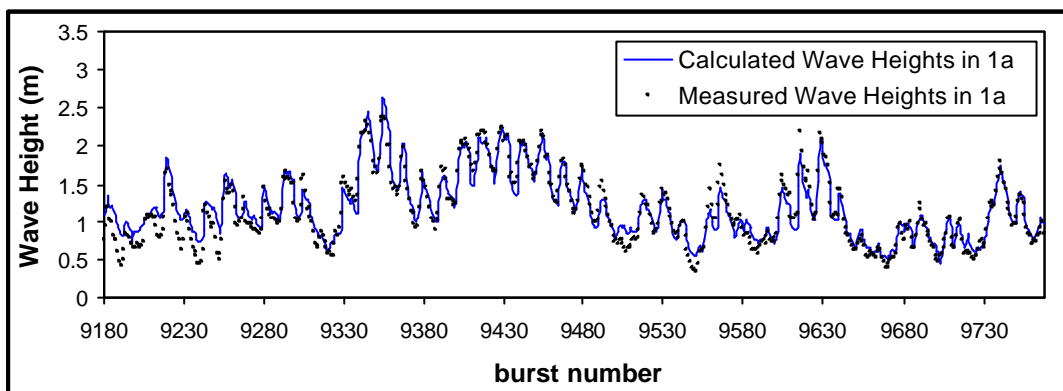


Figura 6.45.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 1a ($\gamma = 0.42$ fijo).

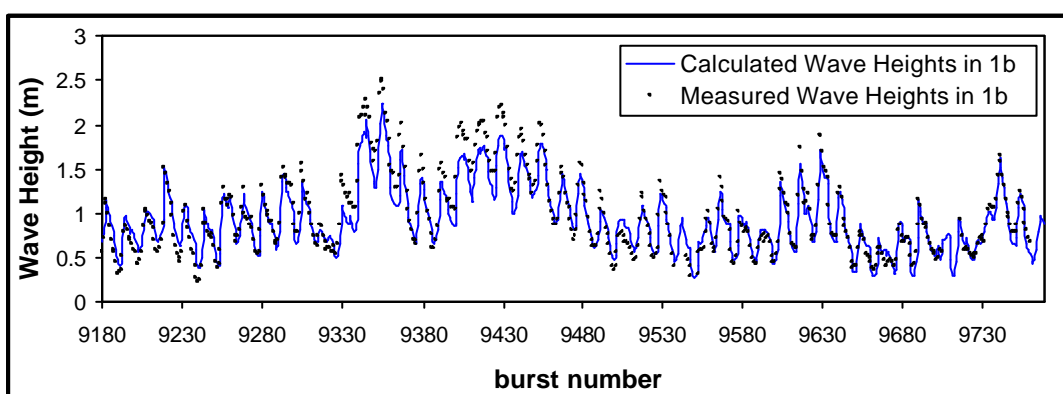


Figura 6.46.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 1b ($\gamma = 0.42$ fijo).

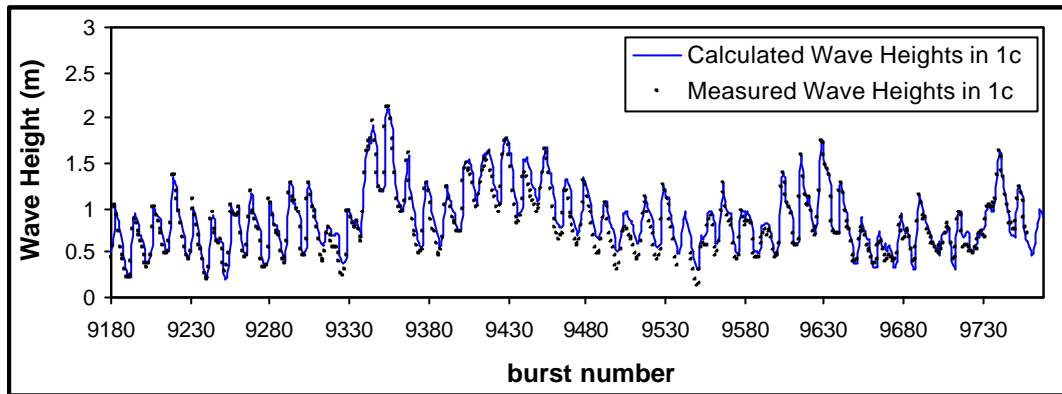


Figura 6.47.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 1c ($\gamma = 0.42$ fijo).

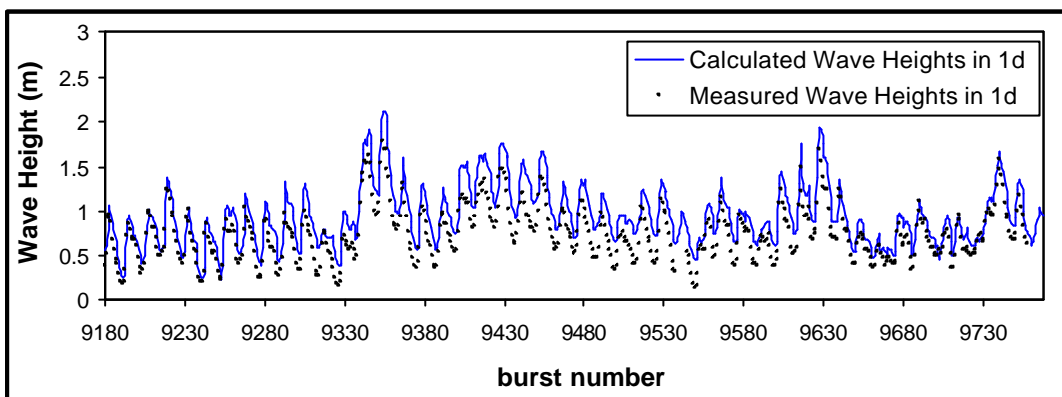


Figura 6.48.- Alturas de ola, simulada (Thornton & Guza, 1983) y medida en el punto 1d ($\gamma = 0.42$ fijo).

En las figuras 6.49, 6.50, 6.51, 6.52 y 6.53 se muestra la relación entre la altura de ola medida (H_m) y la altura de ola calculada por el modelo (H_c), donde se puede comprobar que en el punto 2 (el más alejado de la línea de orilla), el modelo subestima las alturas de ola, y la desviación es mayor cuanto más grande es la ola. Una situación similar se da en el punto 1b pero con una desviación menor. En contraste, las predicciones realizadas en puntos 1a y 1c se ajustan mucho mejor a los datos. El punto 1d (el más cercano a la línea de orilla), como se ha comentado anteriormente, las alturas de ola simuladas sobreestiman sistemáticamente los valores medidos.

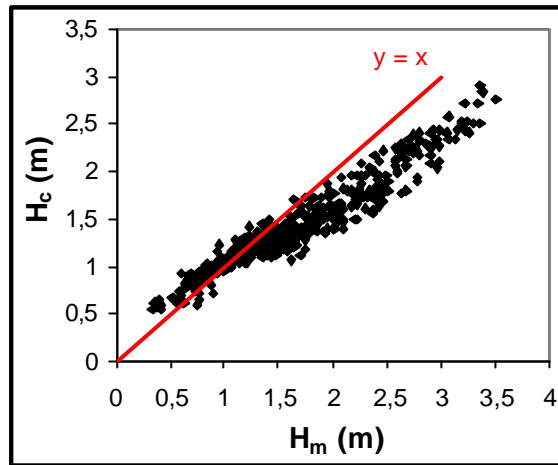


Figura 6.49.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 2 ($\gamma = 0.42$ fijo).

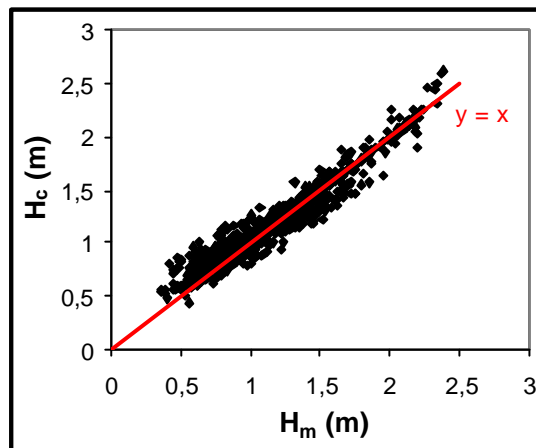


Figura 6.50.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 1a ($\gamma = 0.42$ fijo).

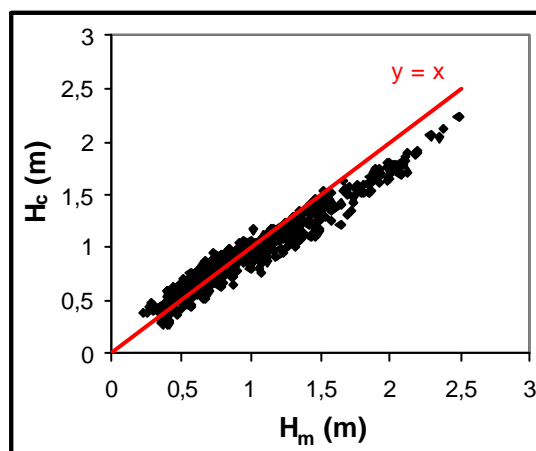


Figura 6.51.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 1b ($\gamma = 0.42$ fijo).

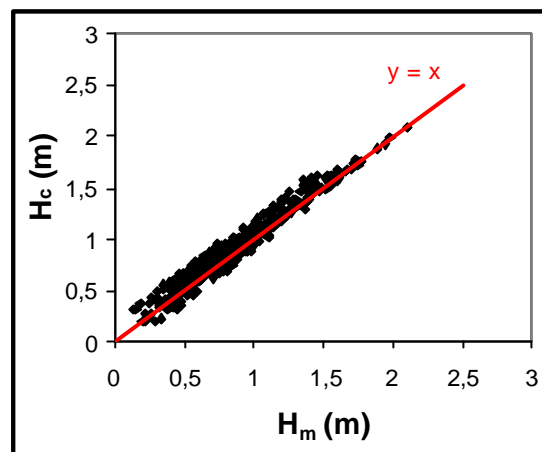


Figura 6.52.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 1c ($\gamma = 0.42$ fijo).

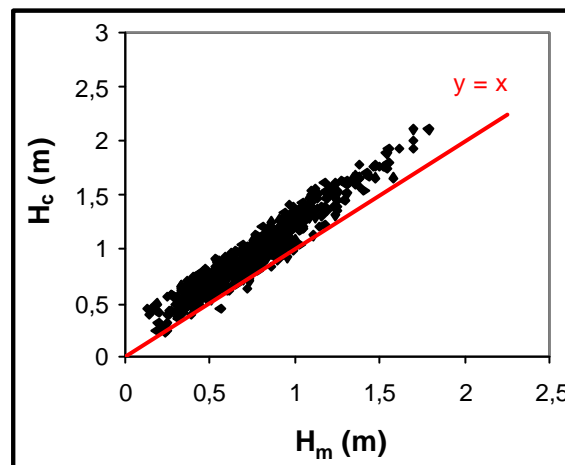


Figura 6.53.- Comparación alturas de ola medidas vs. calculadas (Thornton & Guza, 1983) en el punto 1d ($\gamma = 0.42$ fijo).

Como ya se ha hecho en los puntos anteriores, el siguiente paso a partir de aquí es cuantificar la precisión del modelo de Thornton & Guza (1983) (con $\gamma = 0.42$ fijo) mediante la estimación del R_{MAE} . En la tabla 6.4 se resumen los errores en la predicción de la simulación de las alturas de ola a través de la zona de rompientes en cada uno de los puntos de medida. Como se puede observar, en los puntos 2 y 1d (el más alejado y cercano a la línea de orilla respectivamente) el error es mayor que en el resto de los puntos, resultado que coincide con el que se ha obtenido en el caso anterior, donde el parámetro γ era variable. También es interesante notar que la predicción es más precisa en este modelo cuando el parámetro γ permanece variable. Esto no es raro, teniendo en cuenta que se ha dejado un grado de libertad menos en el caso de dejar fijo el valor del parámetro $\gamma = 0.42$. No obstante, cabe destacar que cuando se fija el valor de $\gamma = 0.42$, la predicción de la altura de ola sobre la barra exterior (mas alejada de la línea de orilla) es ligeramente mejor que cuando se deja el valor del parámetro γ variable.

| Punto de medida | Número total de datos | RMAE (%) $g = 0.42$ | RMAE (%) g variable |
|-----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| 2 | 401 | 17.44 | 18.86 |
| 1a | 588 | 8.42 | 7.52 |
| 1b | 559 | 10.79 | 10.28 |
| 1c | 570 | 7.61 | 4.57 |
| 1d | 572 | 27.05 | 21.79 |

Tabla 6.4.- R_{MAE} modelo de Thornton & Guza con respecto a los puntos de medida (2, 1a, 1b, 1c y 1d) con $\gamma = 0.42$ fijo.

De la misma manera se ha calculado el error R_{MAE} cometido para cada dato simulado. Los valores resultantes pueden verse en la figura 6.54 junto con las líneas de tendencia logarítmica y exponencial.

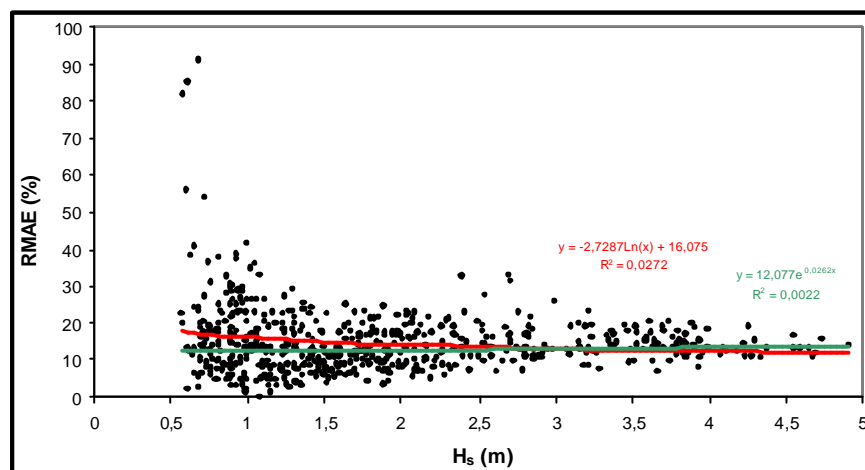


Figura 6.54.- R_{MAE} en función de la altura de ola significativa (Thornton & Guza) con $\gamma = 0.42$ fijo.

En general, el modelo de Thornton & Guza (1983) con $\gamma = 0.42$ describe razonablemente bien la transformación de la altura de ola dentro de la zona de rompientes excepto en los puntos 2 y 1d, donde el R_{MAE} es de 17.44% y 27.05% respectivamente. En comparación con las simulaciones dejando variables los parámetros γ y B , en términos generales, fijar el valor de γ supone una disminución en la precisión de las predicciones del decaimiento de altura de ola en la zona de rompientes.

6.2.3.- Análisis de resultados

Una vez analizados cada uno de los modelos de disipación de energía por rotura del oleaje irregular, se realizará un análisis comparativo de los modelos descritos y evaluar cual de ellos predice mejor el decaimiento de la altura de ola en la zona de rompientes

de la playa de Egmond aan Zee. Esto se llevará a cabo analizando los parámetros libres de los modelos y comparando los R_{MAE} cometidos en la simulación de la altura de ola. Finalmente se realizará un análisis comparativo de la predicción de la transformación de la altura de olas en la zona de rompientes obtenida por cada uno de los modelos de disipación.

6.2.3.1.- Parámetros de los modelos de disipación

Cada uno de los modelos de disipación estudiados considera dos parámetros de ajuste, aunque en dos casos (Battjes & Stive, 1984 y Thornton & Guza, 1983) se dejan fijos los valores de los parámetros α y γ respectivamente. Aún así, es interesante desvelar si los valores obtenidos con un modelo son comparables con los valores sugeridos por los autores. En la tabla 6.5 se indican los parámetros de los modelos y los intervalos en los cuales oscilan los valores obtenidos por cada uno de estos parámetros ajustables.

El parámetro α es un coeficiente que según Battjes & Janssen (1978) debe ser de $O(1)$. En el proceso de calibración del modelos, los valores obtenidos de α se encuentran, en la gran mayoría de los casos simulados, dentro del intervalo [1.2 a 1.6], es decir, se obtienen valores ligeramente mayores que el valor propuesto por los autores. En cambio, el modelo de Battjes & Stive (1984) presupone un valor fijo de $\alpha = 1$, por lo que este modelo finalmente sólo tiene un parámetro de ajuste (no fijo) que depende de las condiciones del oleaje en aguas profundas.

El parámetro γ , común en todos los modelos, oscila en todos los casos, en rangos muy similares. Con el modelo de Battjes & Janssen (1978) se obtienen valores algo dispersos, pero con el modelo de Battjes & Stive (1984), los valores quedan más restringidos y dentro del intervalo [0.58 a 0.77]. Con el modelo de Thornton & Guza (1983) se obtienen valores ligeramente inferiores respecto a los mejores ajustes obtenidos con los modelos de Battjes & Janssen (1978) y Battjes & Stive (1984), pero se aproximan al valor sugerido por los autores de $\gamma = 0.42$.

| Modelo \ Parámetro | Battjes&Janssen (1978) | Battjes&Stive (1984) | Thornton&Guza (1983) | Thornton&Guza (1983) ($g = 0.42$) |
|--------------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| α | [1.20,1.60] | 1 (fijo) | - | - |
| γ | [0.50,1.30] | [0.58,0.77] | [0.3,0.6] | 0.42 (fijo) |
| B | - | - | [1.2,1.6] | [1.65,1.65] |

Tabla 6.5.- Parámetros libres de los modelos de disipación estudiados.

6.2.3.2.- Precisión de los modelos analizados

En la tabla 6.6 se resumen los errores R_{MAE} resultantes de la simulación de alturas de ola en cada uno de los puntos de medida (2, 1a, 1b, 1c y 1d) (figura 6.4).

| Punto de medida | Número total de datos | R_{MAE} (%) | | R_{MAE} (%) | |
|-----------------------|-----------------------|---------------|-------|---------------|---------------|
| | | B & J | B & S | Th & G | Th & G (0.42) |
| 2 | 401 | 13.60 | 8.82 | 18.86 | 17.44 |
| 1a | 588 | 7.16 | 15.05 | 7.52 | 8.42 |
| 1b | 559 | 7.70 | 24.27 | 10.28 | 10.79 |
| 1c | 570 | 6.17 | 23.48 | 4.57 | 7.61 |
| 1d | 572 | 11.19 | 26.62 | 21.79 | 27.05 |
| Error R_{MAE} medio | | 9.16 | 19.65 | 12.60 | 14.26 |

Tabla 6.6.- Errores R_{MAE} resultantes de la simulación de alturas de ola en los puntos de medida.

En el punto 2 el mejor ajuste ha sido logrado por el modelo de Battjes & Stive (1984), con un R_{MAE} del 8.82%, que es un error bastante menor que el obtenido por los otros modelos, siendo el que consigue la predicción con más error el modelo de Thornton & Guza (1983).

Sobre la segunda barra (mas cercana a la costa), el modelo de Battjes & Janssen (1978) es el que alcanza una mayor precisión en la simulación de las alturas de ola, con un R_{MAE} en torno al 7%, que contrasta notablemente con el modelo de Battjes & Stive (1984) que tiene un R_{MAE} mucho mayor de 26.6%. El modelo de Thornton & Guza (1983), tanto para la barra exterior como para la barra interior da buenos resultados, pero con errores ligeramente superiores a los que da el modelo de Battjes & Janssen (1978). Así, en general, el modelo con el que se consigue una mejor predicción del decaimiento de la altura del oleaje a través de la zona de rompientes de la playa de Egmond (es decir, un mejor ajuste entre las simulaciones y las medidas) es el modelo de Battjes & Janssen (1978). En la tabla 6.7 se resumen las tendencias de las predicciones del modelo, es decir, la sobreestimación o subestimación de los cálculos con respecto a las medidas de campo. Cabe destacar que, sobre la barra exterior, todos los modelos de disipación estudiados tienden a subestimar las alturas de ola, mientras que sobre la barra interior (mas próxima a la línea de orilla), la tendencia general de los modelos estudiados es a sobreestimar las alturas de ola, con la excepción concreta del punto 1b (justo después de la segunda rompiente) para el cual el modelo de Thornton & Guza (1983) la subestima.

| Punto de medida | B & J | B & S | Th & G | Th & G (0.42) |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 2 | subestima | - | subestima | subestima |
| 1a | - | sobreestima | - | - |
| 1b | - | sobreestima | subestima | subestima |
| 1c | - | sobreestima | - | - |
| 1d | sobreestima | sobreestima | sobreestima | sobreestima |

Tabla 6.7.- Tendencias en las predicciones de la altura de ola de los modelos evaluados.

6.2.3.3.- Predicción del decaimiento de la altura de ola en la zona de rompientes

En las figuras 6.55, 6.56, 6.57, 6.58, 6.59 y 6.60 se han representado las predicciones del decaimiento de la altura del oleaje en la zona de rompientes obtenida por cada modelo sobre el perfil transversal de la playa de Egmond para 6 *bursts* diferentes.

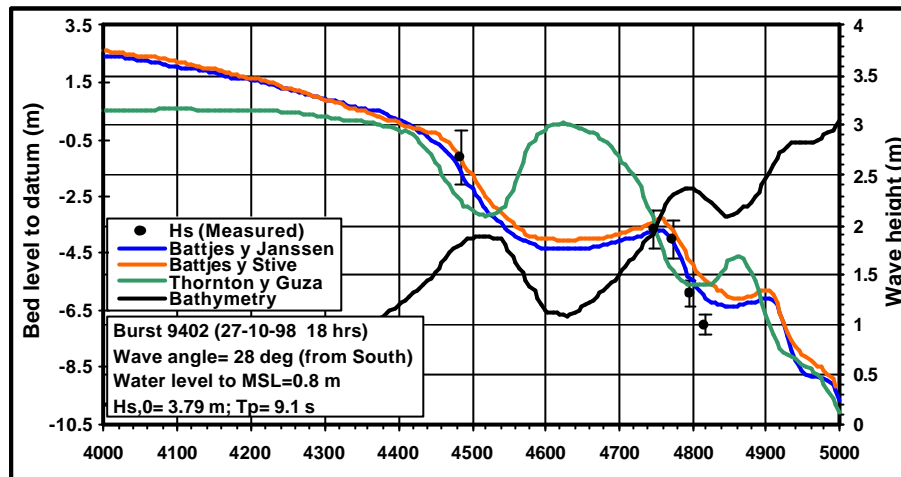


Figura 6.55.- Predicción del decaimiento de la altura de ola para el *burst* 9402.

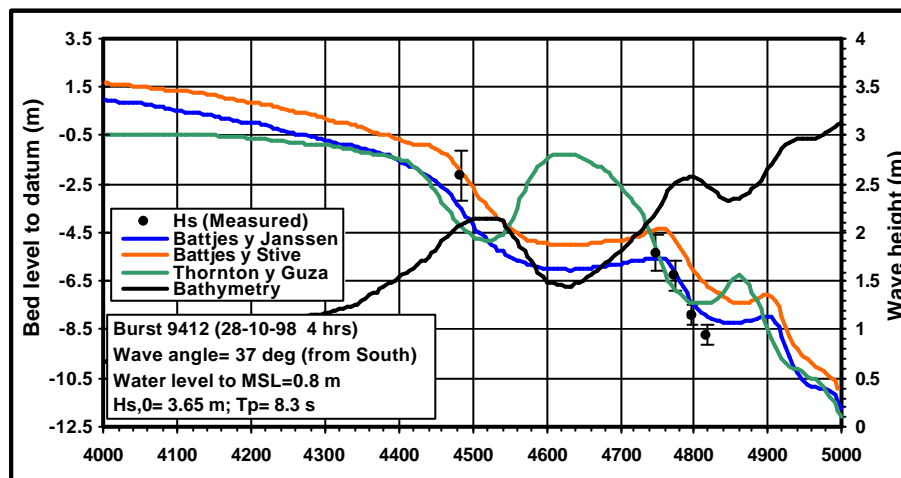
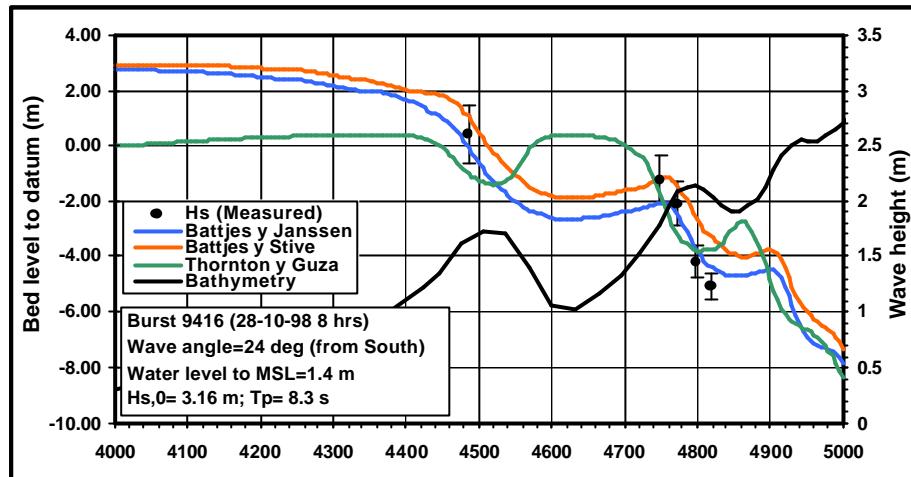
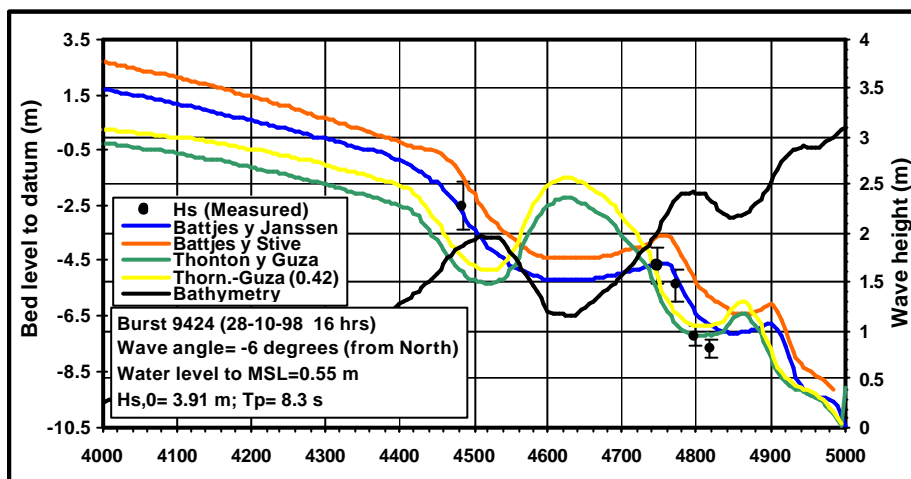
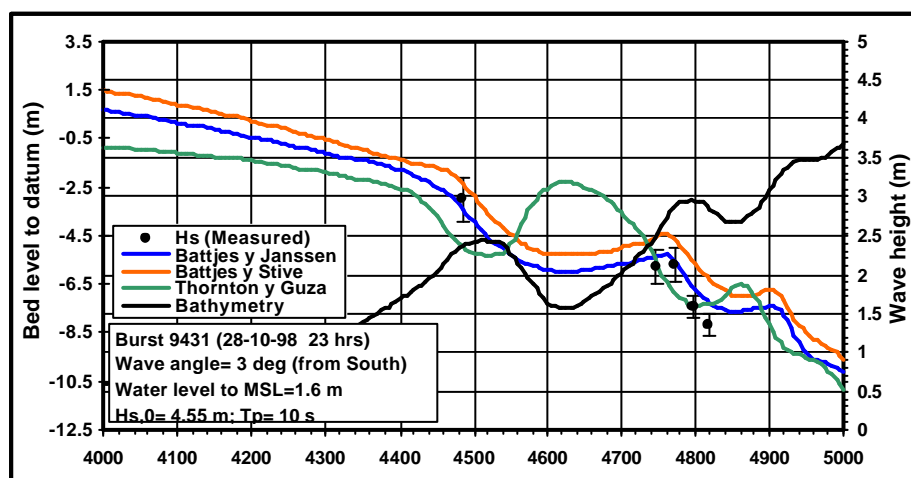


Figura 6.56.- Predicción del decaimiento de la altura de ola para el *burst* 9412.

Figura 6.57.- Predicción del decaimiento de la altura de ola para el *burst* 9416.Figura 6.58.- Predicción del decaimiento de la altura de ola para el *burst* 9424.Figura 6.59.- Predicción del decaimiento de la altura de ola para el *burst* 9431.

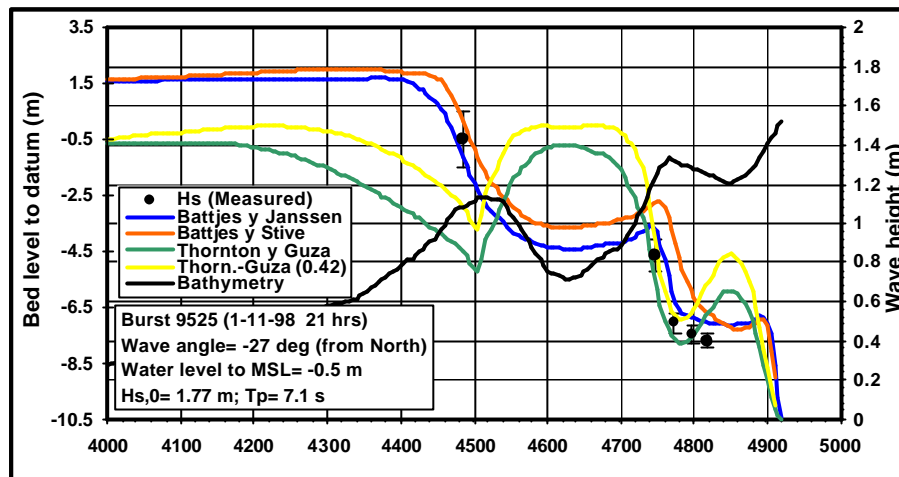


Figura 6.60.- Predicción del decaimiento de la altura de ola para el *burst* 9525.

De estas figuras se puede observar como los modelos de Battjes & Janssen (1978) y Battjes & Stive (1984) predicen un decaimiento de la altura de ola similar. No obstante, cabe destacar el hecho de que ambos modelos dan envolventes prácticamente paralelas. Las alturas de ola obtenidas por el modelo de Battjes & Stive (1984) son siempre superiores a las que predice el modelo de Battjes y Janssen (1978), además de que este último realiza unas predicciones con un mejor ajuste con los datos de campo.

Comparando los resultados obtenidos con los modelos de Thornton & Guza (1983), con α y B variables y con $\gamma = 0.42$ fijo, se observa que en la mayoría de los casos ofrecen la misma curva de decaimiento de alturas, aunque cuando se deja fijo el valor de $\gamma = 0.42$, la tendencia del modelo es a dar valores ligeramente más altos, con un mejor ajuste en los puntos más profundos, y una sobreestimación en los puntos más cercanos a la costa.

Hay una característica que diferencia marcadamente los distintos modelos de disipación analizados en esta tesis: la simulación de la altura de ola en el tramo del seno entre las dos barras sumergidas. Las olas, después de romper sobre la primera barra, se reforman (al encontrarse en una zona más profunda), y en su propagación hacia la línea de orilla pueden volver a crecer (aumentar su altura).

Se puede observar que el modelo de Thornton & Guza (1983) predice (justo después de las barras, tanto la exterior como la interior) un aumento de la altura de ola muy superior a los modelos de Battjes & Janssen (1978) y Battjes & Stive (1984). Dado que no se disponen de datos medidos en estas regiones, no se puede hacer una comparación con medidas reales, pero cabe destacar que, en cualquier caso, el modelo de Thornton & Guza (1983) parece sobreestimar la altura del oleaje reformado después de romper sobre una barra.

Por otra parte, también cabe destacar que sobre la primera barra, el modelo de Thornton & Guza (1983) sobreestima la disipación de la energía del oleaje, ya que es el que da las alturas de ola más bajas, y el modelo de Battjes & Stive (1984), pero sobre todo, el de

Battjes & Janssen (1978) son los que dan una predicción mucho más ajustada a la realidad.

En lo que se refiere a la simulación del decaimiento de la altura de ola sobre la segunda barra, también es el modelo de Battjes & Janssen (1978) el que proporciona mejores resultados, aunque justo donde comienza la segunda rotura (en el punto 1a), aparentemente la mejor predicción la proporciona el modelo de Thornton & Guza (1983).

Por lo tanto en líneas generales, en el caso concreto de la playa de Egmond aan Zee, bajo las condiciones dominantes durante los experimentos de campo del proyecto COAST3D, el modelo que mejor predice la disipación de la energía y las alturas de ola a lo ancho de la zona de rompientes es el modelo de Battjes & Janssen (1978).

6.3.- Incertidumbres del modelado numérico hidromorfodinámico en la zona cercana a la costa

El cuidado de la integridad física y natural de la zona cercana a la costa y la toma de decisiones adecuadas para tal objeto requieren necesariamente del conocimiento de los fenómenos físicos que ahí tienen lugar. Los fenómenos más importantes que influyen en la dinámica de la zona costera son el oleaje, las corrientes y el efecto que ambos pueden tener en la evolución del fondo y la configuración de la línea de orilla. En consecuencia, es necesario conocer las características de estos factores y poder predecir su evolución. Sin embargo, estos procesos son muy dinámicos y las relaciones que guardan entre ellos son complejas y altamente no lineales y variables en el tiempo (varias escalas espaciales y temporales), entre los que destacan la acción de las olas, las corrientes, la interacción entre olas y corrientes, el transporte de sedimentos y los cambios en la topografía del fondo marino. Esto es especialmente cierto en la zona de rompientes, donde hay una gran y compleja disipación de energía que produce cambios muy significativos en el perfil del fondo.

La cuantificación y predicción de estos procesos es una de las tareas más complejas en los campos de la ingeniería y la oceanografía costera. Como se ha comentado a lo largo de esta tesis, existen 2 grandes campos de estudio en esta disciplina, el experimental (medidas de campo) y el modelado numérico. El campo experimental tiene como ventaja con respecto al campo del modelado numérico, que permite la obtención directa de los parámetros de estudio (siempre que se disponga de la capacidad logística, tecnológica y humana). En contrapartida, medir en campo es complejo y muy costoso. El campo numérico tiene a su vez ventajas con respecto al campo experimental. Se pueden simular dominios más grandes y (siempre que el modelo haya sido adecuadamente calibrado y validado) bajo muchos escenarios distintos y a un costo mucho más pequeño que los estudios experimentales. No obstante, una limitación enorme en el campo del modelado numérico consiste en el propio método de estudio, pues por lo regular los modelos numéricos se basan en suposiciones altamente simplificadas con respecto a situaciones naturales. Las ecuaciones, además de no describir la totalidad de los procesos involucrados, se tienen que resolver en mallas discretas (no continuas) y aceptando que los propios métodos de resolución numérica de dichas ecuaciones arrastran un cierto error en cada iteración, muchas de las predicciones

realizadas con modelos numéricos tienen, como mínimo, un grado de incertidumbre nada despreciable.

En este apartado se evalúa el desempeño de diversos modelos que simulan los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos. En este modelo (descrito más ampliamente en el capítulo 5) se diferencian dos “grandes módulos”. En el primero, se considera que el fondo marino permanece invariante, y con esta hipótesis se determinan los cambios en el oleaje y la corriente longitudinal inducida por la rotura, tomando distintos valores de los parámetros hidrodinámicos escogidos. Éstos son básicamente el ángulo de propagación del oleaje, el periodo, los parámetros α y γ del modelo de rotura del oleaje irregular de Battjes & Janssen (1978), el nivel del mar, el flujo de masa, la disipación por fricción de fondo y la viscosidad turbulenta. Las representaciones de los fenómenos hidrodinámicos obtenidas se comparan con los datos de campo obtenidos en la playa holandesa de Egmond aan Zee por el proyecto COAST3D en 1998. En el segundo módulo se considera que las condiciones hidrodinámicas permanecen estacionarias y, teniendo en cuenta la divergencia del transporte de sedimentos, se evalúan los cambios en la topografía del fondo. Los parámetros escogidos para observar su influencia en la morfodinámica son el tiempo de paso en el cálculo numérico (Δt), el diámetro del sedimento, los parámetros A_w y A_c de la fórmula de transporte de sedimentos de Watanabe (1982) y el parámetro ε que indica el efecto de la pendiente del fondo.

Como se mencionó en el capítulo 5, los cambios en el fondo, en cuanto son lo bastante significativos, afectan a las condiciones hidrodinámicas, por lo que se recalcula ésta para poder seguir evaluando adecuadamente la evolución morfodinámica.

Finalmente, se realiza un análisis combinado de la influencia de los parámetros hidrodinámicos y morfodinámicos. Los parámetros escogidos para representar las variaciones que producen en la batimetría son α y γ del modelo de rotura del oleaje irregular de Battjes & Janssen (1978), por separado y combinando sus valores con mayor y menor error, la viscosidad turbulenta, γ junto con la viscosidad turbulenta, con ε y con A_w y la viscosidad turbulenta combinada con ε y con A_w .

6.3.1.- Análisis de sensibilidad de los parámetros hidrodinámicos

La pregunta de “que tan bueno es un modelo” debe definirse en un sentido más cuantitativo que la usual calificación cualitativa (excelente, bueno, razonable o pobre) que normalmente se aplica al desempeño del modelo. No obstante, es imposible obtener ninguna conclusión objetiva sin un adecuado análisis de sensibilidad del modelo y de sus errores inherentes, así como de la calidad de los datos medidos, ya que estos nunca son perfectos y también contienen una forma de error.

En este punto se estudia el efecto en la hidrodinámica de la modificación de las diferentes variables que intervienen en el problema. Para ello se ha hecho variar cada uno de los parámetros individualmente y con los distintos valores obtenidos se han representado gráficamente la altura de ola (H) y la corriente longitudinal (ψ/l). Las gráficas en conjunto presentan una tendencia similar influida por la batimetría, ya que un cambio en la pendiente del fondo hace cambiar la pendiente de las gráficas.

En las simulaciones de la propagación del oleaje y las corrientes longitudinales se observa una clara influencia de la profundidad sobre la altura de ola. Este efecto de la batimetría sobre H no es instantáneo, sino que hay un cierto “retardo”, con lo que al aproximarse la costa, primero varía la pendiente del fondo y luego (en media, unos 50 m después) es cuando la H se ve afectada.

De manera general, se observa un punto de disminución de la altura de ola H justo después del pie de la barra exterior (a unos 560 m de la costa) junto con un aumento del valor de v/l . Justo después de la cresta de la primera barra se observa un ligero incremento de H (la ola se reforma) y una disminución de v/l hasta encontrarse con la barra interior, donde se repite el mismo fenómeno observado en la barra exterior, es decir, una disminución de H (y aumento de v/l) sobre la cresta de la barra y un ligero aumento de H (reforma de la ola) y disminución de v/l sobre el seno de la barra. Finalmente, a partir de este punto, la altura de ola decrece paulatinamente (de manera más brusca cuanto mayor es la pendiente del fondo). No obstante, a partir de este punto, la magnitud de la corriente no aumenta con la disminución de H , ya que hay cada vez menos profundidad y los efectos de la fricción son más importantes.

Una vez identificada esta tendencia común de todas las simulaciones, se analizan los detalles concretos para cada pase, según el parámetro que se ha evaluado. En lo que sigue, para hablar de la fiabilidad de los resultados (representados gráficamente) se analizarán las diferencias entre los distintos resultados dados por el modelo (la separación entre las gráficas) de los valores de H y v/l (en función del ajuste de los distintos parámetros de entrada del modelo). Así, a mayor distancia entre las gráficas, se tiene una mayor sensibilidad de las variables representadas a determinados parámetros de entrada del modelo. En principio, es de esperar que mientras más robusto sea el modelo, se produzcan cambios pequeños a alteraciones de los parámetros de entrada, de tal manera que los resultados no sean muy diferentes. La separación se valorará de forma gráfica, indicando sus máximos valores, especialmente a distancias mayores de 550 m de la costa, ya que no se dispone de sensores, por lo que es la única forma de analizar los resultados. Se analizarán nueve casos distintos, en los que se alterará cada vez una variable distinta del modelo hidrodinámico. Los valores de partida de los parámetros de entrada del modelo son: $H = 3.65$ m, $T = 8.3$ s, $\theta = -37^\circ$, nivel del mar = 0.82 m, (*burst* 9412 del experimento principal de Egmond, correspondiente a un evento de tormenta), $\alpha = 1.25$, $\gamma = 0.7$, flujo de masa no considerado y los parámetros de la *eddy viscosity* = 2, 0.6, 0.6 (m^2/s).

6.3.1.1.- Efecto del ángulo de propagación del oleaje

Primeramente se ha analizado la sensibilidad del modelo a variaciones en el ángulo de propagación del oleaje, ya que éste es un parámetro que no es fácil de medir y que tiene una incertidumbre en las medidas de $\pm 10^\circ$ a 15° . En efecto, el oleaje en la naturaleza se propaga con un rango de direcciones, más o menos amplio, por lo cual es necesario adoptar un valor representativo de la dirección de propagación. En consecuencia, los valores de dirección del oleaje proporcionados por los instrumentos suelen tener una precisión limitada (precisión aún menor si los datos de oleaje son visuales). Los valores

tomados para el ángulo de propagación son: 0° , 10° , 20° , 37° (el valor medido en campo) y 50° . Un ángulo de 0° indica oleaje propagándose perpendicularmente a la playa, mientras que los otros valores indican el ángulo que forma la dirección de propagación del oleaje con una línea normal a la playa.

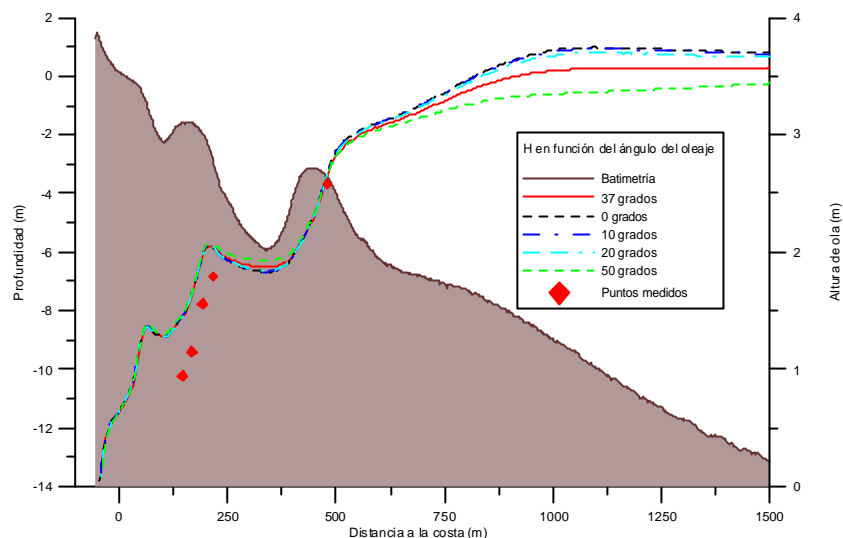


Figura 6.61.- Variación de H en función del ángulo de propagación del oleaje .

De la figura 6.61 se observa que para la altura de ola H , hay una inversión de los valores. A una distancia mayor de 500 m se tiene que la altura de ola es menor cuanto mayor es el ángulo, mientras que es al revés para distancias menores a 500 m. Como ya se ha explicado, todos los sensores de medida se encuentran a menos de 550 m de distancia, en un tramo donde las diferencias entre los resultados son menores que a mayor distancia de la costa, así que los errores obtenidos no serán los valores máximos que se pueden encontrar. Los resultados de los pases presentan diferencias muy pequeñas a distancias menores de 600 m de la costa. Solamente al pasar por encima del seno entre las dos barras se aprecia una diferencia máxima de 0.1 m de altura de ola. A partir de los 600 m las diferencias aumentan, hasta aproximadamente 0.5 m al estar a 1 km de la costa. A partir de aquí las diferencias entre los resultados vuelven a disminuir. Las diferencias observadas entre la altura de ola propagada con 37° y la propagada con 0° es similar a la diferencia observada con respecto a la propagación simulada con 50° .

Con respecto a la corriente longitudinal, v_l , puede verse que tiene la misma tendencia. Considerando que la magnitud de la corriente longitudinal es función del ángulo del oleaje en rotura (α_b), es fácil deducir que cuando el ángulo de aproximación del oleaje es de 0° , la corriente longitudinal también es 0 (ver figura 6.62). Obvia decir que para este caso, la corriente longitudinal es nula. La diferencia entre los resultados de los pases es especialmente notoria en las barras (donde rompe el oleaje y se produce el máximo gradiente del tensor de radiación). El valor máximo se aprecia en la barra más alejada de la costa, de ≈ 2.5 m/s y de ≈ 2 m/s en la barra interior. En la barra exterior las diferencias entre los resultados numéricos son de ≈ 1 m/s y a partir de 1500 m de distancia, los valores de la corriente son iguales (debido a que no hay un decaimiento de la altura de ola).

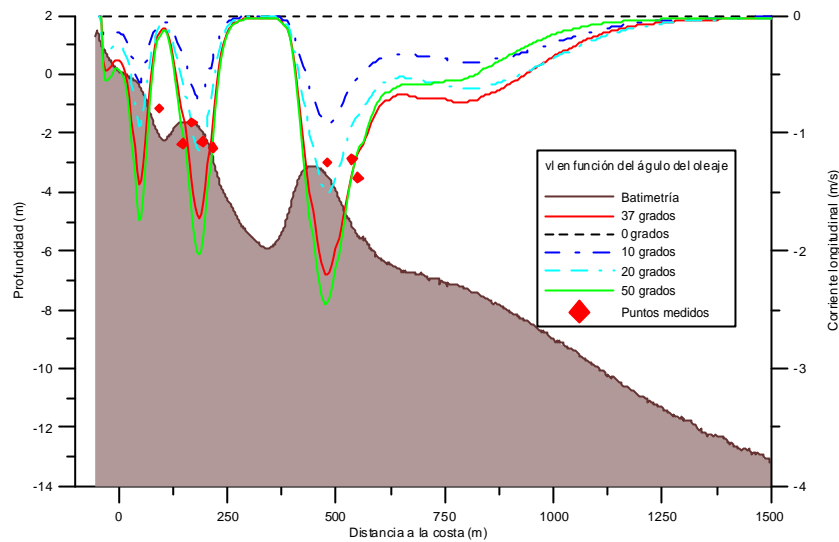


Figura 6.62.- Variación de $v/$ en función del ángulo de propagación del oleaje.

Los resultados indican que el modelado numérico de las corrientes es más sensible al ángulo de aproximación que el modelado numérico del campo de alturas de ola, por lo que, de cara a predecir las corrientes, es necesaria una mayor precisión en las medidas del ángulo de aproximación del oleaje.

6.3.1.2.- Efecto del período del oleaje

Los valores utilizados para estimar la sensibilidad del modelo para el periodo del oleaje son: 7.2, 8, 8.3 y 9.5 segundos. El valor registrado en las medidas de campo es de 8.3 s.

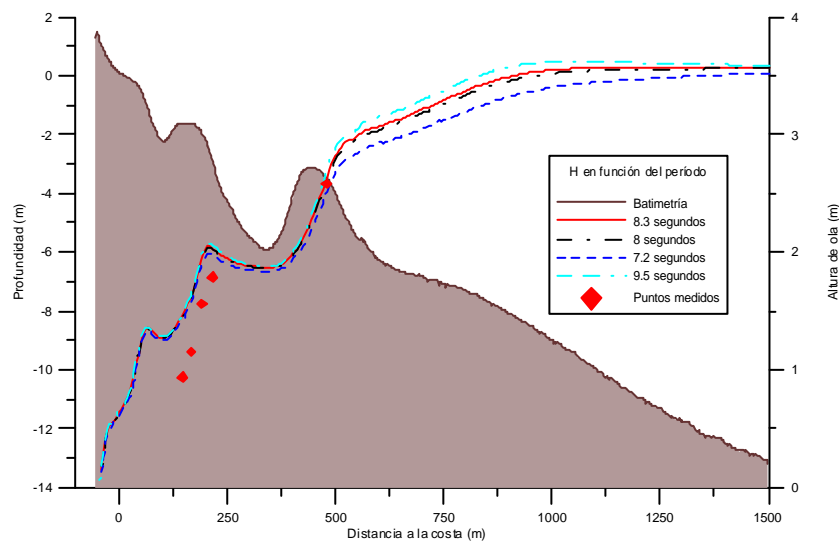


Figura 6.63.- Variación de H en función del período del oleaje.

Los resultados de las simulaciones para la altura de ola H (figura 6.63) en función del periodo del oleaje muestran que esta tiende a ser mayor cuanto mayor es el periodo en todo el dominio representado. Cerca de la costa la diferencia, entre los resultados de estas simulaciones es pequeña, del orden de 0.1 m aproximadamente, mientras que la diferencia máxima, aproximadamente 0.3 m, aparece a una distancia aproximada de la costa de 800 m, de aunque hacia los 1500 m (mar abierto) los resultados muestran valores muy similares.

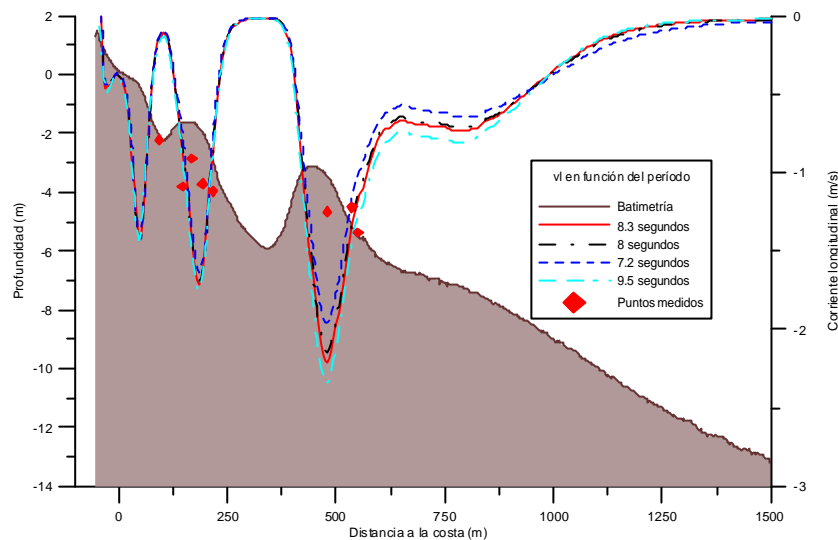


Figura 6.64.- Variación de v_l en función del período del oleaje.

En el caso de las simulaciones de la corriente longitudinal v_l , se presenta una situación similar (figura 6.64). A mayor periodo, mayor es la magnitud de la corriente, aunque a una distancia aproximada de 1000 m de distancia a la costa se produce una inversión de esta situación. Al igual que para H hay poca variación entre los resultados de los periodos, por lo que la variación del error también es pequeña, dándose una diferencia máxima de 0.4 m/s a ≈ 500 m de la costa, en las inmediaciones de la barra exterior. Esta situación no se produce dentro de los primeros 500 m, en los que los resultados de los periodos se encuentran prácticamente superpuestos. Otra diferencia un tanto importante, de ≈ 0.2 m/s puede verse a una distancia aproximada de 800 m de la costa. En torno a los 1500 m los resultados tienden a superponerse. En general, se puede decir que el modelo presenta poca sensibilidad a las variaciones del periodo, al menos para los valores analizados (entre 7.2 y 9.5 segundos).

6.3.1.3.- Efecto del parámetro α

En este apartado se analiza la influencia en la hidrodinámica de las variaciones en el parámetro α del modelo de rotura del oleaje irregular de Battjes & Janssen (1978). Los valores utilizados para α son: 0.5, 0.75, 1 y 1.25., donde el valor $\alpha = 1$ es usado como valor de referencia (es el valor propuesto por los autores).

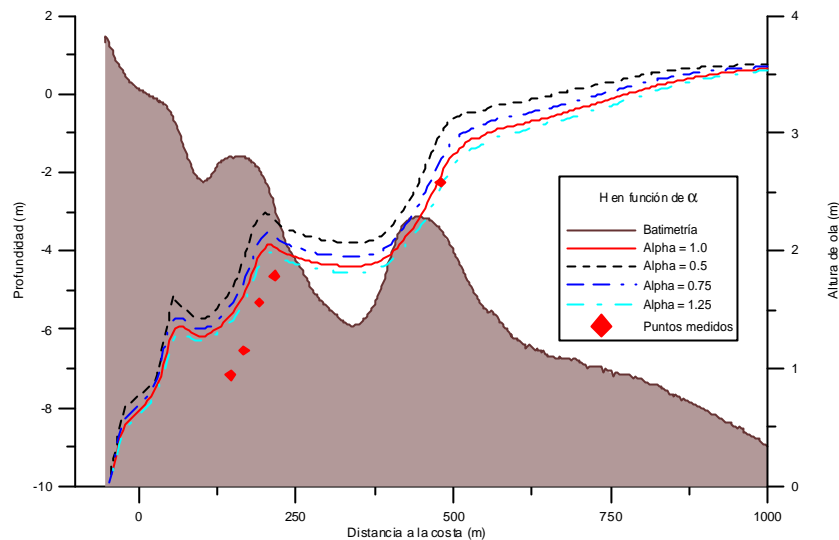
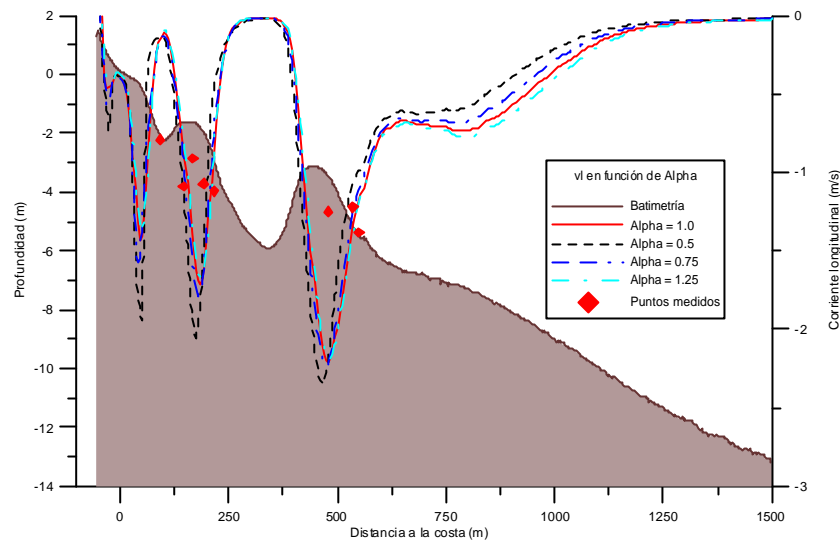


Figura 6.65.- Variación de H en función del parámetro α .

Los resultados de las simulaciones para la altura de ola H (figura 6.65) en función del parámetro α de Battjes & Janssen (1978) muestran que H aumenta cuando α disminuye (en todo el dominio). La diferencia entre los resultados de las simulaciones es similar en todo el intervalo representado, de unos 0.3 m aproximadamente. La diferencia entre los valores simulados de H aumenta al disminuir el valor del parámetro α . Hacia los 1000 m de distancia de la costa los resultados tienden a superponerse.

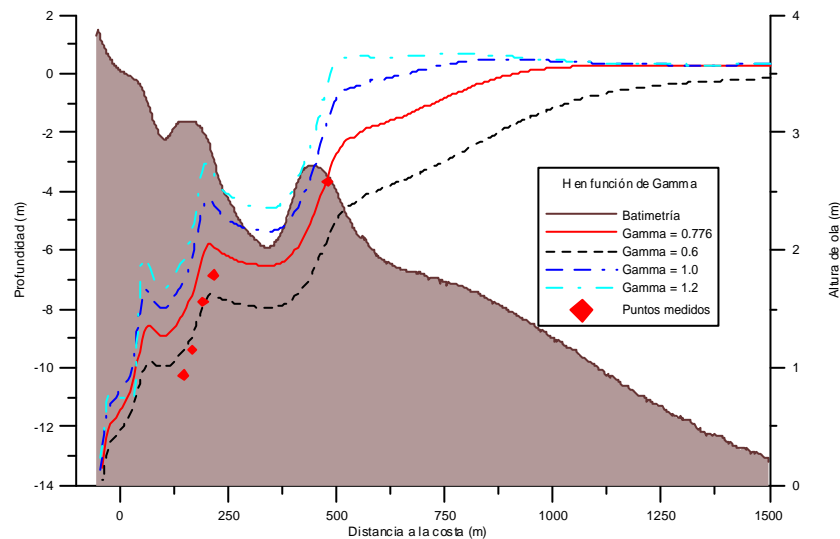
En las simulaciones de v/l (figura 6.66) puede verse que a una distancia aproximada de 1000 m de la costa, la corriente decrece cuando el valor del parámetro α decrece. Al acercarse a la costa (en las proximidades de la primera barra) esta situación se invierte, que es donde se encuentran los máximos de la corriente. A continuación (en la región donde el oleaje se reforma) se produce otra inversión en el mínimo de la corriente, una más en el siguiente máximo, y así sucesivamente. Por último, ya cerca de la costa, los “picos” de la corriente (máximos) son más marcados para valores de α menores. Las mayores diferencias entre los resultados de las simulaciones ocurren en el seno de la barra interior, alcanzándose hasta 0.5 m/s de diferencia, mientras que la diferencia máxima cuantificada en el seno de la barra exterior es de 0.3 m/s. Como en el caso anterior, al disminuir el valor de α aumenta la diferencia entre los resultados de las simulaciones.

Para las dos variables el modelo presenta poca sensibilidad al variar α aunque no parece conveniente tomar valores muy pequeños de ésta. Los valores más apropiados son los que están entre 1.25 y 0.75.

Figura 6.66.- Variación de $v/$ con el parámetro α

6.3.1.4.- Efecto del parámetro g

En este apartado se analiza la influencia en la hidrodinámica del parámetro γ del modelo de rotura de oleaje irregular de Battjes & Janssen (1978). Los valores utilizados para γ son: 0.6, 0.776, 1 y 2, donde el valor 0.776 usado como valor de referencia (y el adoptado por defecto en el modelo cuando se utiliza la expresión de Battjes & Stive (1984)).

Figura 6.67.- Variación de H en función del parámetro γ .

Los resultados de las simulaciones para la altura de ola H (figura 6.67) en función del parámetro γ , muestran que H aumenta cuando γ aumenta (en todo el dominio). Los mejores resultados se obtienen para las simulaciones realizadas con $\gamma = 0.776$ y $\gamma = 0.6$.

Las mayores diferencias entre las simulaciones se tienen para $\gamma = 1$ y sobre todo para $\gamma = 1.2$. Por tanto, el cálculo de H es muy sensible a los distintos valores posibles del parámetro γ . En este caso, entre los distintos pases se dan diferencias importantes, de aproximadamente 1 m de altura de ola, entre los 250 m y los 750 m de la costa. A una distancia de 1100 m de la costa, los resultados con valores de γ mayores a 0.776 son prácticamente idénticos, pero los de $\gamma = 0.6$ no lo son sino hasta aproximadamente 2000 m de la costa. También se observa que las diferencias entre los pases aumentan conforme los valores de γ disminuyen. En definitiva, el cálculo de la altura de ola es especialmente sensible al valor de γ que se adopte.

En las simulaciones de v_l (figura 6.68) puede verse que a distancias superiores a 700 m de la costa, la magnitud de las corrientes aumenta si disminuye el valor del parámetro γ . En el punto de 700 m se aprecia una inversión entre los resultados con $\gamma = 0.776$ y los de $\gamma = 0.6$, pasando la primera a estar por debajo. A unos 550 m se invierten las curvas de $\gamma = 0.776$ y las de valores mayores, con lo que se obtiene la tendencia es la contraria que al principio, es decir, a menores valores de γ , menor magnitud de v_l . Las diferencias entre los resultados son más acusados en los “picos” de las corrientes. En el caso del pico de corriente más cercano a la costa, la diferencia máxima es de 1.7 m/s, mientras que para el “pico” intermedio es del orden de 1 m/s y para el más alejado de la costa es de aproximadamente 0.7 m/s. Otra variación importante puede verse a unos 900 m de la costa, donde las diferencias alcanzan 0.8 m/s. Cerca de los 1100 m de distancia, los resultados obtenidos para valores de γ mayores a 0.776 son muy similares, y como ocurre con el cálculo de la altura de ola, los resultados no tienden al mismo resultado sino hasta unos 2000 m de distancia de la costa.

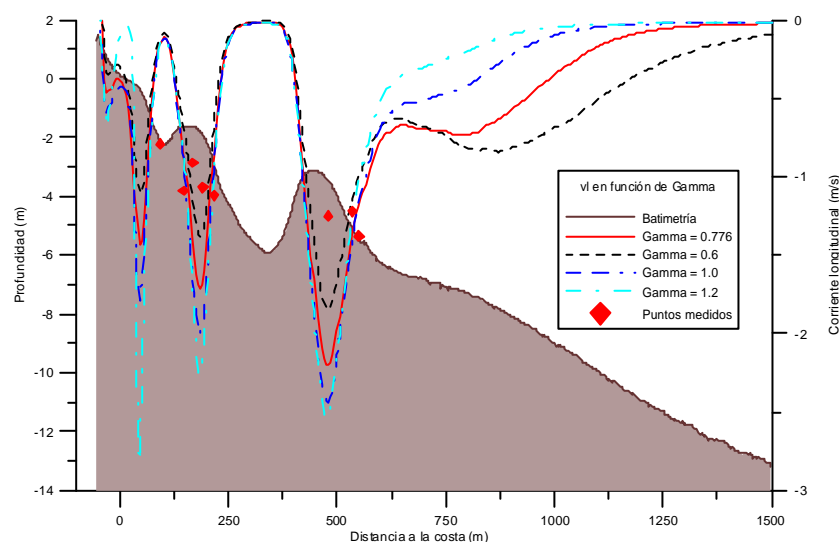


Figura 6.68.- Variación de v_l en función del parámetro γ

En ambas variables las alteraciones de γ tienen un efecto significativo.

6.3.1.5.- Efecto del nivel del mar

Como se mencionó en el capítulo 4, la zona de estudio (Egomond aan Zee) está sometida al efecto de las mareas, por lo que es necesario tenerla en cuenta para cuantificar su efecto sobre la hidrodinámica en el momento de efectuar las simulaciones. Los valores utilizados para el nivel de la marea son los siguientes: -1.0, 0.0, 0.5, 0.82 y 2.0 m, donde 0.82 m el valor usado inicialmente por el modelo, que corresponde a las medidas de campo.

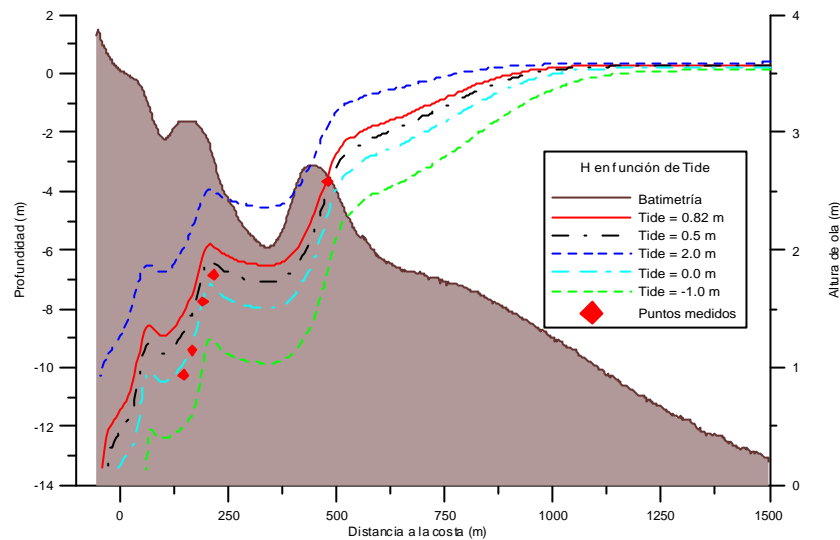


Figura 6.69.- Variación de H en función del nivel del mar.

Los resultados de las simulaciones para la altura de ola H en función del nivel de marea (ver figura 6.69) muestran que esta es mayor en todo el dominio cuanto mayor es el nivel del mar. La diferencia máxima entre los resultados de la simulación es de 1.5 m, a una distancia de 350 m de la costa. A distancias mayores hay una disminución progresiva de las diferencias, hasta que a 1100 m de la costa los valores de los resultados se encuentran muy próximos. Este comportamiento es del todo lógico, pues la rotura del oleaje tiene lugar a una distancia mucho mayor de la costa (rompen antes) cuanto más alto es el nivel medio del mar, mientras que lejos de la costa, el efecto del nivel del mar es mínimo, y sólo influye ligeramente en los procesos de *shoaling* y refracción, tiene una influencia mínima en la rotura del oleaje.

En las simulaciones de v_l (figura 6.70), puede verse que a distancias superiores a 1 km de la costa, la magnitud de la corriente longitudinal disminuye su valor al aumentar el nivel del mar, mientras que a distancias menores esta tendencia se invierte. Las diferencias entre los resultados de las simulaciones en distancias menores a 700 m no superan los 0.2 m/s. Las mayores diferencias se tienen a 1 km de la costa y son aproximadamente de 0.7 m/s. Al aumentar la distancia a la costa, las diferencias disminuyen hasta casi superponerse las velocidades de la corriente.

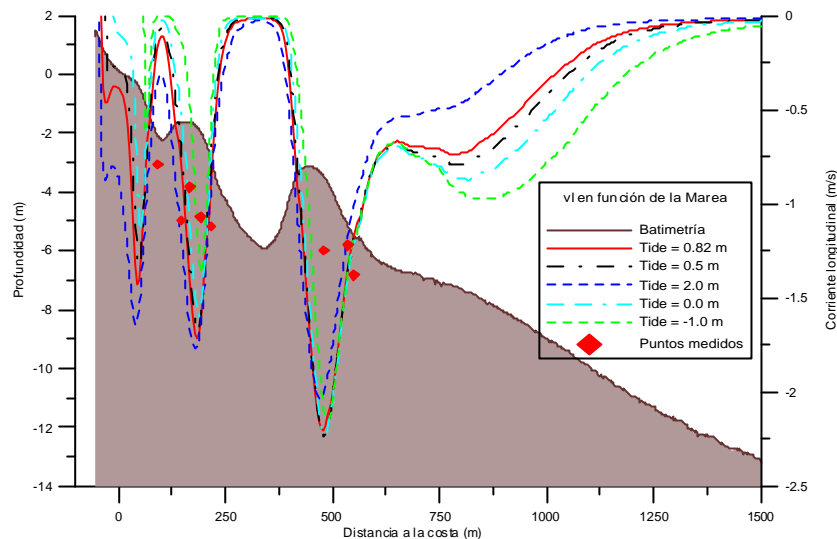


Figura 6.70.- Variación de $v/$ en función del nivel del mar.

Para esta variable, la altura de ola tiene una gran sensibilidad y las corrientes, en cambio, son menos sensibles cerca de la costa y un poco más al alejarse, ya que al romper antes las olas, el ancho y la configuración de la zona de *surf* varían radicalmente, provocando una distribución de las corrientes muy diferente en cada caso.

6.3.1.6.- Efecto del flujo de masa

En este apartado se analiza la influencia de considerar el efecto del flujo de masa del oleaje al romper. Este análisis de sensibilidad se basa únicamente en “decidir” si el modelo lo considera o no.

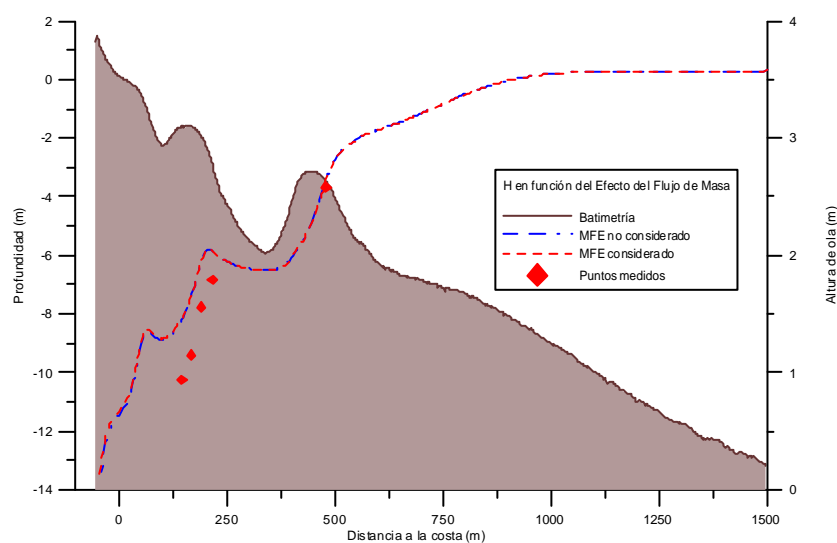


Figura 6.71.- Variación de H con el flujo de masa.

Los resultados de las simulaciones para H (figura 6.71) son prácticamente idénticos, con lo que no hay diferencia entre considerar el flujo de masa y no considerarlo.

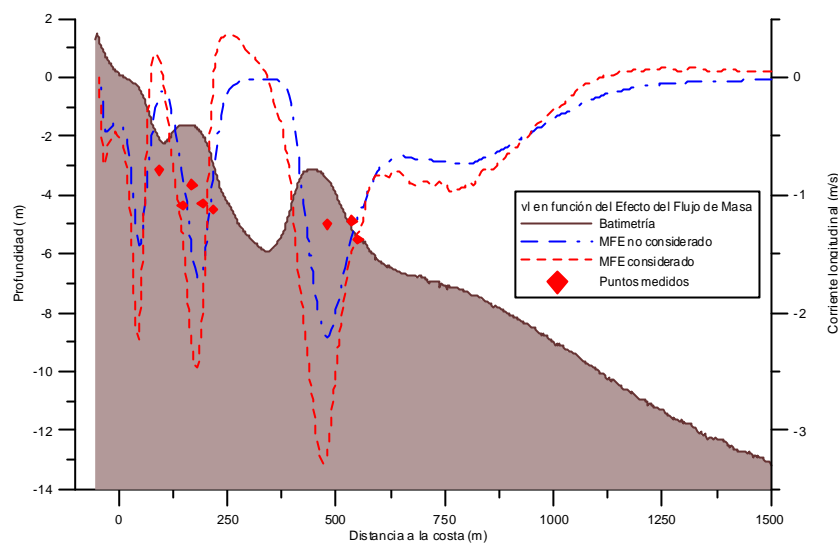


Figura 6.72.- Variación de $v/$ con el flujo de masa.

Las simulaciones de las corrientes muestran una mayor diferencia entre ellas (figura 6.72) que las simulaciones de la altura de ola. Es interesante notar que en algunas zonas del dominio (antes de la primera rotura y en los senos de las barras exterior e interior) al considerar el flujo de masa, $v/$ presenta cambio de sentido. Justo después de la rotura, la magnitud de la corriente es mayor que si no se considerase el flujo (lo cual es esperable pues se tiene un mecanismo impulsor extra). Esto también se observa más allá de los 1000m de distancia a la costa). En lo referente al cambio de sentido (antes de la primera rotura y sobre la zona de senos de las barras) no parece que exista un motivo físico para este cambio en la dirección de la corriente longitudinal sino que tenga un origen numérico, relacionado con la forma en la que está programado el flujo de masa.

La máxima diferencia entre los resultados se produce en la región de los “picos” de corriente; en el más alejado de la costa se tiene una diferencia de 1 m/s, y valores mayores de 0.5 m/s en los otros dos. A distancias mayores de 600 m la diferencia no supera los 0.2 m/s.

En conjunto, se observa que la altura de ola es insensible, por lo que no importa si se considera el flujo de masa o no. No así la corriente longitudinal, ya que al considerar el flujo de masa, los resultados de la simulación numérica varían significativamente.

6.3.1.7.- Efecto de la disipación por fricción de fondo

En este apartado se analiza la influencia de la disipación por fricción con el fondo. El modelo considera un cierto coeficiente de fricción en función del tamaño del sedimento. Los diámetros escogidos son 0.00025 m, 0.00050 m, 0.001 m y 0.002 m. Obviamente, a

mayor diámetro del sedimento, mayor disipación por fricción con el fondo debería producirse.

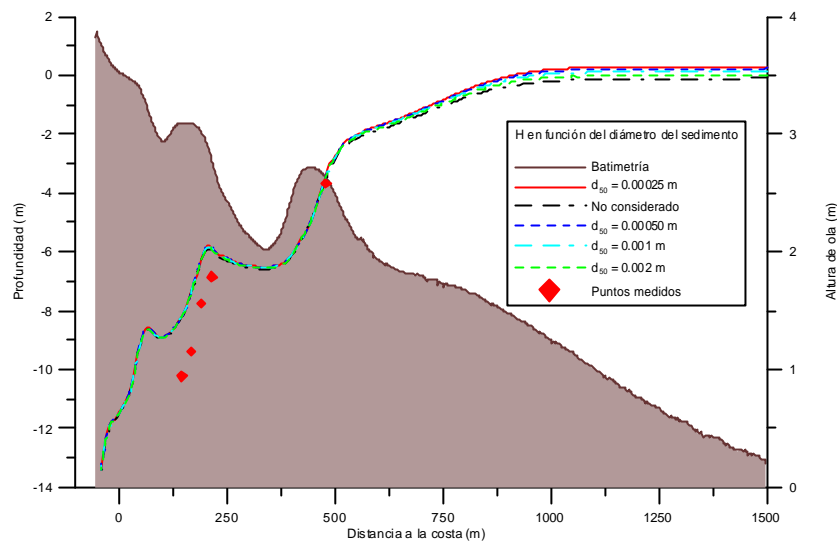


Figura 6.73.- Variación de H con la fricción por fondo.

Al representar la altura de ola H se observa que los resultados son prácticamente idénticos para distancias menores de 600 m (figura 6.73), mientras que para distancias mayores, se observan diferencias aunque estas son muy pequeñas (del orden de 0.1 m). También se observa que precisamente a partir de este punto (≈ 600 m de la costa) y hacia mar adentro, la H es mayor si el diámetro es menor. A simple vista se nota que hay una mayor diferencia entre las simulaciones (más disipación) a mayores profundidades (intuitivamente parecería que debería ser al revés). Esto se debe a que la disipación por fricción con el fondo tiene una mayor importancia relativa antes de la rotura, ya que la disipación que se produce durante la misma es varios órdenes de magnitud superior a la disipación por fricción.

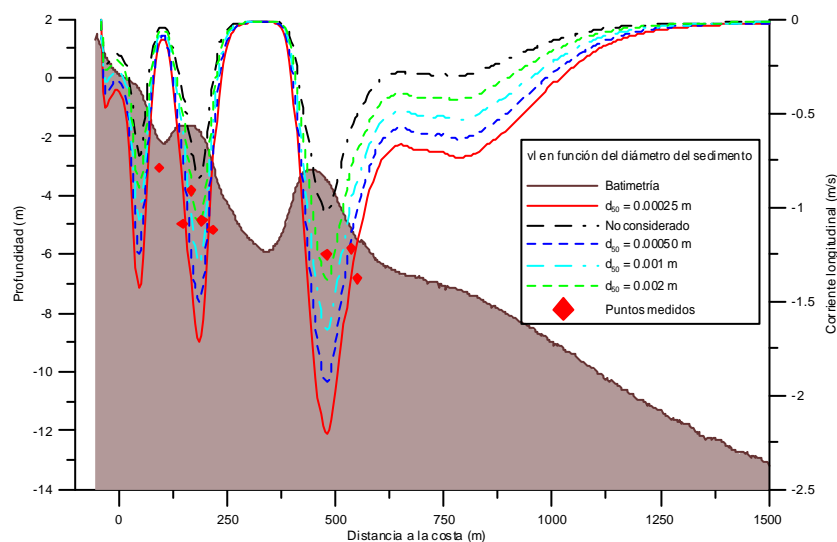


Figura 6.74.- Variación de v_l con la fricción por fondo.

La corriente longitudinal presenta la misma tendencia que H , ya que la magnitud de la corriente disminuye al aumentar el diámetro (figura 6.74), aunque el valor mínimo de la corriente v_l se da cuando no se considera la fricción con el fondo. La diferencia entre los resultados de la simulación vuelve a ser mayor sobre las barras, siendo de 1.2 m/s en el pico de corriente más alejado de la costa (sobre la barra exterior). En los otros dos “picos”, las diferencias entre la v_l máxima es del orden de 0.7 m/s. A distancias mayores de 600 m la diferencia es de 0.5 m/s y los resultados son prácticamente idénticos a partir de los 1300 m de la costa.

En este caso, como en el anterior, la altura de ola no es especialmente sensible a las diferencias en el tamaño del sedimento, especialmente en la zona de rompientes, pero sí lo es para la simulación de la corriente longitudinal v_l . La forma en la que se evalúa la fricción con el fondo depende directamente la rugosidad del fondo y ésta a su vez, del tamaño del sedimento. Los resultados muestran que una correcta obtención del tamaño de grano es esencial para una correcta simulación de las corrientes inducidas por oleaje.

6.3.1.8.- Efectos de la viscosidad turbulenta (*eddy viscosity*)

La viscosidad turbulenta (*eddy viscosity*) se introduce en el modelo con tres parámetros que representan la turbulencia generada por la rotura, en la capa límite y por la tensión tangencial. Para evaluar los efectos que puedan tener se han tomado distintos valores. Cuanto mayores son los valores, mayor es la disipación viscosa producida por la turbulencia. Los valores utilizados son (0.5, 0.15, 0.15), (1, 0.3, 0.3) y (0.25, 0.075, 0.075) respectivamente.

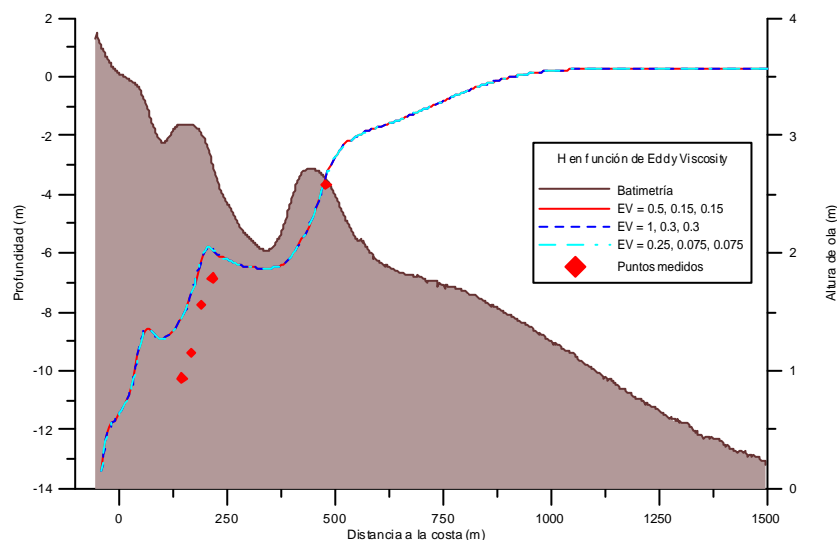


Figura 6.75.- Variación de H con la viscosidad turbulenta.

Los resultados de la simulación de la altura de ola H (figura 6.75) no muestran diferencia alguna al variar los valores utilizados para la viscosidad turbulenta.

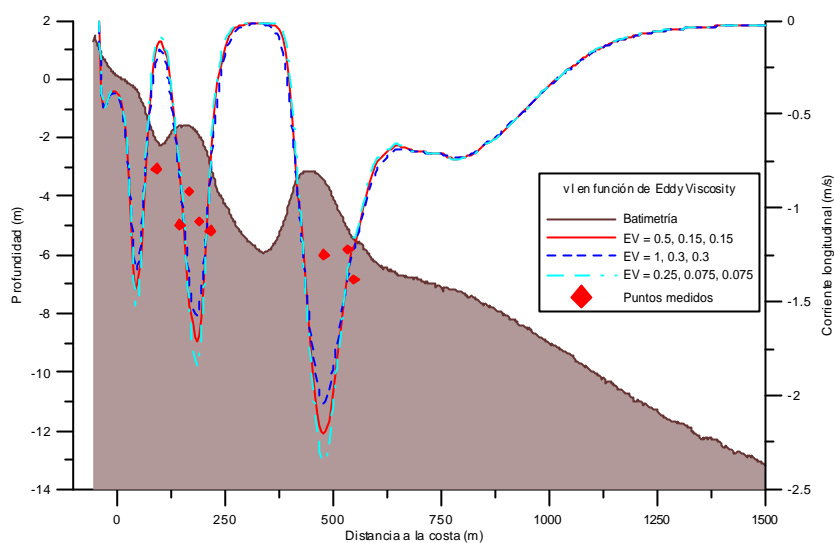


Figura 6.76.- Variación de v_l con la viscosidad turbulenta.

Para la corriente longitudinal v_l (figura 6.76) al variar la “*eddy viscosity*” las diferencias son apenas apreciables en la zona de los “picos” de la corriente, ya que la diferencia no supera los 0.3 m/s. La corriente con mayor magnitud se obtiene al disminuir los parámetros de la *eddy viscosity*. La turbulencia genera mezcla horizontal que tiende a homogenizar los flujos, y la turbulencia generada en la capa límite aumenta la fricción del flujo con el fondo. Por tanto, los resultados son coherentes. Excepto en la zona de los “picos” de las corrientes, los resultados son prácticamente idénticos.

Como la altura de ola no presenta grandes cambios ante la variación de los parámetros de la *eddy viscosity*, parece recomendable decidir sobre estos valores en función de la necesidad de calcular el campo de corrientes. Los resultados de las simulaciones muestran que para valores mayores de los coeficientes de la *eddy viscosity*, se produce una mayor mezcla y la velocidad de la corriente es menor. No obstante, las diferencias entre las simulaciones no son significativas.

6.3.2.- Análisis de la influencia de diversos parámetros en la morfodinámica

El modelo morfodinámico calcula la evolución del fondo marino a partir de la configuración original, usando tanto parámetros propios como del modelo hidrodinámico. Uno de los parámetros de entrada más importantes del modelo es el tiempo morfodinámico (Δt_m), que permite escoger el tiempo de evolución del fondo que transcurre desde el inicio del proceso sin cambiar las condiciones hidrodinámicas.

En términos generales puede verse que la mayoría de alteraciones del fondo se producen en el tramo de los primeros 1000 m de la costa, donde existen más irregularidades. En los primeros 100 m al adentrarse en el mar, hay una pendiente que desciende de forma bastante brusca hasta llegar a 2 m de profundidad. Entre los 100 m y

los 600 m se tiene una configuración formada por dos barras y el seno entre ellas. La primera barra se encuentra a una profundidad de 1.5 m, con la cresta a 200 m de distancia. A partir de ella la pendiente vuelve a ser descendente de forma pronunciada hasta que a 350 m de distancia a la costa se encuentra el punto más profundo entre las barras, con un valor de unos 6 m. Entonces se inicia la pendiente ascendente de la segunda barra, y pasados los 400 m de distancia, en la segunda cresta, la profundidad es de 3 m, manteniéndose hasta los 475 m para volver a aumentar hasta 6 m aproximadamente a 600 m de distancia. Por último la pendiente disminuye, pero sigue siendo descendente, con un valor casi constante en los 400 m finales. A 1 km de distancia se tiene una profundidad de 9 m.

De forma similar a las simulaciones hidrodinámicas, se analizarán cinco casos distintos, en los que se alterará cada vez una variable distinta del modelo morfodinámico (sin manipular los parámetros de entrada del modelo hidrodinámico). Los valores de partida de los parámetros son:

- Para el modelo hidrodinámico: $H = 3.65$ m, $T = 8.3$ s, $\theta = -37^\circ$, nivel del mar = 0.82 m, $\alpha = 1.25$, $\gamma = 0.6$, flujo de masa no considerado y *eddy viscosity*: 2, 0.6, 0.6 (m^2/s).
- Para el modelo morfodinámico: $\Delta x = 5$ m, $\Delta t = 120$ s, $d_{50} = 0.00025$ m, $A_w = 0.2$, $A_c = 0.1$ y $\varepsilon = 1$.

6.3.2.1.- Efectos de Δt

La variable Δt representa el paso de tiempo en el proceso de cálculo numérico. Al aumentar su valor se utilizan menos pasos al calcular y, en principio, el resultado puede presentar más errores debido a inestabilidades numéricas. La ventaja de aumentar Δt es que reduce el tiempo de cálculo y el coste computacional es menor. Por lo tanto es importante escoger un valor que de resultados lo suficientemente buenos y que no requiera de mucho tiempo o capacidad del ordenador para el cómputo.

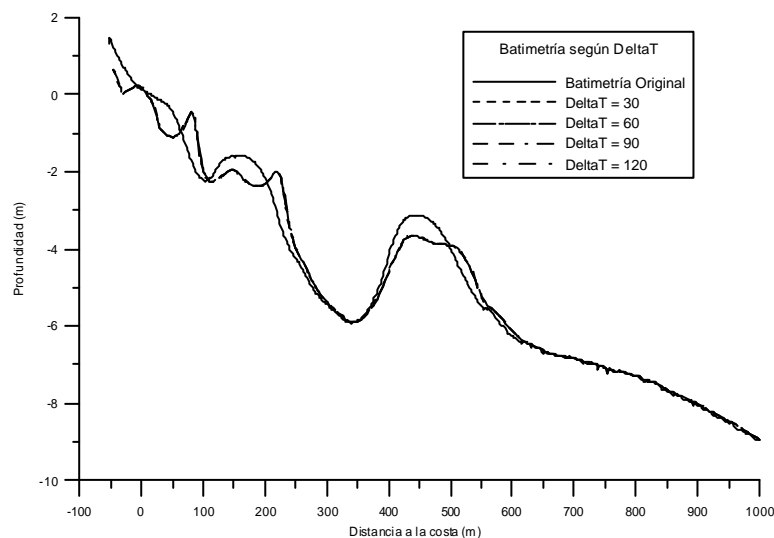


Figura 6.77.- Evolución del fondo en función de Δt .

Los valores de Δt que se han utilizado para estas simulaciones son 30, 60, 90 y 120 segundos. La figura 6.77 muestra que no se produce ninguna diferencia al usar distintos valores de la variable, ya que todas las nuevas batimetrías aparecen superpuestas. Ello es debido a que todos los valores de Δt probados son suficientemente pequeños como para no generar problemas numéricos.

La nueva configuración del fondo de mar tiene una estructura similar a la anterior, presentando una tendencia del sedimento a desplazarse hacia mar adentro. En los primeros 100 m, donde se tenía un cambio de pendiente, aparecen dos pequeños picos que podrían ser el origen de unas barras nuevas (si siguiesen desplazándose y acumulando sedimento). La barra interior original se disgrega en dos menos marcadas y de mayor profundidad que se han desplazado mar adentro. La profundidad del seno sigue siendo la misma porque el sedimento queda depositado en el tramo descendiente anterior. La barra exterior también pierde altura y se desplaza mar adentro. A partir de los 600 m de distancia no se produce ningún cambio significativo, sólo que la superficie se hace menos rugosa, seguramente por un efecto de suavizado del modelado y no por transporte del sedimento.

La tendencia del sedimento que forma el fondo marino es a desplazarse mar adentro por el efecto de las corrientes. La distancia media de desplazamiento ronda los 50 m.

6.3.2.2.- Efecto del diámetro del sedimento

En este apartado se estudia la variación de la evolución del fondo al cambiar el diámetro del sedimento (d_{50}), asignándole los valores 0.25, 0.50, 1 y 2 mm.

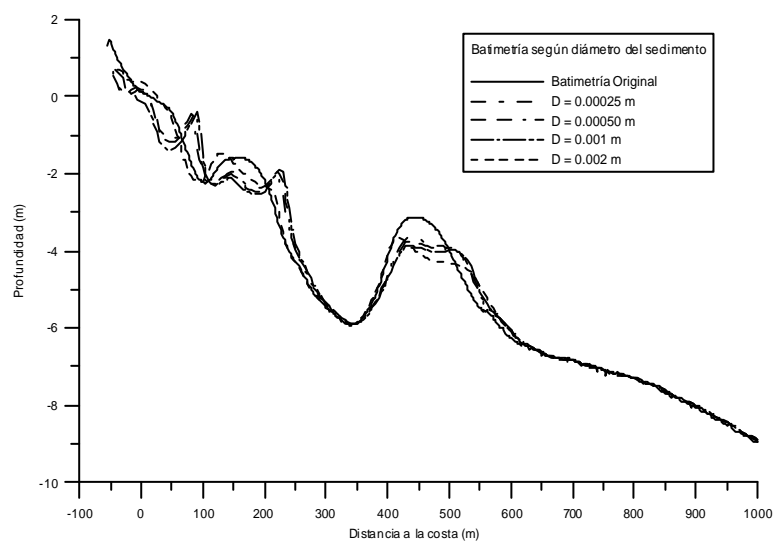


Figura 6.78.- Evolución del fondo en función del diámetro del sedimento.

Variando el tamaño del sedimento para las simulaciones de evolución del fondo (figura 6.78), puede verse que los resultados presentan unas tendencias muy parecidas a las simulaciones anteriores, con el sedimento desplazándose hacia el mar en las crestas y en el cambio de pendiente, con la excepción de la simulación con diámetro medio = 2 mm.

Para los tres primeros casos la variación del perfil de la playa es progresiva, donde en general produce un mayor desplazamiento para los diámetros menores, ya que es más fácil poner las partículas en movimiento. Igual que antes, en los primeros 100 m de distancia, se crea una concavidad por la pérdida del material y aparece una barra desplazada ligeramente hacia el mar y una pequeña ondulación ligeramente desplazada hacia tierra (para los diámetros de 0.25 mm y 0.5 mm, aunque menor para 0.5 mm que para 0.25 mm). Pero con $d_{50} = 1$ mm la ondulación mencionada anteriormente ya no aparece y en cambio se tiene una pendiente más pronunciada que la original, seguramente por la acción de la gravedad que desplaza las partículas hacia la barra de la derecha, ya que ésta es más alta con mayor d_{50} . La barra interna de la batimetría original también pierde sedimento y forma dos barras de menor altura con la más cercana a la costa haciéndose menor y la más lejana mayor al aumentar el d_{50} . El seno entre las dos barras originales mantiene su profundidad y su posición. Finalmente la segunda barra se va achatando, tanto más cuanto mayor es el d_{50} .

El comportamiento de la evolución simulada con $d_{50} = 2$ mm parece no guardar relación con el de los otros tres casos. La tendencia general del sedimento es a desplazarse hacia la costa, que es el contrario al obtenido para los casos con menor d_{50} . En los primeros 100 m la pendiente no forma barras, sólo aumenta ligeramente su inclinación y gana altura. La primera barra se deforma y se hace más estrecha, unos 50 m, la mitad de la anchura original. Además se mueve situándose más cerca de la costa. El nuevo seno obtenido no presenta variaciones, está superpuesto con el original. La segunda barra pierde 1 m de altura y el sedimento se desplaza hacia mar adentro, pero menos que en los otros casos.

Para ambas situaciones, a partir de los 600 m de distancia, no se produce ninguna variación significativa, y el desplazamiento de las partículas tiene un valor similar al anterior.

Una posible explicación de la evolución simulada para $d_{50} = 2$ mm es que, al tratarse de un sedimento bastante grande, los factores impulsores del transporte de sedimento pudieran haber cambiado de sentido, pasando de convertirse en fuerzas erosivas a fuerzas acretivas, lo que se traduce en un cambio de signo en el transporte de sedimentos calculado con la expresión de Watanabe (1982).

6.3.2.3.- Efecto del parámetro A_w

Esta variable es un parámetro de la fórmula de transporte de sedimentos de Watanabe (1982) que considera la acción de las olas. Como éstas son las que producen las corrientes más fuertes cerca de la costa, es de esperar una diferencia importante entre los distintos pases, y que para A_w mayores haya más transporte de partículas. Los valores simulados son $A_w = 0.2, 0.5$ y 0.9 .

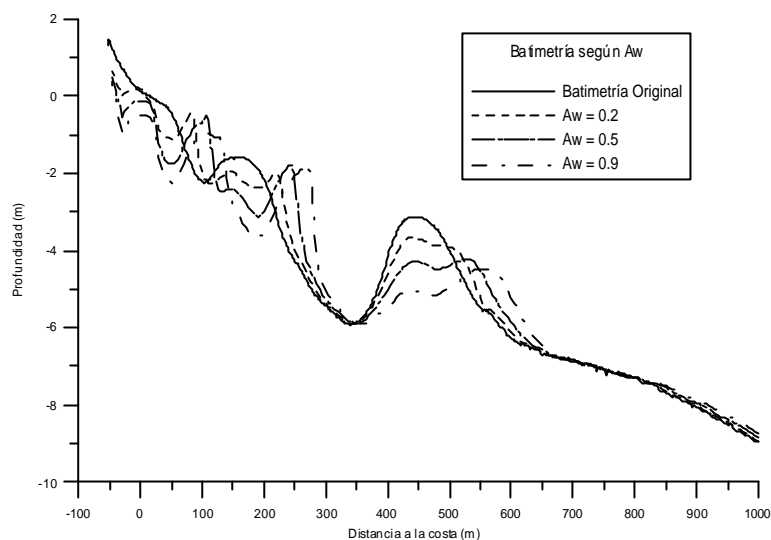


Figura 6.79.- Evolución del fondo en función del parámetro A_w (Watanabe, 1982).

Los resultados obtenidos (figura 6.79) reflejan que a mayor valor del parámetro A_w se produce un mayor transporte del sedimento con incrementos muy importantes. Es interesante notar que se forman dos barras dentro de los primeros 100 m, barras que se encuentran a mayor profundidad y más alejadas de la costa al aumentar A_w . El incremento en la capacidad de transporte del oleaje es evidente con el aumento del parámetro A_w . Es posible apreciar la formación de una barra estrecha aproximadamente a unos 100 m de la costa (donde antes se encontraba el seno de la barra interior), casi manteniendo la profundidad. Esta barra se encuentra más alejada de la línea de orilla cuanto mayor es el valor de A_w (así como la pendiente de los lados se hace más pronunciada). A pesar del gran transporte que hay hacia mar adentro, el sedimento se deposita en el talud exterior de lo que, en la batimetría original, es la barra interior y el seno no ve alterada su posición. La segunda barra muestra también una tendencia a desplazarse hacia mar adentro. Este desplazamiento es más acusado cuanto mayor es el valor del parámetro A_w . Esto hace que el talud interior de la barra se “hunda” significativamente, y el talud exterior de la barra, a pesar de que pierde altura respecto a la original, no es tan acusado como la interior gracias al sedimento que recibe. A partir de los 650 m no hay alteraciones apreciables de la batimetría.

6.3.2.4.- Efecto del parámetro A_c

Esta variable es la que considera la influencia de las corrientes en la formulación de transporte de sedimentos de Watanabe (1982). Las diferencias entre las batimetrías simuladas cambiando el valor del parámetro A_c (figura 6.80) son mucho menores a las obtenidas con A_w , lo que indica que las olas tienen una mayor influencia en el transporte de sedimentos y evolución del fondo. No obstante, ambos parámetros muestran la misma tendencia, es decir, mueven el sedimento hacia mar adentro con más intensidad al ser mayores.

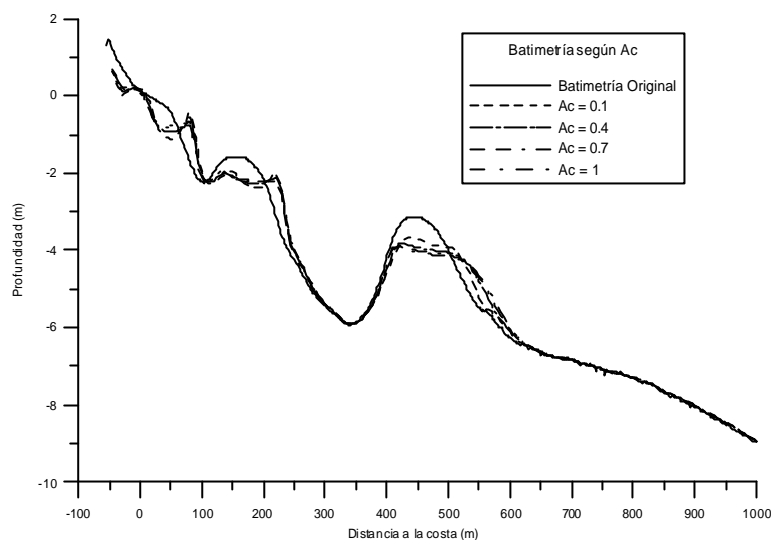


Figura 6.80.- Evolución del fondo en función del parámetro Ac (Watanabe, 1982).

Las simulaciones muestran que, en el intervalo de los primeros 100 m, hay un cambio importante de pendiente donde se forma una ondulación parecida a dos pequeñas barras, que tienen mayor altura cuanto más pequeño es el valor del parámetro Ac , ya que hay menos transporte del sedimento. La diferencia de alturas no es muy significativa, especialmente para la primera con 0.1 m. Para la segunda el valor máximo de variación es de unos 0.2 m y la cresta se encuentra desplazada hacia mar adentro aproximadamente unos 20 m. La barra interior original se “hunde” y gana anchura, apareciendo dos pequeños picos en los extremos, como si se fuese a dividir en dos barras distintas. El crecimiento a lo ancho se hace más evidente en el talud exterior de esta barra seguramente por el sentido del transporte. El seno entre las dos barras no llega a verse afectado por el movimiento de la primera barra, con lo que no cambia su posición ni su profundidad. La segunda barra también disminuye su altura y se va achatando a medida que aumenta Ac . Esto quiere decir que la barra se hace más baja y más ancha, con lo que aparentemente no pierde volumen de sedimento. La cresta presenta una forma casi plana, sin que se creen ondulaciones distinguibles. La influencia de Ac no supera los 600 m de distancia a la costa.

6.3.2.5.- Efecto del parámetro ϵ

El parámetro ϵ indica el efecto que puede tener la pendiente del fondo en el transporte del sedimento. En sentido hacia mar adentro, si la pendiente es descendente la gravedad tiene un efecto favorecedor del transporte en el mismo sentido. En cambio para una pendiente ascendente, la gravedad dificulta que se desplace el sedimento.

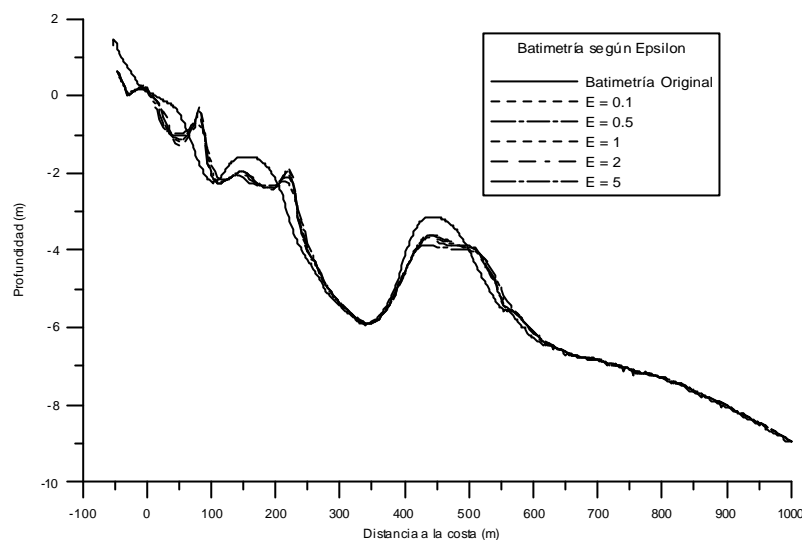


Figura 6.81.- Evolución del fondo en función del parámetro ϵ .

La batimetría simulada no tiene un perfil monótonamente descendente, ya que en las inmediaciones del talud interior de las barras la pendiente cambia de signo (figura 6.81) por lo que el transporte en dirección *offshore* es menos acusado, de tal manera que en el seno entre las barras interior y exterior no se aprecian cambios significativos en ninguna de las simulaciones. En el tramo más cercano a la costa (hasta ≈ 300 m de distancia de la línea de orilla) se produce un mayor transporte (formándose una barra puntiaguda). Este transporte es mayor cuanto menor es ϵ (especialmente acusado a 80 m de distancia). La primera barra original se hunde y forma una ondulación que da lugar a dos crestas, que podrían desarrollarse hasta formar dos barras. Esta ondulación es más marcada para ϵ menores por la menor movilización que se tiene. El seno entre las dos barras no ve afectada su posición con las variaciones del valor del parámetro ϵ , aunque la pendiente en el talud exterior de la barra interior se hace más vertical, mientras que el talud ascendente (interior) de la barra exterior se hace menos vertical. La segunda barra muestra una pérdida de sedimento desde su cresta hacia el talud exterior. A medida que ϵ aumenta, la cresta se va haciendo más plana hasta desaparecer la ondulación que tenía. A partir de los 600 m de distancia no se produce ninguna alteración significativa.

De manera general, puede apreciarse que, en todas las simulaciones presentadas, hay un transporte de sedimentos en sentido *offshore*. La movilización del sedimento se inicia en las crestas de las dos barras y en el cambio de pendiente en el fondo que se puede apreciar a 50 m de la costa.

Las simulaciones donde se utiliza un sedimento con $d_{50} = 0.002$ m muestran un cambio en la dirección del transporte (que se dirige hacia la costa). Esto hace que las barras pierdan altura, como antes, pero el sedimento desplazado se acumula en las caras interiores de las barras. Además, los primeros metros del perfil ganan altura por la acumulación del material que va hacia la costa. Ni en el seno entre las dos barras, ni a distancias mayores de 600 m se aprecian variaciones significativas del fondo.

Para $A_w = 0.5$ y $A_w = 0.9$ el transporte experimenta importantes incrementos, que provocan una mayor variación del perfil. Esta alteración afecta principalmente a los

primeros 300 m de longitud, donde se crea una barra nueva a partir de la variación de pendiente y se desplaza la primera barra original. La segunda barra pierde la mitad de su altura y también se desplaza. Al aumentar A_w el transporte es mayor y se incrementan los efectos anteriores.

6.3.3.- Análisis combinado de la influencia de parámetros hidrodinámicos y morfodinámicos

Una vez se han estudiado los parámetros hidrodinámicos y morfodinámicos por separado y se ha comprobado su fiabilidad, se procede a realizar un estudio de sensibilidad que combine a todos los módulos del modelo morfodinámico (olas, corrientes y transporte de sedimentos). El procedimiento es idéntico al análisis de sensibilidad por separado para cada módulo, es decir, fijando todas las variables menos las que se vayan a analizar, que adoptarán distintos valores. Entonces se realiza en primer lugar la simulación hidrodinámica en primer lugar y con los resultados que éste proporcione, se llevan a cabo las simulaciones morfodinámicas. En las gráficas de resultados se presentan la batimetría original y las variaciones calculadas por el modelo.

Se analizarán nueve casos distintos, en los que, como mucho, se alterarán dos variables y el resto permanecerán con los valores iniciales que tengan. Estos valores son:

- Para el modelo hidrodinámico: $H = 3.65$ m, $T = 8.3$ s, $\theta = -37^\circ$, nivel del mar = 0.82 m, $\alpha = 1.25$, $\gamma = 0.6$, flujo de masa no considerado y *eddy viscosity* = 2, 0.6, 0.6 (m^2/s).
- Para el modelo morfodinámico: $\Delta x = 5$ m, $\Delta t = 120$ s, $d_{50} = 0.00025$ m, $A_w = 0.2$, $A_c = 0.1$ y $\epsilon = 1$.

6.3.3.1.- Variación del fondo en función del parámetro α

Se ha estudiado el impacto sobre la morfodinámica de la variación del modelo de rotura del oleaje irregular de Battjes & Janssen (1978). Los valores que se analizan son $\alpha = 1$, 0.5, 0.75 y 1.25.

En la figura 6.82, la tendencia observada es que, para valores menores de α se produce un mayor transporte de sedimento. Esto es debido a que H aumenta conforme α disminuye, lo que se traduce en un aumento de la magnitud de las corrientes inducidas por la rotura del oleaje. La zona más afectada son los primeros 250 m de distancia, donde se observa la formación de una primera barra y un cambio de pendiente importante de la segunda barra. Para los valores menores de α se producen unos cambios en el fondo más significativos, aunque en ningún caso se supera 1 m de diferencia de cota. A 80 m de distancia se forma una barra estrecha y puntiaguda, especialmente marcada para $\alpha = 0.5$ que se forma de la erosión de la playa comprendida entre los 35 y 45 m de la costa, donde se pierde hasta 1 m de altura. La que originalmente era la primera barra experimenta una pérdida significativa de sedimento y

tiene la tendencia a dividirse en dos barras menos pronunciadas, que se desplazan hacia mar adentro. De éstas, la “primera” barra nueva se hace más pequeña al disminuir α mientras que para la segunda sucede lo contrario. Este comportamiento es un efecto del sentido del transporte de sedimento. La barra exterior también experimenta una disminución de cota a medida que el sedimento se desplaza. En cambio, la posición del seno entre las barras no varía, seguramente porque el sedimento no se moviliza en cantidad suficiente. Más allá de la barra exterior no se produce ninguna alteración significativa en el fondo.

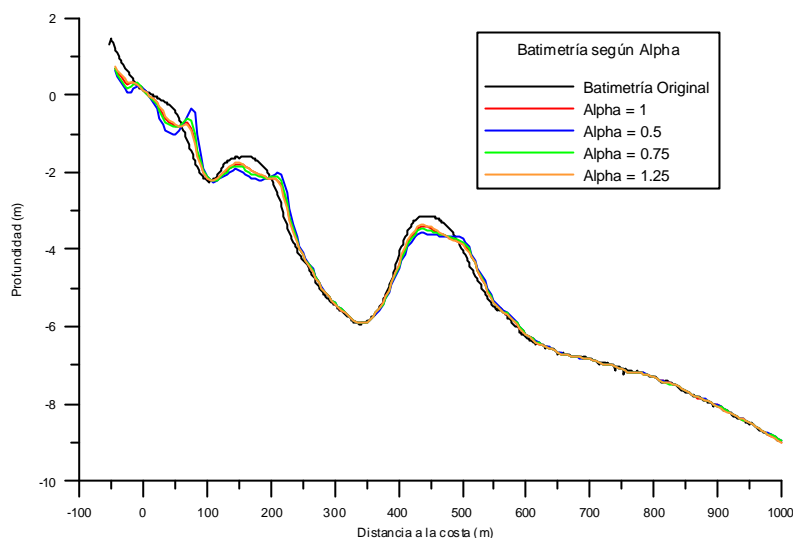


Figura 6.82.- Evolución del fondo en función de α .

6.3.3.2.- Variación del fondo en función del parámetro g

En este apartado se analiza la influencia sobre la morfodinámica de la variación del parámetro γ del modelo de rotura de Battjes & Janssen (1978). Los valores que se analizan son $\gamma=0.6, 0.776, 1$ y 1.2 .

En este caso, la evolución del fondo es más importante a medida que aumenta el valor del parámetro γ (figura 6.83), ya que se forman nuevas barras más estrechas y desplazadas mar adentro a partir de las ya existentes. Como antes, aumentando el valor del parámetro γ , se observa la generación de una barra muy estrecha a 90 m de distancia y como en el caso anterior, la barra interior muestra una tendencia a dividirse en dos, el seno no varía su posición y la segunda barra pierde altura y se divide. Este proceso puede verse de forma progresiva al aumentar γ . Esto quiere decir que, conforme γ aumenta, el oleaje rompe a menores profundidades y se tienen mayores alturas de ola en una zona de rompientes más estrecha, provocando también mayores corrientes y un mayor transporte de sedimentos.

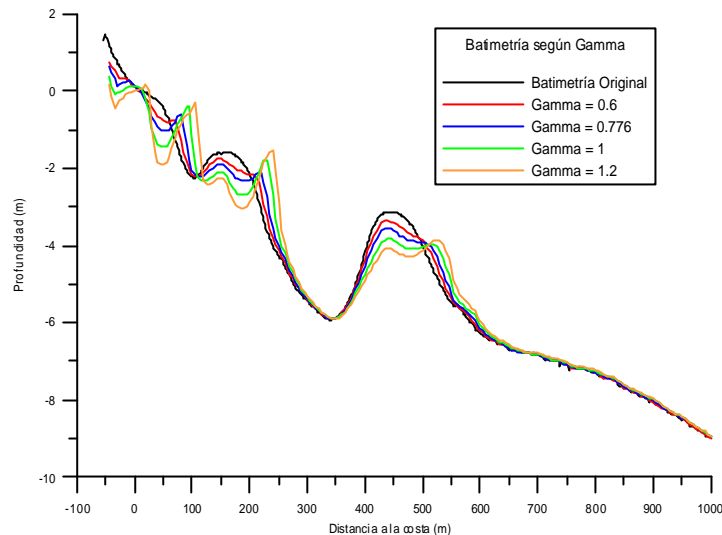


Figura 6.83.- Evolución del fondo en función de γ .

6.3.3.3.- Variación de la viscosidad turbulenta (*eddy viscosity*)

En este apartado se analiza la influencia de la evolución morfodinámica de la viscosidad turbulenta. Como se mencionó anteriormente, la manera como está concebida la turbulencia en el modelado hidrodinámico es introducirla teniendo en cuenta 3 procesos como son la rotura del oleaje, la existencia de capa límite y el flujo tangencial. Por lo tanto, hay tres coeficientes de viscosidad turbulenta a ser introducidos en el modelo, correspondientes a cada uno de los procesos, que se denominan respectivamente ν_B , ν_{BL} y ν_T .

Las combinaciones de valores analizadas son las siguientes:

$$\nu_B = 0.5, \nu_{BL} = 0.15 \text{ y } \nu_T = 0.15$$

$$\nu_B = 1, \nu_{BL} = 0.3 \text{ y } \nu_T = 0.3$$

$$\nu_B = 0.25, \nu_{BL} = 0.075 \text{ y } \nu_T = 0.075$$

$$\nu_B = 2, \nu_{BL} = 0.6 \text{ y } \nu_T = 0.6$$

En los análisis de sensibilidad llevados a cabo anteriormente para la viscosidad turbulenta, se comprobó que esta variable no afecta de manera significativa a la altura de ola, mientras que a la corriente longitudinal le “afecta” sólo en sus valores máximos, que se dan en la zona de las barras. Para los cuatro casos los valores representados son casi los mismos, y no se aprecian diferencias importantes en ninguno de los casos. En figura 6.84 se observa que las zonas donde se produce un mayor transporte son las crestas de las barras, que pierden casi medio metro de altura al desplazarse el sedimento hacia alta mar. También a una distancia aproximada de 50 m de la costa se produce un cambio importante en la configuración del fondo, pero quitando estos tres puntos, el resto del perfil permanece básicamente inalterado. Aunque es difícil de apreciar en la gráfica, puede verse que el transporte es ligeramente mayor para valores menores de la viscosidad turbulenta. Esta poca variación de la batimetría era de esperar por lo poco

que afecta al cálculo del campo de alturas de ola H y de las corrientes longitudinales, v / la manipulación de la *eddy viscosity*.

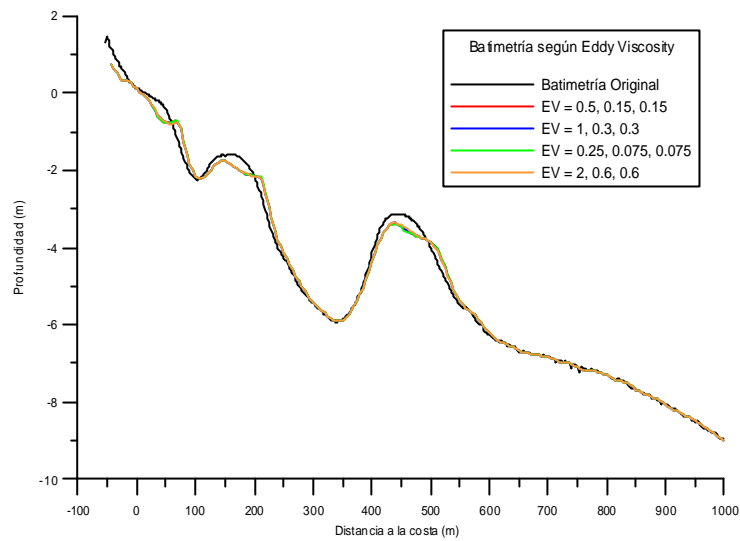


Figura 6.84.- Evolución del fondo en función de la viscosidad turbulenta.

6.3.3.4.- Combinación de α y γ

En este apartado se analiza la influencia en la morfodinámica de la variación de α (valores 0.5 y 1.25) y γ (valores 0.6 y 1.2), que son los parámetros del modelo de rotura del oleaje irregular de Battjes & Janssen (1978).

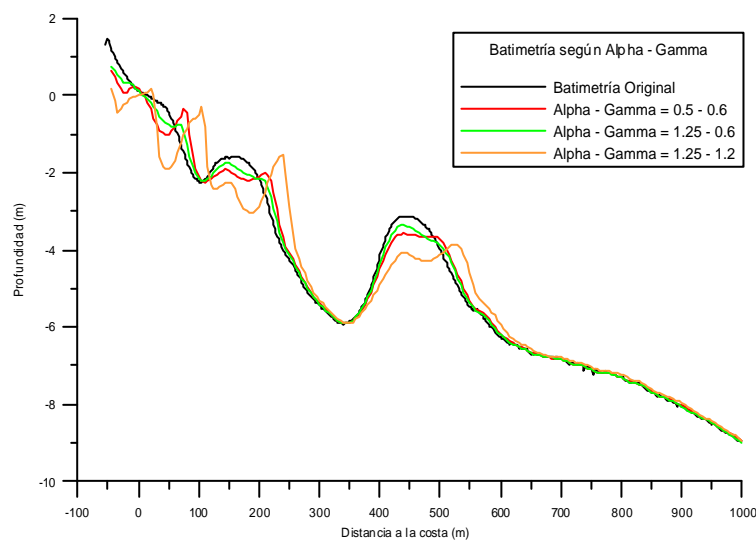


Figura 6.85.- Evolución del fondo en función de α y γ .

Este análisis de sensibilidad se realizó con 3 pares de valores: ($\alpha = 0.5$, $\gamma = 0.6$), ($\alpha = 1.25$, $\gamma = 0.6$) y ($\alpha = 1.25$, $\gamma = 1.2$) que pueden verse en la figura 6.85. De hecho, se modeló una cuarta combinación ($\alpha = 0.5$ y $\gamma = 1.2$), pero ocasionaba grandes variaciones instantáneas de la morfodinámica, con lo cual actuaba un filtro que hace detenerse al modelo. De los casos representados, el par ($\alpha = 1.25$ y $\gamma = 0.6$) es con el que se obtiene una menor modificación del perfil, ya que afecta sólo a las barras y a los primeros 50 m de costa. La variación de cota no supera los 0.3 m y el resto del fondo no sufre alteración. Al tomar valores menores del parámetro α , se produce una variación más importante ($\alpha = 0.5$ y $\gamma = 0.6$), donde incluso se puede apreciar la formación de una barra estrecha a 90 m de distancia mientras que la primera barra se divide en dos más pequeñas. La segunda barra pierde más material que en el caso anterior pero aún conserva su forma de barra. La alteración más importante se produce al alterar el parámetro γ en lugar del parámetro α , ($\alpha = 1.25$ y $\gamma = 1.2$). El transporte que se obtiene para esta situación es lo bastante importante como para cambiar totalmente la forma del fondo en los primeros 250 m, formándose dos barras en los primeros 120 m, una muy pequeña a los 150 m y otra a los 250 m. La configuración del perfil resultante es totalmente distinta a la original, ya que únicamente se mantiene la posición del seno entre las barras (≈ 350 m de la costa) y la segunda barra se rompe y divide en dos de un tamaño parecido entre ellas, pero a unos 0.8 m por debajo de la original y desplazadas hacia mar adentro. El cuarto caso, el que no ha podido ser calculado, debería presentar una alteración más importante aún que ésta última.

6.3.3.5.- Combinación del parámetro g y la viscosidad turbulenta

En este apartado se varían el parámetro γ del modelo de rotura del oleaje irregular de Battjes & Janssen (1978) (que adopta los valores 0.6 y 1.2) y la viscosidad turbulenta, que varía de $\nu_B = 2$, $\nu_{BL} = 0.6$ y $\nu_T = 0.6$ a $\nu_B = 0.25$, $\nu_{BL} = 0.075$ y $\nu_T = 0.075$.

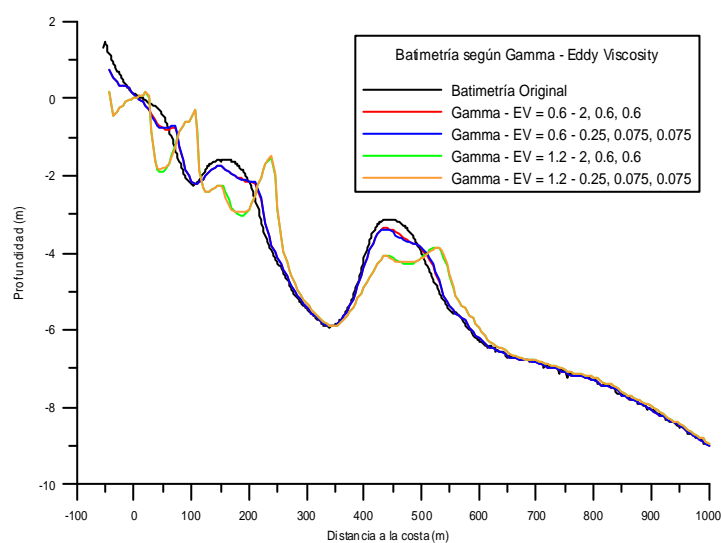


Figura 6.86.- Evolución del fondo en función del parámetro γ y la viscosidad turbulenta.

Los resultados de la evolución del fondo (figura 6.86) variando el parámetro γ y los valores de la viscosidad turbulenta muestran que las simulaciones podrían “agruparse” de dos en dos, ya que la diferencia entre los distintos “pares” de simulaciones la da la variación del parámetro γ , (es decir, las simulaciones con igual γ reproducen una evolución del fondo muy similar, mientras que la variación de la *eddy viscosity* apenas produce ninguna variación significativa). Los resultados de las simulaciones anteriores donde se variaba la *eddy viscosity* corroboran esta tendencia. La variación más significativa del perfil se produce para la $\gamma = 1.2$ (la de mayor error). En ambos casos (con $\gamma = 1.2$), los primeros 250 m de longitud se transforman radicalmente, ya que se forman tres barras bien definidas (y una mas, pequeña). Para las dos simulaciones con $\gamma = 0.6$ los resultados son también muy similares, donde sólo se observa transporte de sedimentos en las crestas de las barras, y se inicia la formación de una tercera barra a 90 m de distancia. Estos pases evidencian la importancia del valor del parámetro γ y las diferencias en la evolución morfodinámica que pueden resultar de su modificación.

6.3.3.6.- Combinación de γ y ϵ

En este apartado se estudia la variación conjunta del parámetro γ de la formulación de Battjes & Janssen (1978) (valores 0.6 y 1.2) y el parámetro ϵ que tiene en cuenta la pendiente del fondo en el transporte de sedimentos (valores 0.5 y 2).

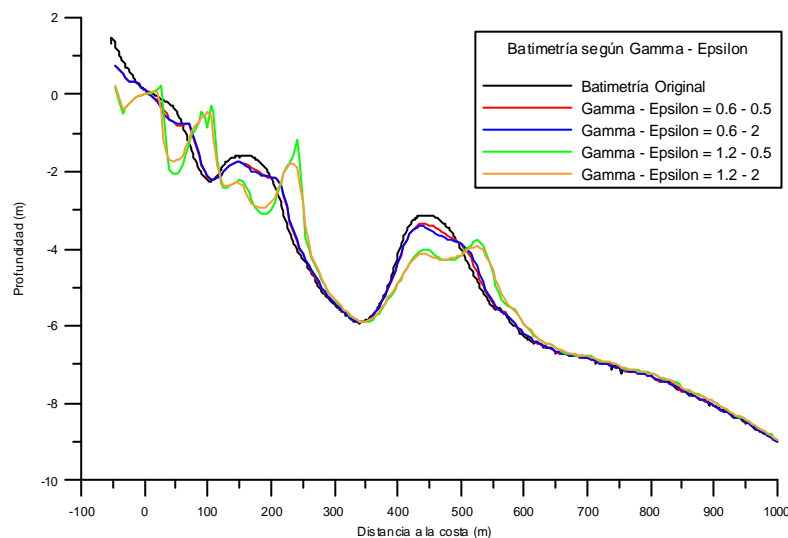


Figura 6.87.- Evolución del fondo en función de γ y ϵ .

A partir de este caso se comienzan a modificar simultáneamente parámetros morfodinámicos e hidrodinámicos. Los resultados de estas simulaciones muestran una tendencia similar a la anterior, en la que la modificación de los valores de los parámetros γ y ϵ muestran una mayor influencia del parámetro γ , mientras que ϵ sólo produce pequeñas diferencias puntuales (figura 6.87). Para los casos de $\gamma = 0.6$ y $\epsilon = 0.5$ y 2 el transporte de sedimento es menor y se da básicamente en las crestas de las barras, teniendo una pérdida de 0.5 m de altura. Al aumentar ϵ el transporte aumenta

ligeramente su valor, pero sólo en los puntos en donde ya había transporte. Para los casos con $\gamma = 1.2$ y $\varepsilon = 0.5$ y 2 la evolución del fondo es notable, formándose, igual que en casos anteriores, cuatro barras en los primeros 250 m de distancia, mientras que la segunda barra se comienza a dividir en dos. El perfil resultante para $\varepsilon = 2$ es más suave que el de $\varepsilon = 0.5$, con unas barras de formas más redondeadas y de menor altura, porque el mayor transporte que se tiene para $\varepsilon = 2$ suaviza los contornos.

6.3.3.7.- Combinación de γ y A_w

En este apartado se varían el parámetro γ de la formulación de Battjes & Janssen (1978) y el parámetro A_w de la formulación de transporte de sedimentos de Watanabe (1982). Los valores considerados son $\gamma = 0.6$ y 1.2 a γ y $A_w = 0.2$ y 0.9 .

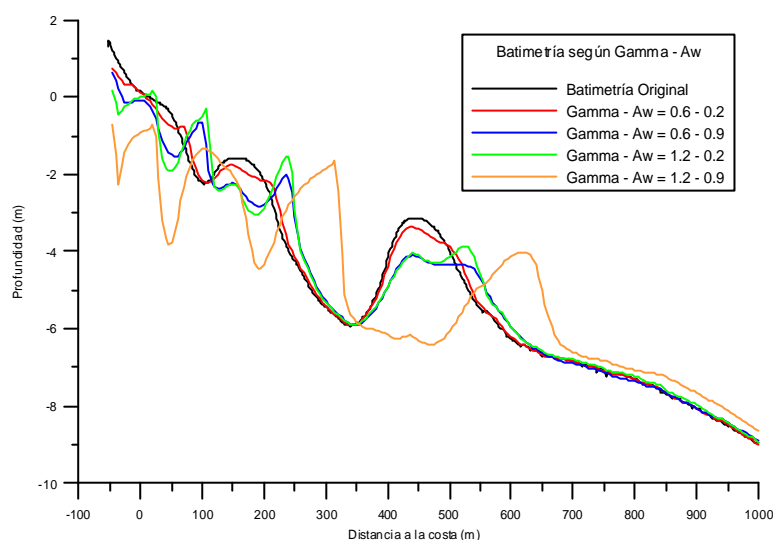


Figura 6.88.- Evolución del fondo en función de γ y A_w .

En este caso se combinan dos variables a las que el modelo es muy sensible. Los efectos de la variable γ ya han aparecido con anterioridad en los anteriores análisis. En este caso concreto se observa que en este modelo morfodinámico, la evolución del fondo es mucho mayor (se forman alteraciones muy marcadas) y más sensible al parámetro A_w de transporte por oleaje. La comparación de los pases (figura 6.88) muestra resultados de evolución del fondo muy distintos entre sí y por consiguiente, de la batimetría original.

En los análisis por separado de estos dos parámetros, se ha comprobado que para valores mayores de γ y A_w , el transporte de sedimento es mayor. Por lo tanto no resulta especialmente sorprendente que al combinar estas variables, el transporte aumente aún más.

En el primer caso de la simulación de la evolución del fondo con $\gamma = 0.6$ y $A_w = 0.2$ se observa poca variación del fondo, únicamente apreciable en la cresta de las barras y en

el cambio de pendiente a unos 50 m de distancia se produce un cierto transporte de sedimento hacia mar adentro, aunque es poco volumen, pues la profundidad aumenta tan solo 0.3 m.

El segundo caso, con $\gamma = 0.6$ y $A_w = 0.9$, se observa una modificación más importante en el perfil de la playa, pues se llegan a formar cuatro barras en los primeros 250 m de distancia, dos más prominentes y dos bastante pequeñas que se alternan. La barra exterior original se desplaza mar adentro y pierde 1 m de altura aunque gana anchura.

El tercer caso, con $\gamma = 1.2$ y $A_w = 0.2$, se observa una pauta similar a la anterior ($\gamma = 0.6$ y $A_w = 0.9$) aunque ahora las barras presentan crestas más agudas y ligeramente más altas. En este caso parece haber un poco más de transporte que en el anterior. Comparando estos dos casos puede verse que γ “produce” mayor transporte que A_w . Estos tres casos mantienen la forma del seno que hay entre las dos barras y no presentan variación del fondo a partir de 650 m de distancia.

El cuarto caso, con $\gamma = 1.2$ y $A_w = 0.9$, es el de mayor transporte de sedimento y por lo tanto la mayor variación de la configuración del fondo, provocando una alteración tal que hace irreconocible la batimetría. En los primeros 350 m de distancia la alteración da lugar a tres barras de unos 1.5 m de altura con unas separaciones entre ellas muy estrechas. La barra exterior original se ha desplazado unos 150 m hacia mar adentro formando una cuarta barra, separada 200 m de las tres anteriores y de menor tamaño que la original. A partir de los 700 m de distancia, la forma del fondo tiene la misma pendiente que originalmente pero ligeramente elevada, debido seguramente al material perdido por la última barra.

6.3.3.8.- *Combinación de la viscosidad turbulenta y ϵ*

En este caso se analiza el impacto sobre la morfodinámica debido a la variación del parámetro ϵ que tiene en cuenta la pendiente del fondo (adopta los valores 0.5 y 2) y la viscosidad turbulenta (valores $\nu_B = 2$, $\nu_{BL} = 0.6$, $\nu_T = 0.6$ y $\nu_B = 0.25$, $\nu_{BL} = 0.075$, $\nu_T = 0.075$).

En las simulaciones realizadas probando la influencia de ϵ y de la viscosidad turbulenta, se ve que, para ambas, los cambios hidromorfodinámicos son pequeños. Por lo tanto, no resulta extraño que en la comparación entre estos resultados y la batimetría original (figura 6.89) apenas haya variación. La única movilización de sedimento se produce en las crestas de las barras y en el cambio de pendiente a 50 m de distancia, tal y como se ha visto en casos anteriores para los parámetros con “poca sensibilidad”. La variación máxima de cota es de 0.3 m y el sedimento se desplaza hacia la pendiente exterior de las barras. En detalle se aprecia que el transporte de sedimento es mínimo para el caso donde los valores de la viscosidad turbulenta son $\nu_B = 2$, $\nu_{BL} = 0.6$, $\nu_T = 0.6$ y $\epsilon = 0.5$, aumentando ligera y paulatinamente al disminuir los valores de la viscosidad turbulenta a $\nu_B = 0.25$, $\nu_{BL} = 0.075$, $\nu_T = 0.075$ y $\epsilon = 0.5$; aumentando otro poco más para valores de viscosidad turbulenta de $\nu_B = 2$, $\nu_{BL} = 0.6$, $\nu_T = 0.6$ y $\epsilon = 2$, y finalmente, es máximo para valores de viscosidad turbulenta de $\nu_B = 0.25$, $\nu_{BL} = 0.075$, $\nu_T = 0.075$ y $\epsilon = 2$.

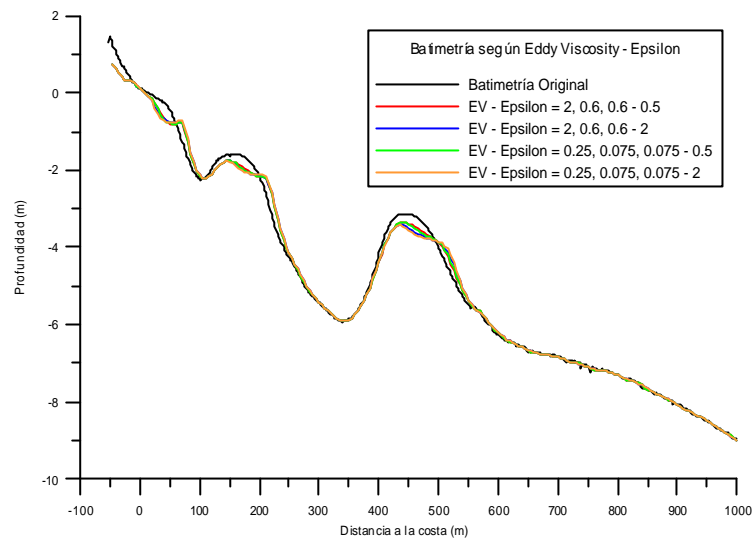


Figura 6.89.- Evolución del fondo en función de la viscosidad turbulenta y ϵ

Estos resultados son coherentes con los obtenidos anteriormente, ya que se había comprobado que para valores pequeños de viscosidad turbulenta hay más movilización (tercer caso de la figura 6.84, donde la simulación es en función de la viscosidad turbulenta con valores de $\nu_B = 0.25$, $\nu_{BL} = 0.075$ y $\nu_T = 0.075$) y que valores mayores de ϵ favorecen el desplazamiento del material. Los resultados también indican que hay más transporte al variar los valores de entrada de la viscosidad turbulenta que al variar la importancia relativa de la pendiente a través del parámetro ϵ .

6.3.3.9.- Combinación de la viscosidad turbulenta y A_w

En este apartado se analiza la evolución del fondo en función de la combinación del parámetro A_w (valores 0.2 y 0.9) de la formulación de Watanabe (1982) y la viscosidad turbulenta (valores $\nu_B = 2$, $\nu_{BL} = 0.6$, $\nu_T = 0.6$ y $\nu_B = 0.25$, $\nu_{BL} = 0.075$, $\nu_T = 0.075$).

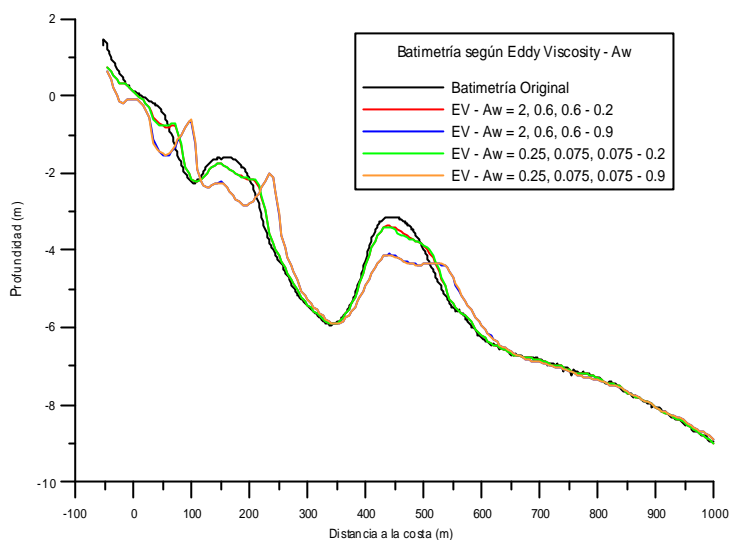


Figura 6.90.- Evolución del fondo en función de la viscosidad turbulenta y A_w

En las simulaciones realizadas probando la influencia de la viscosidad turbulenta y el parámetro A_w (figura 6.90) de la formulación de transporte de Watanabe (1982) se obtiene una tendencia similar a la simulación de la evolución del fondo en función del parámetro γ y la viscosidad turbulenta (figura 6.86), donde los resultados se pueden “agrupar” de dos en dos para iguales valores de A_w . La importancia relativa que los diferentes valores que la viscosidad turbulenta puede tomar es muy pequeña en comparación con el parámetro A_w , que tiene mucha más influencia en el transporte de sedimentos y por lo tanto en la evolución del fondo. Para $A_w = 0.2$ la movilización del sedimento se nota sólo en las crestas de las barras y a 50 m de la costa. Es una variación pequeña, de forma que la cota disminuye únicamente en 0.2 m. Aunque en la figura es casi imperceptible, se aprecia que hay más transporte para valores menores de la viscosidad. Al aumentar el valor del parámetro A_w a 0.9 se produce una mayor variación del fondo. En los primeros 250 m se forman dos barras pequeñas y dos más puntiagudas alternadas. Esta alteración se ha visto anteriormente (variando los valores de γ , γ y α , γ y la viscosidad turbulenta, γ y ε y γ y A_w). La barra exterior original pierde sedimento que se desplaza a su pendiente exterior y disminuye su cota en 0.7 m. La forma final es muy parecida a los otros casos ya vistos. Para $A_w = 0.9$, también se produce un mayor transporte de sedimentos al disminuir los valores de la viscosidad, aunque es casi imperceptible.

Con los distintos casos analizados para la sensibilidad en la simulación de la evolución del fondo, de manera general se pueden dividir en cinco casos según crece la intensidad del transporte de material:

- i. Uno de los casos propuestos para su simulación no pudo ser modelado completo, ($\alpha = 0.5$ y $\gamma = 1.2$), ya que producía grandes variaciones en la batimetría y la simulación no pudo continuar.
- ii. En los casos donde se simulaban los parámetros *eddy viscosity*, y *eddy viscosity - ε* , la evolución del fondo que provocaron fue relativamente suave, donde solo se aprecia una alteración en las crestas de las barras y una ligera pérdida de sedimento en el cambio de pendiente que se observa a una distancia aproximada de 50 m de la costa.

- iii. En el caso de las simulaciones donde intervienen los parámetros hidrodinámicos α y/o γ del modelo de Battjes & Janssen (1978), se aprecia una evolución del fondo más acusada debido a que en principio aumentan la intensidad del transporte de sedimentos, de forma que la primera barra pierde casi toda su altura y se forman dos ondulaciones de ella, que podrían dar lugar a futuras barras. La barra exterior no presenta cambios tan marcados como la primera barra. En el caso de las simulaciones donde interviene el parámetro γ , solo o acompañado de otros parámetros se observa una importante variación del fondo en los primeros 250 m de distancia desde la línea de orilla. En general se genera una pequeña barra estrecha a partir del cambio de pendiente (≈ 50 m de distancia de la costa) y las ondulaciones anteriores quedan más pronunciadas, dando lugar a otras dos barras, la más cercana a la costa aún es pequeña, pero la más alejada ya está bien delimitada, aunque es más estrecha que la original. La barra exterior también se “ondula” formando dos crestas.
- iv. En el caso de las simulaciones donde interviene el parámetro A_w del transporte de sedimentos del modelo morfodinámico. Las simulaciones con la combinación A_w - *eddy viscosity* produce una evolución del perfil del fondo similar a la producida con la combinación γ - *eddy viscosity* (lo que sugiere que la importancia relativa del parámetro γ de rotura y la del transporte por oleaje es similar). Para valores pequeños de A_w , el mayor transporte ocurre sólo en las crestas de las barras. En cualquier caso, el transporte es mayor cuanto menores son los valores de la viscosidad turbulenta. Las simulaciones de A_w con γ producen cambios muy significativos una evolución del fondo, produciendo un gran transporte de sedimentos en dirección *offshore*.
- v. La evolución del fondo más acusada se ha dado en el caso de la combinación del parámetro $\gamma = 1.2$ y del parámetro $A_w = 0.9$ de la formulación de transporte de sedimentos de Watanabe (1982), donde se ha producido un perfil final nada comparable a ninguno de los otros resultados numéricos ni a la batimetría original. En este caso ambas barras se ven absolutamente alteradas, así como la posición del seno entre ambas (en la batimetría original), que se desplaza hacia mar adentro y aparece un depósito de sedimento a distancias superiores a los 600 m de la costa. En los primeros 300 m aparecen claramente las tres barras que se aprecian en las simulaciones anteriores y la barra exterior original se desplaza unos 200 m hacia mar adentro. Estos dos parámetros son los que claramente afectan la magnitud del transporte de sedimentos y en este caso se han combinado los valores máximos considerados en este análisis.

6.4.- Modelado 2DV de perfiles de playa. Resultados y limitaciones

6.4.1.- Evolución Morfodinámica

Una vez se ha calculado el campo hidrodinámico (apartado 6.2.-) y se ha efectuado un análisis de sensibilidad de los distintos parámetros que intervienen en el modelo (apartado 6.3.-), se activa el módulo morfodinámico (Sierra *et al.*, 1999), que consta de dos partes

- La primera calcula el transporte de sedimentos a partir de las variables hidrodinámicas (altura de ola, velocidades orbitales, corrientes longitudinales y transversales, etc.).
- La segunda determina la evolución de fondo a través de la ecuación de conservación de la masa sedimentaria, que se expresa como:

$$(1-p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad [6.3]$$

donde q_x y q_y son las componentes del transporte de sedimentos en las direcciones x e y respectivamente y p es la porosidad.

6.4.1.1.- Comparación con datos de campo (Experimento principal de Egmond).

Los experimentos principales de la playa de Egmond fueron llevados a cabo en los meses de Octubre y Noviembre de 1998. Los datos adquiridos en este estudio experimental fueron utilizados para calibrar y modelar los diferentes modelos numéricos morfodinámicos desarrollados por varios grupos de investigación europeos. Los casos comunes de simulación seleccionados para un ejercicio de intercomparación de resultados incluyeron 3 tipos de pases:

1. Series de tiempo de parámetros hidrodinámicos: comparación de las series de tiempo calculadas (modeladas) con las series de tiempo medidas en campo de la altura de ola significativa H_s (en 5 puntos de medida a lo largo del perfil transversal de la playa) y de las velocidades de las corrientes longitudinales y transversales a la costa (en 7 puntos de medida a lo largo del perfil transversal de la playa) para una serie de *bursts* seleccionados.
2. Eventos hidrodinámicos: comparación de las alturas de ola significativa H_s y de las velocidades longitudinales y transversales calculadas (modeladas) con las medidas a lo largo del perfil transversal de playa para 6 eventos distintos:
 - i. *Burst* 9402 (27-10-98 18:00 h) correspondiente al caso de un ascenso del nivel del mar en un periodo de tormenta, con condiciones de oleaje severo del SW. El nivel medio del mar era de +0.8.
 - ii. *Burst* 9412 (28-10-98 5:00 h) correspondiente al caso de un ascenso del nivel del mar en un periodo de tormenta, con condiciones de oleaje severo del SW. El nivel medio del mar era de +0.8.
 - iii. *Burst* 9416 (28-10-98 08:00 h) correspondiente al caso de un ascenso del nivel del mar en un periodo de tormenta, con condiciones de oleaje moderado del SW. El nivel medio del mar era de +1.4.

- iv. *Burst* 9424 (28-10-98 16:00 h) correspondiente al caso de un descenso del nivel del mar en un periodo de tormenta, con condiciones de oleaje moderado cercanamente perpendicular a la línea de orilla. El nivel medio del mar era de +0.5.
 - v. *Burst* 9431 (28-10-98 23:00 h) correspondiente al caso de un ascenso del nivel del mar en un periodo de tormenta, con condiciones de oleaje severo cercanamente perpendicular a la línea de orilla. El nivel medio del mar era de +1.6.
 - vi. *Burst* 9525 (01-11-98 21:00 h) correspondiente al caso de un descenso del nivel del mar en un periodo de post-tormenta, con condiciones de oleaje débil del NW. El nivel medio del mar era de -0.5.
3. Eventos morfodinámicos: comparación de la evolución morfodinámica calculada (modelada) con la medida a lo largo del perfil transversal de playa para 4 eventos distintos:
- i. Caso de Pre-Tormenta: *bursts* 9180 - 9324 (144 h = 6 días).
 - ii. Caso de Tormenta: *bursts* 9324 - 9492 (168 h = 7 días).
 - iii. Caso de Post-Tormenta: *bursts* 9492 - 9780 (288 h = 12 días).
 - iv. Todo el periodo anterior: *bursts* 9180 - 9780 (600 h = 25 días).

El decaimiento de la altura de ola de los diferentes *bursts* fue calibrado ajustando los valores de los parámetros α y γ de la expresión de Battjes y Janssen (1978) para rotura de oleaje irregular. Los valores de entrada del modelo incluyeron la altura y periodo medidos en campo, el nivel medio del mar, y la dirección del oleaje medida por una boya direccional localizada en mar abierto, a una distancia aproximada de 5 km de la costa. Los rangos de variación de ambos parámetros fueron de $\alpha = [0.6 \text{ a } 1.6]$ y $\gamma = [0.5 \text{ a } 1.3]$. El mejor ajuste fue seleccionado en función del par (α y γ) que minimizó el error absoluto medio relativo R_{MAE} (ecuación [6.1]) en los 5 puntos a lo largo del perfil (cuando se comparó con las medidas de altura de ola).

Como ejemplo, la figura 6.91 muestra los resultados de este proceso de calibración para la altura de ola durante el periodo de tormenta (*bursts* 9313 a 9481) en el punto 1B. Como puede apreciarse en la figura, hay un buen ajuste entre los resultados del modelo y los datos medidos.

La distribución de alturas de ola a lo largo del perfil transversal de la playa para el *burst* 9525 (condiciones de post-tormenta) puede verse en la figura 6.92, mostrando un buen ajuste con los valores medidos y una buena predicción del correspondiente decaimiento de la altura de ola.

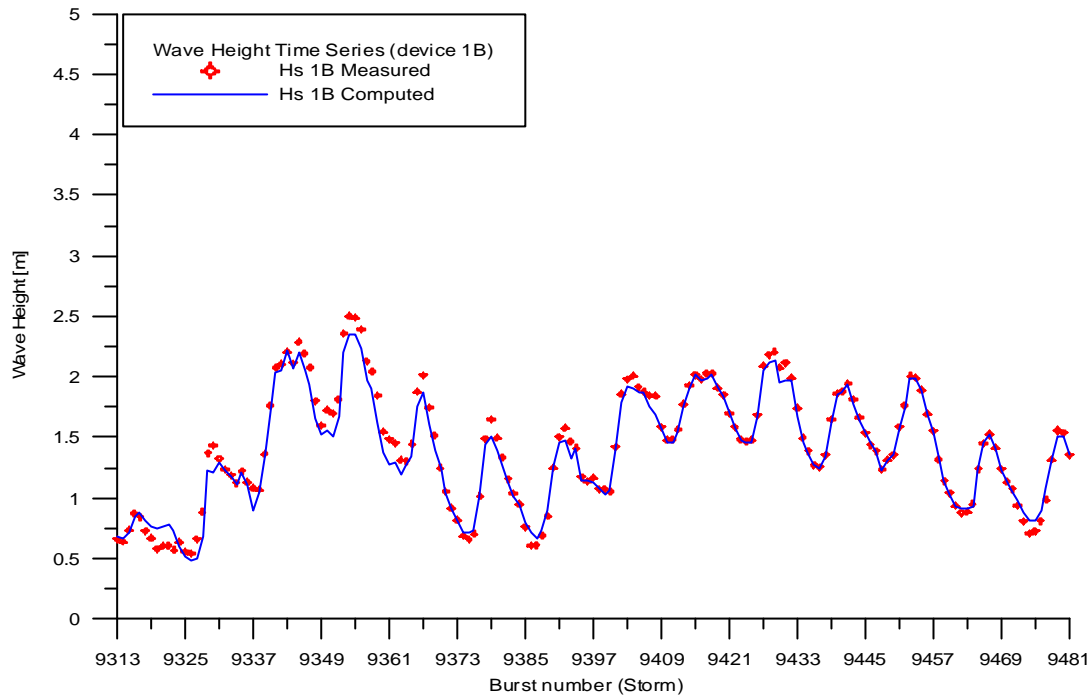


Figura 6.91.- Pases de calibración para la evolución y decaimiento de la altura de ola. Bursts 9313-9481 en el punto 1B.

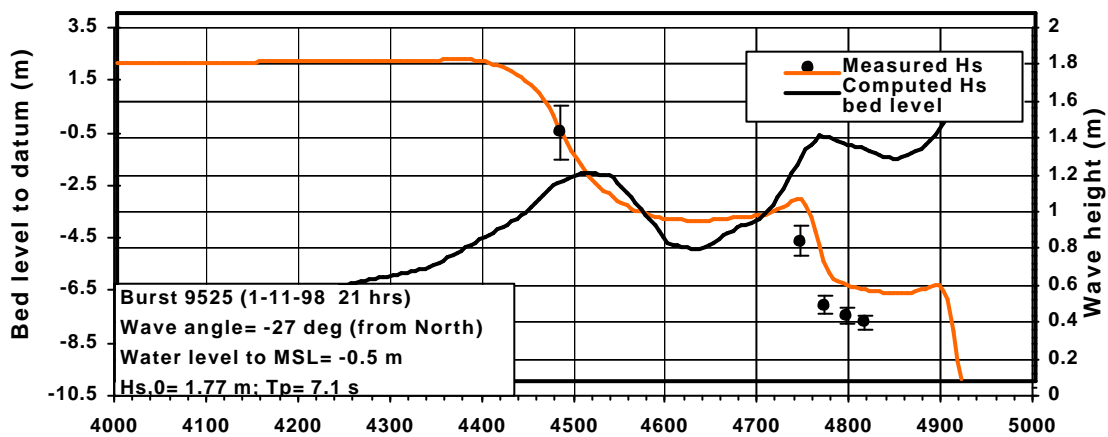


Figura 6.92.- Decaimiento de la altura de ola a lo largo del perfil estudiado. Burst 9525 (condiciones de post-tormenta y disminución del nivel del mar).

La tabla 6.8 resume los R_{MAE} obtenidos de la simulación de las series de tiempo hidrodinámicas comprendidas entre los *bursts* 9383 (26-10-98 23:00 h) y 9431 (28-10-98 23:00 h) durante el periodo de tormenta (es decir, para las condiciones más energéticas y por lo tanto, las más significativas desde el punto de vista de la evolución del fondo). Estos valores de R_{MAE} indican un excelente desempeño por parte del modelo con respecto a la simulación de las alturas de ola (que es el principal mecanismo impulsor de la circulación dentro de la zona de rompientes y de la evolución del fondo) en la mayoría de las estaciones con dispositivos de medida (con la excepción de la estación 1D, la más cercana a la costa, donde aún y así, los resultados son razonables).

| Estación | R _{MAE} Medio | Rango de R _{MAE} |
|----------|------------------------|---------------------------|
| 2 | 0.10 | 0.00 – 0.30 |
| 1A | 0.04 | 0.00 – 0.14 |
| 1B | 0.03 | 0.00 – 0.17 |
| 1C | 0.10 | 0.00 – 0.25 |
| 1D | 0.21 | 0.08 – 0.34 |

Tabla 6.8.- R_{MAE} obtenidos en la simulación del decaimiento de la altura de ola. *Bursts* 9383 - 9431.

Una vez seleccionados los valores de los parámetros α y γ del modelo de Battjes y Janssen (1978) que minimizan el error, se procede a modelar las corrientes 2DV (usando la misma combinación de ambos parámetros) y variando el parámetro de la viscosidad turbulenta total (0.5 a 0.9 m²/s) y el coeficiente de fricción con el fondo (desde un mínimo considerado a partir de la escala de la rugosidad de Nikuradse a un máximo de 0.02). El mejor ajuste seleccionado es aquel que minimiza el R_{MAE} entre las simulaciones numéricas y las medidas de las corrientes longitudinal y transversal a la playa (medidas con correntímetros localizados a 1 m por encima del fondo) en las 7 estaciones de medida localizadas a lo largo del perfil transversal de la playa.

La tabla 6.9 resume los R_{MAE} obtenidos de la simulación de las corrientes longitudinales y aquellas medidas entre los *bursts* 9383 y 9431. Aunque hay una cierta dispersión en los valores obtenidos de los R_{MAE} (especialmente en las estaciones 2 y 1B), los resultados muestran un ajuste de razonable a bueno en todas las estaciones, salvo en la estación 13B, que es la más cercana a la playa), donde el modelo presenta su desempeño más pobre.

| Estación | R _{MAE} Medio | Rango de R _{MAE} |
|----------|------------------------|---------------------------|
| 18B | 0.35 | 0.02 – 0.82 |
| 2 | 0.62 | 0.02 – 2.14 |
| 1A | 0.21 | 0.01 – 0.60 |
| 1B | 0.41 | 0.01 – 1.89 |
| 1C | 0.20 | 0.04 – 0.69 |
| 1D | 0.43 | 0.06 – 0.72 |
| 13B | 0.72 | 0.10 – 0.96 |

Tabla 6.9.- R_{MAE} obtenidos en la simulación de las corrientes longitudinales a la playa. *Bursts* 9383 - 9431

Los mismos R_{MAE} resultantes pero para las corrientes transversales a la costa, se muestran en la tabla 6.10. Como puede observarse, hay una mayor dispersión de los R_{MAE} obtenidos en este caso que con respecto a los obtenidos para las corrientes longitudinales, aunque considerando los valores promediados, el desempeño del modelo es bueno en 5 de las 7 estaciones de medida. Únicamente en las estaciones 1A y 1B el desempeño del modelo es claramente pobre. No obstante vale la pena notar que los

mayores errores (valores altos del R_{MAE}) son los correspondientes a valores pequeños de la corriente medida. Estos R_{MAE} se han calculado teniendo en cuenta únicamente el valor “exacto” medido en cada estación. Cuando se consideran posibles bandas de error, los valores de R_{MAE} obtenidos serían considerablemente menores que los valores previos.

| Estación | R_{MAE} Medio | Rango de R_{MAE} |
|----------|-----------------|--------------------|
| 18B | 0.47 | 0.03 – 1.66 |
| 2 | 0.62 | 0.02 – 2.83 |
| 1A | 5.24 | 0.18 – 14.67 |
| 1B | 1.13 | 0.15 – 3.26 |
| 1C | 0.49 | 0.01 – 0.86 |
| 1D | 0.69 | 0.37 – 0.85 |
| 13B | 0.42 | 0.03 – 0.87 |

Tabla 6.10.- R_{MAE} obtenidos en la simulación de las corrientes transversales a la playa.
Bursts 9383 - 9431

En la figura 6.93 se ilustra una comparación entre las corrientes longitudinales simuladas y las medidas a lo largo del perfil transversal de la playa (*burst 9424*), donde se muestra una buena reproducción de las variaciones de la corriente longitudinal a lo largo del perfil de playa. Una comparación similar para las corrientes transversales a la costa se muestra en la figura 6.94, donde se aprecia un ajuste razonable entre las corrientes medidas y las corrientes simuladas.

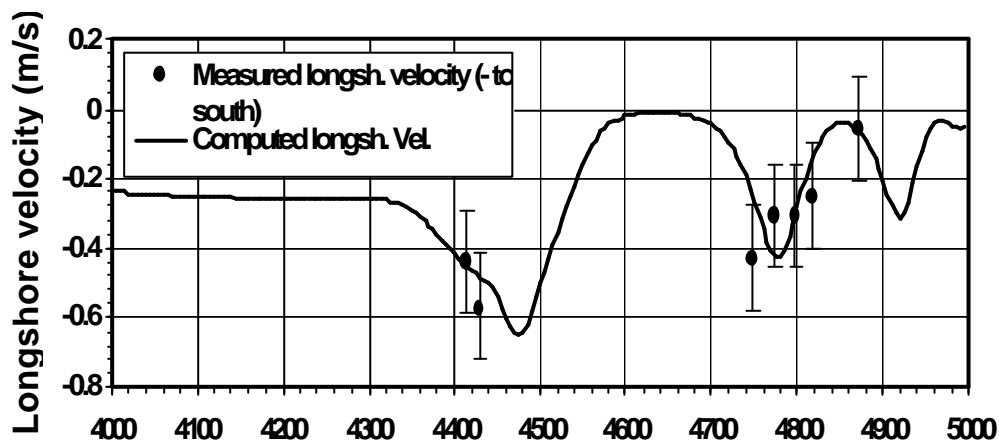


Figura 6.93.- Corriente longitudinal a la playa simulada y medida a lo largo del perfil de playa.
Burst 9424

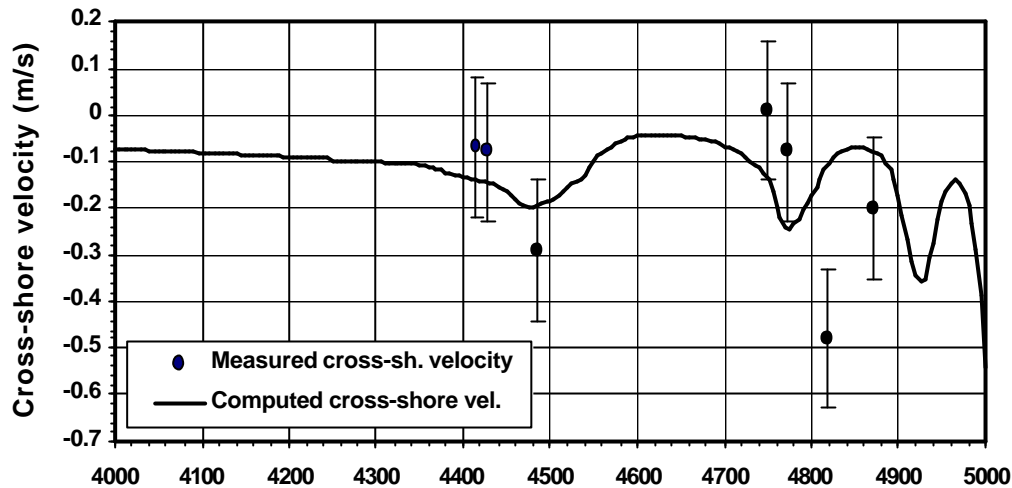


Figura 6.94.- Corriente transversal a la playa simulada y medida a lo largo del perfil de playa. *Burst* 9424

Finalmente los pases de los casos morfodinámicos seleccionados (eventos) se llevaron a cabo con los valores “ajustados” del campo de alturas de ola (parámetros α y γ) y de las corrientes (viscosidad turbulenta y coeficientes de fricción) entre los rangos mencionados anteriormente, así como los valores citados en el estado del arte de los coeficientes de la fórmula de transporte de sedimento seleccionada (Watanabe, 1982, 1985), donde destacan los parámetros A_w (que varía entre 0.1 y 0.3) y A_c (que varía entre 0.1 y 0.9). Los resultados mostrados aquí, corresponden a aquellos parámetros de transporte de sedimentos con los que se obtiene el mejor índice BSS (Brier Skill Score), que es la forma de medir cuantitativamente el desempeño del modelo sobre una predicción base (es decir, que representa así, al mejor ajuste morfodinámico). El índice BSS se puede calcular (según Murphy & Epstein, 1989) como:

$$BSS = 1 - \frac{\langle (z_{b,c} - z_{b,m})^2 \rangle}{\langle (z_{b,0} - z_{b,m})^2 \rangle} \quad [6.4]$$

donde $z_{b,c}$ es el nivel del fondo calculado, $z_{b,m}$ es el nivel medido y $z_{b,0}$ es el perfil inicial ($\langle \rangle$ indica el operador promediado). Este índice compara la diferencia media cuadrática entre la predicción y la observación con la diferencia media cuadrática entre la predicción base y la observación. Una predicción perfecta produciría un índice BSS = 1, la predicción de la propia base daría un valor del índice BSS = 0 y si la predicción del modelo se aleja más de las condiciones medidas finales que de las condiciones iniciales, el valor del índice BSS < 0.

De acuerdo con Van Rijn *et al.* (2003), la aplicación del índice BSS es muy adecuado para la predicción de la evolución del perfil de playa. En este caso, la predicción base del modelo morfodinámico normalmente será el perfil inicial sin cambios. En otras palabras, la batimetría inicial es utilizada como la predicción base para la batimetría final. Esto significa que el índice BSS no se ve alterado por la inclusión de una región

inactiva del dominio modelado (usualmente la región *offshore*). Si esta región se incluye en el modelado, ni las medidas, ni los resultados del modelo muestran cambios, por lo que la suma de los cuadrados de las diferencias no aumenta. Sin embargo, el error medio cuadrático se reduce, ya que el promedio es calculado sobre un mayor número de puntos. No obstante, la relación de las diferencias medias cuadráticas en el término de la derecha del índice BSS permanece igual ya que ambos se reducen en la misma proporción con la inclusión de un área inactiva, por lo que el valor del índice BSS no cambia.

En cambio, el índice BSS puede ser muy sensible a cambios pequeños cuando el valor del denominador es bajo. Por lo tanto, se pueden obtener valores negativos altos aún en modelos que predicen pequeños cambios (con un orden de magnitud correcto) cuando los cambios medidos son muy pequeños. Es interesante notar que cuando el denominador (la diferencia media cuadrática entre la predicción base y las medidas) se reduce a un valor similar que el error medio cuadrático de las medidas, entonces el índice BSS queda sin sentido.

En las figuras 6.95 y 6.96 se muestran dos de los casos calculados, correspondientes al caso de pre-tormenta (18 al 24 de octubre) y al periodo completo (18 de octubre al 12 de noviembre). En el primer caso se muestra un ajuste razonablemente bueno de las predicciones con las medidas, especialmente en la barra exterior. El segundo muestra algunas discrepancias con la batimetría medida debido al intervalo de tiempo relativamente largo de la simulación (25 días), y la acumulación de efectos diferenciales entre las predicciones numéricas y las mediciones.

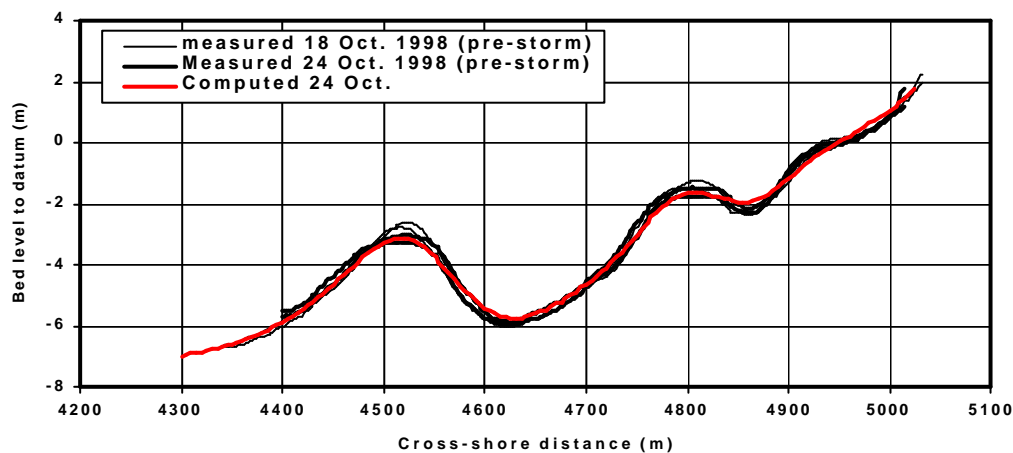


Figura 6.95.- Perfil de playa modelado para el caso de pre-tormenta (18 – 24 de octubre de 1998).

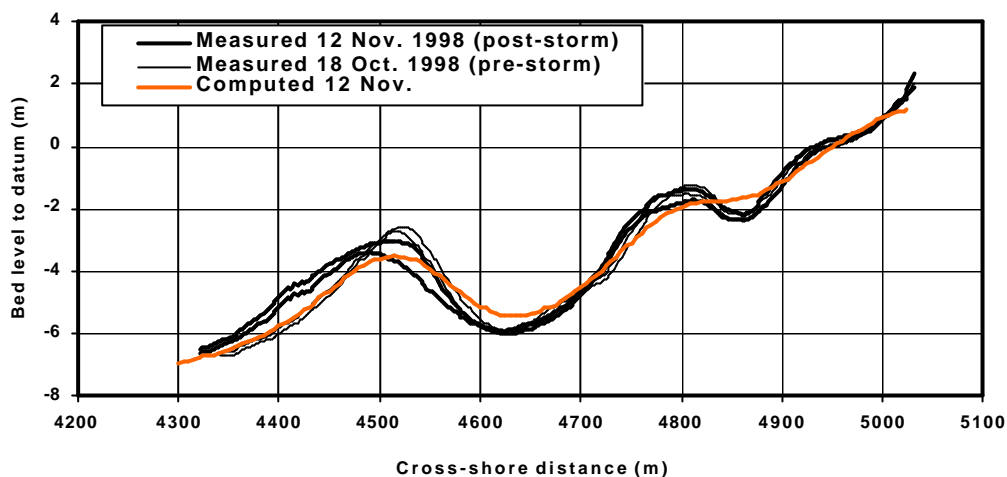


Figura 6.96.- Perfil de playa modelado para todo el periodo de medidas (18 octubre -12 de noviembre de 1998).

En la tabla 6.11 se resumen los valores del índice BSS para 3 de los perfiles más característicos de la zona y para los 3 casos morfodinámicos estudiados: pre-tormenta (18-24 Oct.), tormenta (24-31 Oct.) y post-tormenta (31 Oct. – 12 Nov.).

| Periodo | BSS | | |
|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Exterior | Barra Interior | Playa |
| Pre-tormenta | 0.27 to 0.40 | -0.70 to -0.44 | -0.78 to -0.52 |
| Tormenta | -0.20 to -0.04 | -1.19 to -0.70 | -1.19 to -0.71 |
| Post-tormenta | -0.18 to 0.05 | -0.36 to 0.00 | -0.38 to -0.02 |

Tabla 6.11.- Índices BSS para los pases morfodinámicos llevados a cabo y los 3 tramos más característicos del perfil de playa.

De acuerdo con esta tabla, las mejores predicciones morfodinámicas se dan para el periodo de pre-tormenta para la barra exterior que es la única zona en las que el índice BSS que alcanza valores positivos, mientras que para la barra interior y la playa, los valores son similares. En la predicción de todo el dominio para las condiciones de tormenta y post-tormenta, los valores del índice BSS son negativos, lo que indica que el perfil final (cambios predichos) se aleja más de las observaciones finales que de las condiciones iniciales.

6.5.- Evaluación de la corriente longitudinal en la playa de la barra del Trabucador

Las corrientes inducidas por la rotura de oleaje tienen implicaciones importantes en varios problemas costeros que la Ingeniería Marítima trata de resolver, tales como el transporte longitudinal de sedimentos, la dispersión de contaminantes, el retroceso de la línea de orilla, etc. Aún cuando se han desarrollado diversas teorías para predecir la

magnitud de la corriente longitudinal inducida por la rotura del oleaje, ninguna de ellas parece estar libre de inconvenientes y limitaciones. En este apartado se revisa el balance de *momentum* convencional y se hace énfasis en las tensiones de corte en el fondo. Esto permite una mejor evaluación del coeficiente de fricción y una aproximación alternativa para evaluar la corriente longitudinal. Esta forma de abordar la evaluación de la corriente longitudinal ha sido validada con resultados numéricos y datos de campo de la campaña Delta'93.

En los capítulos anteriores se ha descrito como las olas se propagan hacia la costa, en dominios cada vez menos profundos, que provocan una fricción importante con el fondo y una deformación del oleaje que termina dando lugar a la rotura. Cuando el oleaje rompe, hay una transferencia de *momentum* 3D en forma de movimientos verticales producidos por la masa de agua al hundirse en la columna de agua, así como un movimiento horizontal con altas tensiones de corte. El flujo de *momentum* (asociado al decaimiento de la altura del oleaje después de la rotura) de este movimiento horizontal ha dado origen al concepto de tensión de radiación propuesto por Longuet-Higgins & Stewart (1964). Las corrientes longitudinales a la playa se deben al gradiente *cross-shore* del tensor de radiación (Longuet-Higgins, 1970a, b).

Los primeros modelos (Horikawa, 1988) de corrientes longitudinales a la playa inducidas por la rotura del oleaje en playas con pendiente suave y monótona fueron propuestos por Munk & Taylor (1949), Inman & Quinn (1951) y Egelson (1965). No obstante, los primeros modelos basados en la física fueron desarrollados por Longuet-Higgins (1970a, b), Bowen (1969), Thornton (1970) y Komar & Inman (1970). Estos modelos se basan en el balance (ecuación [6.5]) entre los gradientes del tensor de radiación (mecanismo impulsor), tensiones de corte turbulentas (mecanismo “de forma”) y las tensiones de corte en el fondo τ_c (mecanismo de oposición). Asumiendo un tren de oleaje estacionario y monocromático aproximándose a la costa sobre un fondo con una pendiente suave y monótona, isóbatas paralelas a la línea de orilla, un ángulo bajo de aproximación del oleaje en rotura ($\cos \alpha_b \approx 1$) y la velocidad orbital máxima mayor que la velocidad de la corriente longitudinal predicha (suposición únicamente válida cuando $\alpha_b \leq 25^\circ$), este balance se puede expresar como:

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} - \tau_c = 0 \quad [6.5]$$

La principal diferencia entre los modelos basados en esta ecuación es la forma en la que evalúan la mezcla lateral (la viscosidad turbulenta horizontal) y la fricción con el fondo (Komar & Oltman-Shay, 1990). Los modelos numéricos del estado del arte (e.g. Sánchez-Arcilla *et al.*, 1992) pueden también incorporar gradientes longitudinales de las variaciones en el nivel del mar, viento y movimientos de baja frecuencia como mecanismos impulsores de las corrientes longitudinales.

No obstante, la solución general de estos modelos tiene dos importantes inconvenientes. Por una parte, las ecuaciones resultantes de la corriente longitudinal son función de unos parámetros de ajuste (e.g. Thornton & Guza, 1983; Battjes & Janssen, 1978; Battjes & Stive, 1984) que deben ser calculados a partir de datos *in situ* (como

por ejemplo, el índice de rotura o el coeficiente de fricción con el fondo (C_f) que de hecho, caracteriza así las tensiones de corte en el fondo. Por una parte, el coeficiente de fricción con el fondo no puede ser medido en el campo, de tal manera que es necesario calcularlo (midiendo los parámetros anteriormente mencionados y ajustando los resultados con las medidas hasta alcanzar las diferencias mínimas entre las medidas y los resultados numéricos). Debido a esto, desde una perspectiva operacional, las corrientes longitudinales necesitan ser medias en un cierto número de puntos a lo ancho de la zona de rompientes, de tal manera que los parámetros libres puedan ser ajustados y la distribución transversal a la playa de la corriente longitudinal (y eventualmente la vertical) pueda ser correctamente predicha. Esto se aplica en particular a las tensiones de corte (el término de resistencia esencial en el balance de *momentum*) que, por lo regular, se evalúan sin tener en cuenta las características particulares del sedimento o la existencia de formas en el fondo, o la presencia de oleaje (que de hecho, aumenta la fricción con el fondo, ver Madsen, 1994). Normalmente los modelos numéricos asumen un valor constante de la fricción con el fondo, independiente de las formas del fondo, la naturaleza específica del sedimento y la naturaleza del flujo. De hecho, hay más de 30 “teorías no lineales” que intentan predecir las tensiones de corte (revisadas por Soulsby *et al.*, 1993) y ninguna de ellas está universalmente aceptada. Esto introduce una serie de errores en la predicción de las corrientes longitudinales, tanto desde las aproximaciones teóricas como desde las aproximaciones numéricas. En este apartado se revisa el balance de *momentum* evaluando las tensiones de corte para oleaje irregular propagándose sobre una corriente (Madsen, 1994), tomando en cuenta las características del fondo y la naturaleza del movimiento hidrodinámico (es decir, en presencia de oleaje).

6.5.1.- Herramientas y métodos

Para evaluar el rango que puede tener el coeficiente de fricción C_f bajo distintas condiciones, así como las implicaciones en la predicción de la corriente longitudinal, v_l , se utilizarán las herramientas siguientes:

- Datos de campo de oleaje y corrientes en el Delta del Ebro (Campaña Delta'93).
- Modelado numérico (para la distribución transversal a la playa de los parámetros hidrodinámicos).
- El balance de *momentum* simplificado.

Es interesante recalcar que la playa del trabucador en el Delta del Ebro es una playa barrada con una cierta uniformidad longitudinal (Rodríguez *et al.*, 1994, 1995, 1999; Sánchez-Arcilla *et al.*, 1998) que permite evaluar las teorías anteriormente explicadas en condiciones naturales y relativamente “simplificadas”. Los datos medidos a lo ancho de la zona de rompientes (figura 6.97) incluyeron la batimetría, el oleaje fuera y dentro de la zona de rompientes, el nivel medio del agua a lo ancho de la zona de rompientes y perfiles de velocidades.

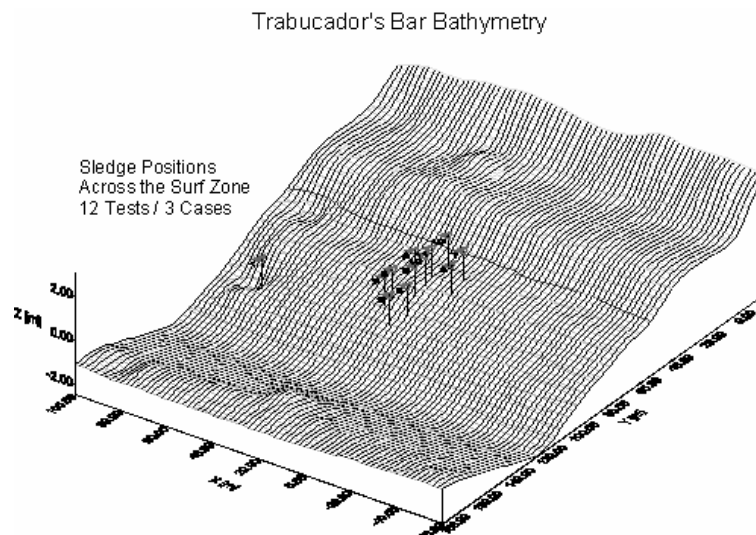


Figura 6.97.- Batimetría de la Barra del Trabucador y posiciones de medida (Trineo) durante la campaña Delta'93

En la zona de rompientes (desde la línea de orilla hasta ≈ 2 m de profundidad), el oleaje, la profundidad (h) y nivel medio del mar, así como las velocidades fueron medidas con el trineo en 12 posiciones distintas (figura 6.97). Como se ha mencionado antes, las medidas de velocidades se realizaron con 6 correntímetros electromagnéticos con una frecuencia de muestreo de 20 Hz, permitiendo la identificación de la estructura 3D del flujo en las escalas de macroturbulencia, oleaje y corrientes. Los niveles fueron medidos con el sensor de alturas de ola Etrometa (Sánchez-Arcilla *et al.*, 1998) especialmente diseñado para medir en la zona de rompientes. Los perfiles topobatemétricos en la zona de rompientes (hasta aproximadamente a 2 m de profundidad) fueron realizados con topografía convencional y midiendo la posición y nivel del trineo durante los experimentos. El clima de oleaje fue medido con una boya direccional situada en Cap Tortosa, a unos 50 m de profundidad y con una boya direccional situada al frente de la barra del Trabucador, aproximadamente a 7.5 m de profundidad, grabando series de 20 minutos cada 3 horas durante la campaña.

Analizando los datos de oleaje, se identificaron 3 casos con una intensidad de oleaje diferente. Un resumen de los datos medidos durante la campaña Delta'93 puede verse en las tablas 6.12 y 6.13. Las condiciones del oleaje medido se muestran en las figuras 6.98, 6.99 y 6.100.

Es importante mencionar que, como inconveniente importante en el desarrollo de la evaluación de las tensiones de corte y velocidad de la corriente, los test utilizados fueron llevados a cabo de manera secuencial (no simultánea) a través de la zona de rompientes, es decir, que las condiciones hidrodinámicas fueron medidas en momentos distintos. No obstante, durante los tests 5 al 7 (caso 2) y los tests 8 al 12 (caso 3), las condiciones del oleaje fueron razonablemente estacionarias, permitiendo la adquisición de la distribución transversal a la costa de la corriente longitudinal y del campo de oleaje.

Con esta información fue posible seleccionar distintos “segmentos” del decaimiento de la altura de ola para balancear el gradiente transversal a la costa del tensor de radiación con las tensiones de corte en el fondo. En este apartado, solo se analizarán los casos II y III ya que el caso I estuvo lejos de ser un oleaje estacionario.

| Casos | Fecha | Intensidad del oleaje | Tests |
|-------|------------|-----------------------|-------|
| I | 15-12-1993 | Bajo | 1-4 |
| II | 16-12-1993 | Medio | 5-7 |
| III | 16-12-1993 | Medio | 8-12 |

Tabla 6.12.- “Casos” de oleaje observados durante la campaña Delta’93.

| Test | T_{01} (s) | H_{rms} (m) | Espectro | Estado de Mar | Dist. Transversal (m) | MWL (cm) |
|------|--------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------------|----------|
| 1 | 4.03 | 0.23 | Doble Pico | No Estacionario | 48.70 | 113 |
| 2 | 3.29 | 0.28 | Banda Ancha | No Estacionario | 39.30 | 88 |
| 3 | 3.93 | 0.33 | Banda Ancha | No Estacionario | 35.83 | 70 |
| 4 | 2.61 | 0.29 | Banda Ancha | No Estacionario | 25.54 | 41 |
| 5 | 2.85 | 0.47 | Banda Estrecha | Q-Estacionario | 39.92 | 129 |
| 6 | 3.00 | 0.39 | Banda Estrecha | Q-Estacionario | 25.20 | 80 |
| 7 | 2.94 | 0.32 | Banda Estrecha | Q-Estacionario | 17.11 | 69 |
| 8 | 3.05 | 0.41 | Banda Estrecha | Q-Estacionario | 45.46 | 134 |
| 9 | 2.72 | 0.39 | Banda Estrecha | Q-Estacionario | 31.77 | 69 |
| 10 | 3.06 | 0.34 | Banda Estrecha | Q-Estacionario | 25.95 | 68 |
| 11 | 2.80 | 0.27 | Banda Estrecha | Q-Estacionario | 21.52 | 60 |
| 12 | 2.88 | 0.19 | Banda Estrecha | Q-Estacionario | 11.99 | 38 |

Tabla 6.13.- Condiciones de oleaje medido durante la campaña Delta’93.

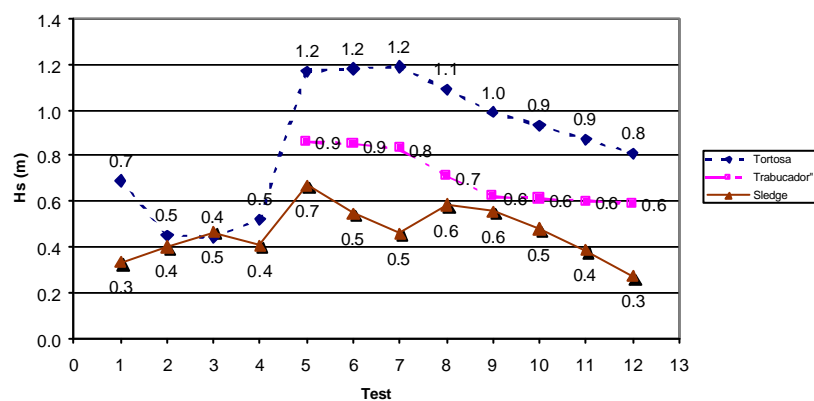


Figura 6.98.- Alturas de ola medidas durante la campaña Delta’93.

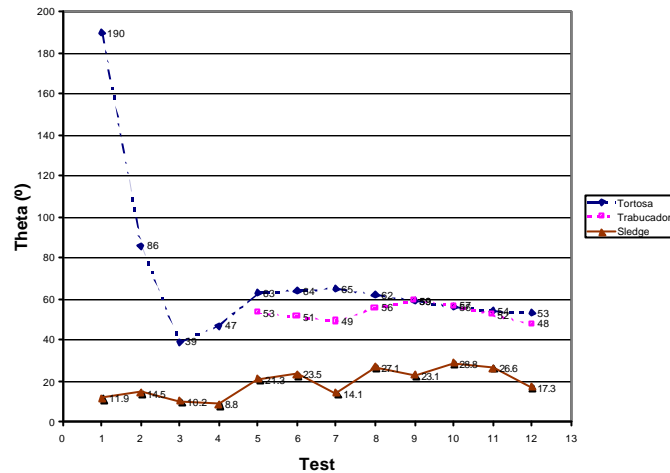


Figura 6.99.- Ángulo de aproximación del oleaje durante la campaña Delta '93.

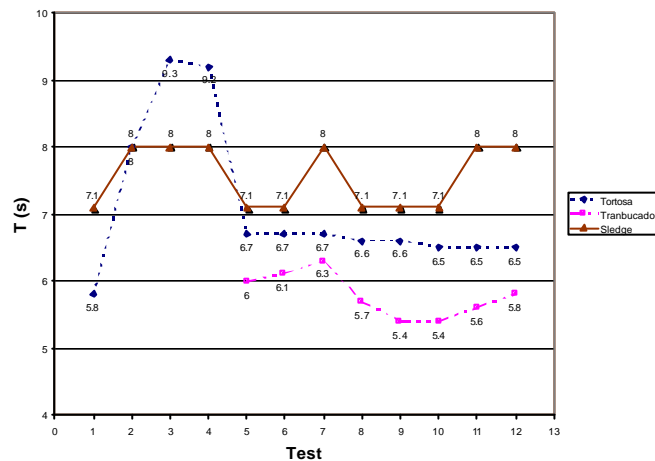


Figura 6.100.- Periodos del oleaje medidos durante la campaña Delta '93.

6.5.2.- Modelado hidrodinámico

Para los casos seleccionados, donde las condiciones del oleaje fueron razonablemente estacionarias, el modelado numérico de los procesos hidrodinámicos se efectuó con los modelos numéricos desarrollados en el LIM-UPC. Como se indicó anteriormente el modelo de propagación de oleaje se basa en un módulo numérico (Rivero *et al.*, 1994) que reproduce los principales fenómenos físicos asociados con la propagación del oleaje a la costa: *shoaling*, refracción, difracción, interacción olas-corrientes, dispersión frecuencial no lineal y disipación de energía debido a la fricción con el fondo y rotura (la cual está modelada de acuerdo a Battjes & Janssen, 1978, o Battjes & Stive, 1984). La circulación en la zona cercana a la costa se basa en un modelo numérico Q3D (Sánchez-Arcilla *et al.*, 1990, 1992). Una descripción más detallada de estos modelos puede verse en el capítulo 5 o en Sánchez-Arcilla *et al.*, 2001.

6.5.3.- Comparación entre simulaciones numéricas y medidas de campo

Las simulaciones numéricas comienzan con las condiciones de oleaje medidas *offshore* (tabla 6.14). Debido al hecho de que los datos medidos durante la campaña Delta'93 fueron adquiridos de manera secuencial, el modelado numérico para cada caso fue hecho con las condiciones medias de cada caso (utilizando la boya de 50 m de profundidad de Cap Tortosa).

| Casos | Fecha | Tests | H_0 | T_s | q |
|-------|------------|-------|-------|-------|------|
| I | 15-12-1993 | 2-4 | 0.33 | 3.73 | 57.4 |
| II | 16-12-1993 | 5-7 | 0.83 | 4.5 | 64.1 |
| III | 16-12-1993 | 8-12 | 0.56 | 4.21 | 56.9 |

Tabla 6.14.- Condiciones del oleaje en aguas profundas medidas por la boya de Cap Tortosa durante la campaña Delta'93.

6.5.3.1.- Niveles del agua

Este es un parámetro de entrada en el modelado numérico. Debido a que durante la campaña Delta'93 no se dispuso de un mareógrafo, fue necesario calcular los niveles del agua para las simulaciones numéricas, tomando en cuenta el incremento de la marea astronómica y de la marea meteorológica (considerando el *setup* debido al viento y la variación de nivel de acuerdo a la presión atmosférica). Los niveles calculados se presentan en la tabla 6.15.

| Casos | Fecha | Tests | Marea Astronomica(m) | Marea Meteorologica (m) | Nivel (m) |
|-------|------------|-------|-------------------------|----------------------------|-----------|
| I | 15-12-1993 | 2-4 | -0.02 | 0.01 | -0.01 |
| II | 16-12-1993 | 5-7 | 0.08 | -0.04 | 0.05 |
| III | 16-12-1993 | 8-12 | -0.01 | -0.04 | -0.05 |

Tabla 6.15.- Nivel del mar durante la campaña Delta'93.

6.5.3.2.- Decaimiento de la altura de ola

Para validar la hipótesis de la estacionariedad de las condiciones del oleaje y seleccionar la extensión de playa para este estudio, se simuló el decaimiento de la altura de ola considerando como punto de partida las condiciones medias del oleaje medidas para cada caso. Como puede observarse en los resultados, el decaimiento de la altura de ola simulado ajusta razonablemente bien con el decaimiento medido con el sensor de alturas de ola del trineo en bs distintos puntos de la zona de rompientes. Para el ajuste, se llevo a cabo un análisis de sensibilidad, de donde se desprende que los coeficientes más importantes para este ajuste son los parámetros de rotura α y γ (Battjes & Jansen, 1978). Las figuras 6.101 y 6.102 muestran los resultados de la calibración del

decaimiento de la altura del oleaje. Como se puede observar, el ajuste entre la predicción de las condiciones medias y las medidas experimentales es razonablemente bueno.

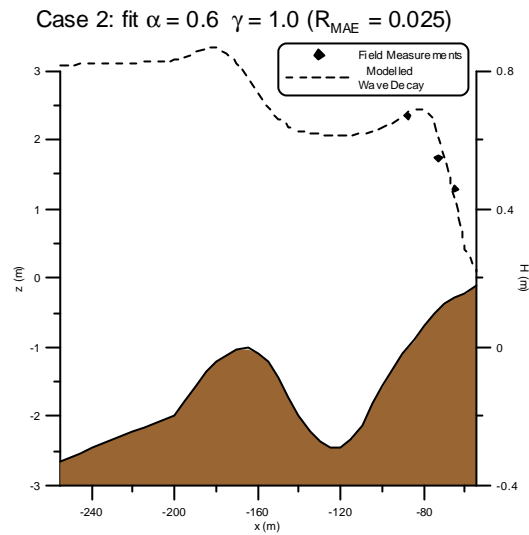


Figura 6.101.- Ajuste del decaimiento de la altura de ola modelada con datos experimentales. Caso II de la campaña Delta'93.

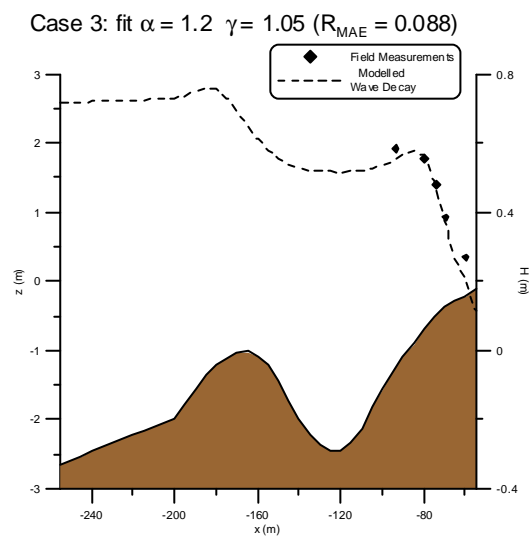


Figura 6.102.- Ajuste del decaimiento de la altura de ola modelada con datos experimentales. Caso III de la campaña Delta'93.

6.5.4.- Evaluación de las tensiones de corte en el fondo

Como primer paso en la evaluación del coeficiente de fricción con el fondo, es conveniente revisar el balance entre el gradiente del tensor de radiación (producido por el decaimiento de la altura de ola), las tensiones turbulentas y las tensiones de corte en el fondo (τ_c) (ecuación [6.5]) en el que en primera instancia se obvia el término del

mezclado turbulento (que como se mencionó anteriormente es el mecanismo que da forma a la distribución transversal a la costa de las corrientes longitudinales). De esta manera, en términos promediados, el gradiente transversal a la costa del tensor de radiación (mecanismo impulsor) debe balancearse con las tensiones de corte en el fondo (mecanismo de resistencia al flujo):

$$\left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right)_{avg} = (\tau_c)_{avg} \quad [6.6]$$

donde S_{xy} se obtiene experimentalmente. Las medidas de campo realizadas en la parte media de la zona de rompientes serán utilizadas para evaluar el valor experimental de este gradiente, que permitirá determinar el valor “necesario” del τ_c para resistir dicho empuje, es decir:

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \approx \frac{\Delta S_{xy}}{\Delta x} = \tau_c \quad [6.7]$$

Por otra parte, las tensiones de corte en el fondo (τ_c) son función de varios parámetros, incluidos la velocidad orbital máxima, la escala de rugosidad del fondo, el ángulo entre olas y corrientes ϕ_{wc} , obtenido por medio de las componentes horizontales de las velocidades (Jiménez, 1994), la fase del oleaje (ω), la profundidad (h) y desde luego, la magnitud de la corriente longitudinal (Madsen, 1994).

$$\tau_c = \tau_c (u_{orb}, k_N, \phi_{wc}, \omega, h, \nu l) \quad [6.8]$$

Una vez obtenido τ_c , (ecuación [6.7]) es posible evaluar la velocidad de la corriente de manera indirecta a través del modelo de las tensiones de corte en el fondo

6.5.5.- Análisis de resultados

Partiendo de los datos experimentales anteriormente mencionados, se calcula el factor de fricción del oleaje en presencia de una corriente $f_{wc} = f_{wc}(u_{orb}, k_n, \omega, C_\mu)$, tomando como primera iteración $C_\mu = 1$ para el caso de “oleaje puro”, de manera que se obtengan la velocidad de corte del oleaje (u_{*wm}) y las tensiones de corte correspondientes (τ_{wr}) debidas al oleaje (ecuaciones [6.9] y [6.10]):

$$f_{wc} = C_{\mu} \exp \left\{ 7.02 \left(\frac{C_{\mu} u_{br}}{k_N w_r} \right)^{-0.078} - 8.82 \right\} \quad \text{for} \quad 0.2 < \frac{C_{\mu} u_{br}}{k_N w_r} < 10^2$$

$$f_{wc} = C_{\mu} \exp \left\{ 5.61 \left(\frac{C_{\mu} u_{br}}{k_N w_r} \right)^{-0.109} - 7.30 \right\} \quad \text{for} \quad 10^2 < \frac{C_{\mu} u_{br}}{k_N w_r} < 10^4$$
[6.9]

$$\frac{1}{\rho} \tau_{wr} = u_{*wm}^2 = \frac{1}{2} f_{wc} u_{br}^2$$
[6.10]

Con estos parámetros, es posible obtener el grosor de la capa límite del oleaje δ_{wc} (ecuación [6.11]):

$$\delta_{wc} = \begin{cases} 2\kappa u_{*r} / w_r & \text{for} \quad C_{\mu} u_{orb} / (k_N w_r) > 8 \\ k_N & \text{for} \quad C_{\mu} u_{orb} / (k_N w_r) > 8 \end{cases}$$
[6.11]

El siguiente paso es calcular la fuerza relativa (μ) de las velocidades de corte de las corrientes y del oleaje:

$$\mu = \left(\frac{u_{*c}}{u_{*wm}} \right)^2$$
[6.12]

para lo cual, es necesario calcular C_{μ} :

$$C_{\mu} = (1 + 2\mu |\cos \phi_{cw}| + \mu^2)^{1/2}$$
[6.13]

Con este nuevo valor de C_{μ} comienza un proceso iterativo (Madsen, 1994) que termina cuando la diferencia entre dos valores consecutivos de f_{wc} es menor al 1%. En este punto, es posible calcular la velocidad de la corriente longitudinal (tabla 6.16)

| Casos | τ_c (exp) [N/m ²] | \bar{v} (exp) _{avgd} [m/s] | \bar{v} (Madsen'94) _{avgd} [m/s] con τ_c (exp) |
|-------|---------------------------------------|--|---|
| II | 3.161 | 0.704 | 1.097 |
| III | 1.993 | 0.450 | 0.811 |

Tabla 6.16.- Valores experimentales de las tensiones de corte vs. el valor de la corriente longitudinal (medida y calculada).

Como se puede ver en la tabla 6.16, considerando la rugosidad del fondo como $k_N = (2.5 d_{50})$ este procedimiento sobre-estima la velocidad de la corriente longitudinal verticalmente integrada. De las medidas de campo, hay claramente 2 incertidumbres importantes en los datos de entrada de este modelo:

1. La escala de rugosidad del fondo k_N (que de hecho, depende de las características del sedimento y del fondo).
2. El ángulo entre las olas y las corrientes (que afecta el valor del factor de fricción de las corrientes en presencia del oleaje).

Para comprobar la robustez de estos cálculos contra los valores experimentales de campo, se ha realizado un análisis de sensibilidad con estos dos parámetros.

6.5.5.1.- Escala de rugosidad del fondo k_n

Ya que no hay información disponible (de las campañas de campo) sobre la distribución transversal a la costa de los parámetros granulométricos de la Playa del Trabucador, ni de las características geométricas del fondo, el análisis de sensibilidad se realizó dejando constantes los parámetros del oleaje, así como la tensión de corte experimental y variando el valor de la escala de rugosidad del fondo. Los resultados obtenidos sugieren que el valor de k_n es de un orden de magnitud mayor que la rugosidad del fondo calculada como $k_n = (2 \cdot d_{50})$ (figuras 6.103 y 6.104)

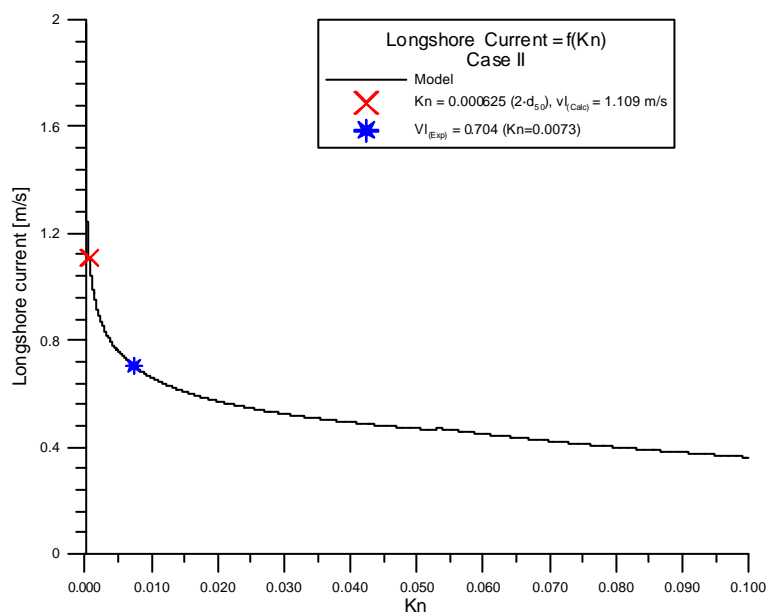


Figura 6.103.- Análisis de sensibilidad de K_n para el caso II.

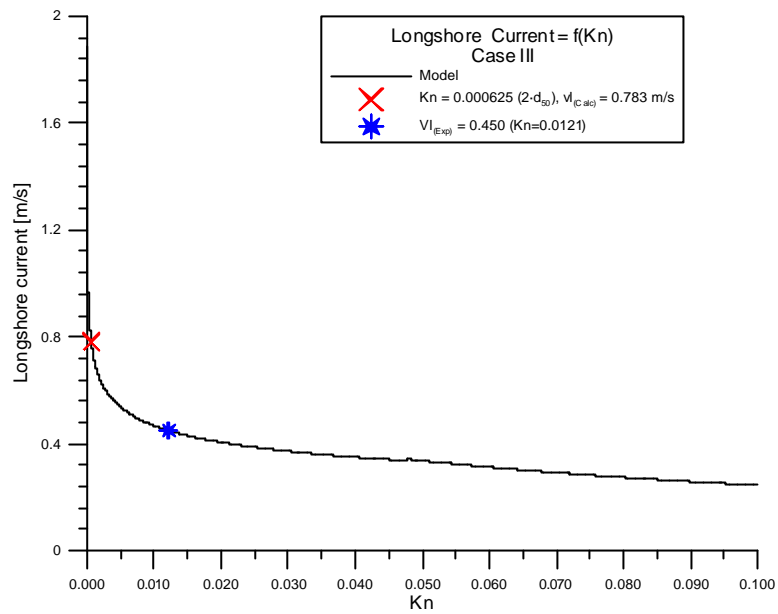


Figura 6.104.- Análisis de sensibilidad de K_n para el caso III.

6.5.5.2.- Ángulo entre olas y corrientes

Otro de los parámetros más importantes involucrados en la estimación de la corriente longitudinal es el ángulo entre las olas y las corrientes, de tal manera que también se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para este ángulo ϕ_{wc} , manteniendo constantes los parámetros del oleaje (figuras 6.105 y 6.106). Estos análisis se discuten más adelante.

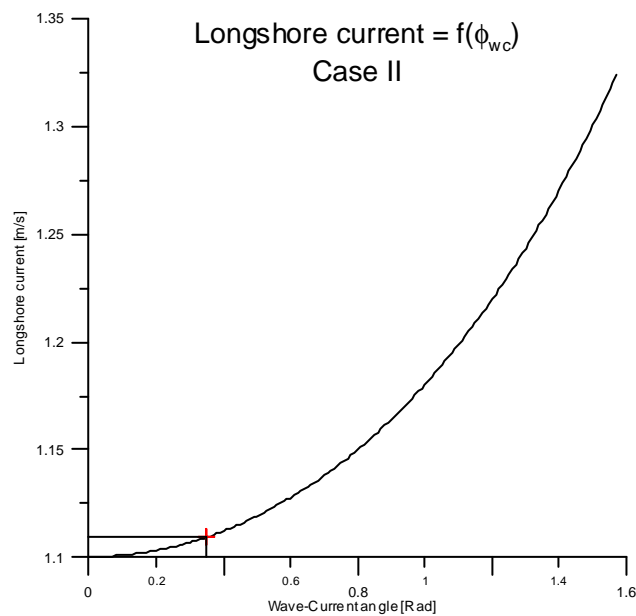
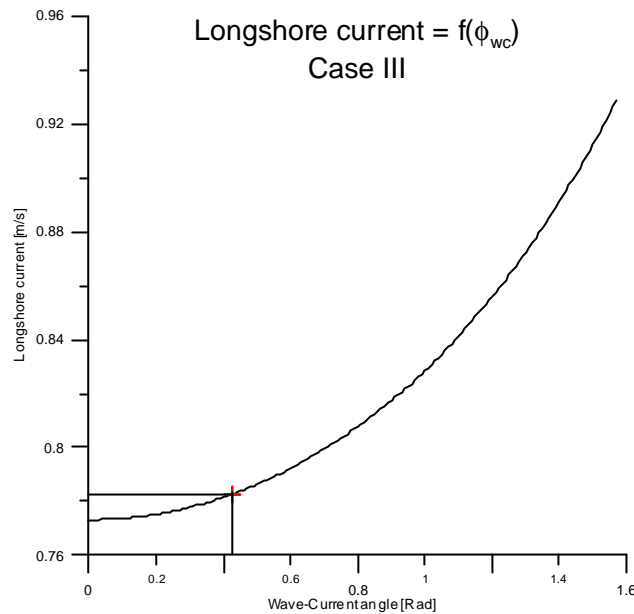


Figura 6.105.- Análisis de sensibilidad de ϕ_{wc} para el caso II.

Figura 6.106.- Análisis de sensibilidad de ϕ_{wc} para el caso III.

6.5.5.3.- Factor de fricción

Con respecto al factor de fricción de la corriente, este fue calculado por medio de la expresión clásica de Longuet-Higgins (1970a, b) (ecuación [6.14]) para cada caso (tabla 6.17):

$$\tau_c = \frac{2}{\pi} \rho C_f u_{bm} \bar{v} l \quad [6.14]$$

| Casos | Coefficiente de Fricción C_f (Longuet-Higgins) |
|-------|---|
| II | 0.01254 |
| III | 0.01305 |

Tabla 6.17.- Coeficiente de fricción con el fondo C_f (Longuet-Higgins, 1970a, b).

6.5.5.4.- Mezcla Lateral

Para evaluar el coeficiente de mezcla lateral (N) para la corriente longitudinal medida, ésta fue comparada (ajustada) con la solución general del perfil transversal a la costa de las corrientes longitudinales de Longuet-Higgins (1970b) a través del parámetro adimensional P (que representa la importancia relativa de la mezcla horizontal N y el coeficiente de arrastre C_f):

$$P = \frac{\pi N m}{\gamma C_f} \quad [6.15]$$

Es interesante notar que en el caso hipotético que no hubiese mezcla turbulenta horizontal, entonces $N = 0$ y por lo tanto $P = 0$, y la solución daría una distribución de “diente de sierra” con una discontinuidad en la línea de rotura (ver figura 6.107). El perfil medido de corrientes fue normalizado usando la ecuación [6.16]. Este ajuste, comparado con la solución teórica de Longuet-Higgins (1970b) permite la estimación del coeficiente de mezcla lateral y se resume en la tabla 6.18.

$$v_0 = \frac{5\pi}{16} \gamma \zeta^2 \frac{m}{C_f} \sqrt{gh_b} \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad [6.16]$$

donde γ es el índice de rotura, definido como:

$$\zeta = \left[1 + \left(\frac{3\gamma^2}{8} \right) \right]^{-1} \quad [6.17]$$

siendo m la pendiente del fondo y α_b es el ángulo de aproximación del oleaje en rotura.

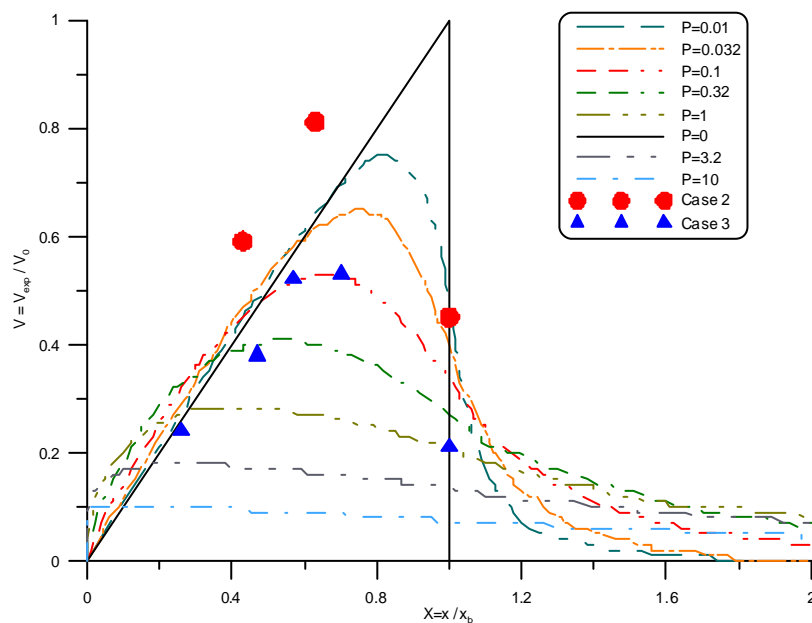


Figura 6.107.- Ajuste de los perfiles transversales a la costa de velocidades medidos contra la solución teórica de Longuet-Higgins para determinar los valores del coeficiente de mezcla lateral, Casos II y III.

| Casos | Coefficiente de Mezcla Lateral (N) |
|-------|------------------------------------|
| II | 0.0008 |
| III | 0.0062 |

Tabla 6.18.- Coeficiente de mezcla lateral N .

Estos resultados muestran un buen ajuste de los datos analizados con el parámetro adimensional $P = 0.1$ para el caso III, que concuerda con Galvin & Egelson, (1965) y Symonds & Huntley, (1980) que proponen un valor de $P \approx 0.1$ a 0.4 . Este valor implica un valor aproximado del coeficiente de mezcla lateral $N = 0.0062$, que concuerda con el valor de $N = 0.006$ encontrado por Wu *et al.* (1985), aunque es el doble ($N = 0.003$) del encontrado por Thornton & Guza (1986). En cambio, para el caso II el ajuste de las corrientes normalizadas está por debajo del valor de $P = 0.01$, lo que implica un valor de $N = 0.0008$. Aunque es esperable que el valor del coeficiente de mezcla lateral sea menor, puesto que la altura de ola significativa es mayor para el caso II ($H_s = 0.83$ m), que para el caso III ($H_s = 0.56$ m), la diferencia de un orden de magnitud no parece un resultado aceptable.

6.6.- Discusiones y Conclusiones de los Resultados Numéricos

A continuación se presentan las discusiones y conclusiones derivadas de las simulaciones numéricas llevadas a cabo en esta tesis.

6.6.1.- Estudio comparativo de los modelos de disipación de energía por rotura del oleaje irregular

En este punto se ha pretendido determinar los valores del parámetro γ que mejor ajuste consigue entre las predicciones numéricas y los datos medidos en campo para modelar el decaimiento de la altura del oleaje a través de la zona de rompientes de la playa de Egmond (Holanda), contrastando los valores obtenidos por el modelo de Battjes & Janssen (1978) con los propuestos por Battjes & Stive (1984) y Thornton & Guza (1983). De la misma manera, se han buscado relaciones entre estos parámetros con las características de la playa y las características del oleaje en aguas profundas.

Por otra parte, con los valores obtenidos de los parámetros libres en el ajuste de cada modelo se han simulado las alturas de ola y se han cuantificado los errores cometidos en la simulación. Así se ha realizado un estudio comparativo de la predicción realizada por cada modelo de decaimiento de alturas de ola en la zona de rompientes. En base a esto, las conclusiones en este apartado se pueden resumir de la siguiente manera:

Los valores obtenidos del parámetro γ mediante la expresión de Battjes & Stive (1984) oscilan entre [0.58 a 0.77], que son valores comprendidos en el intervalo considerado como físicamente realista, mientras que los obtenidos con el modelo de Battjes &

Janssen (1978) varían dentro de un rango más amplio, [0.5 a 1.30], con valores elevados en algunos casos puntuales. En cambio, con el modelo de Thornton & Guza (1983) se obtienen valores que varían entre [0.3 a 0.6], que en algunos casos puntuales son muy bajos.

El parámetro γ no presenta ninguna relación con el peralte del oleaje en aguas profundas, como sugirieron Battjes & Stive (1984); tampoco se ha encontrado ninguna relación de este parámetro con las características de la playa. Esto mismo sucede con los otros parámetros de ajuste de los otros modelos (α para Battjes & Janssen, 1978 y B para Thornton & Guza, 1983).

Hay una tendencia de los modelos a sobreestimar el valor de las alturas de ola en la región de la zona de rompientes cercana a la línea de orilla. En cambio, en el caso concreto del modelo de Thornton & Guza (1983) este tiene la tendencia a subestimar la energía del oleaje en algunos puntos cercanos a la primera rotura, aunque ajusta muy bien con los datos medidos en la barra interior (2ª rotura), más próximos a la línea de orilla.

El mejor ajuste con las medidas realizadas en la playa de Egmond se obtiene con el modelo de Battjes & Janssen (1978), con un R_{MAE} máximo de 13.6%. Por lo tanto, la mejor descripción del decaimiento de la altura del oleaje en la zona de rompientes viene dada por este modelo, seguido por el modelo de Thornton & Guza (1983) y el que da los ajustes más pobres es el modelo de Battjes & Stive (1984). El modelo de Battjes & Janssen (1978) ajusta especialmente bien con los datos medidos en los 3 primeros puntos situados sobre la barra interior, con un $R_{MAE} < 8\%$. En el punto de medidas sobre la barra exterior y en el más cercano a la línea de orilla, los resultados no son tan buenos.

El modelo de Battjes & Stive (1984) es con el que se obtienen los ajustes más pobres en términos generales, aunque es interesante notar que es el que mejor reproduce la primera rotura (sobre la barra exterior). Sin embargo, el error alcanzado sobre la barra interior con un $R_{MAE} > 20\%$ hace que su desempeño general no sea tan bueno, en comparación con los otros dos modelos citados, y por lo tanto el menos recomendable, a pesar de su simplicidad, ya que depende sólo de un parámetro de ajuste, que además viene fijado por las condiciones del oleaje en aguas profundas.

Con el modelo de Thornton & Guza (1983), tanto con un valor fijo de $\gamma = 0.42$ como con un valor libre, se obtienen resultados muy similares en los 3 primeros puntos. Tan solo en el punto 1a y (en particular) en el punto 1c se detectan diferencias apreciables. Por lo tanto, el modelo original de Thornton & Guza (con un valor fijo de $\gamma = 0.42$) se puede utilizar sin incrementar el error de manera importante, y con la ventaja de tener un solo parámetro de ajuste (B).

Las mayores diferencias obtenidas entre los modelos se registran en los senos de las barras, ya que el modelo de Battjes & Janssen (1978) predice que la altura de ola se mantiene a su paso sobre el seno entre las dos barras, mientras que el modelo de Thornton & Guza (1983) predice un aumento importante de la altura de ola (quizás mayor que el que cabe esperar para unas olas reformadas después de la primera rotura). La falta de datos medidos en el seno de las barras no permite una verificación de la capacidad de ninguno de los modelos de predecir la altura del oleaje en esta región.

6.6.2.- Incertidumbres del modelado numérico hidromorfodinámico en la zona cercana a la costa

El objetivo en este punto era analizar la sensibilidad del modelo morfodinámico desarrollado en el LIM-UPC, para tener en cuenta los posibles errores e incertidumbres en los parámetros medidos, que son introducidos en el modelo. Se han escogido los parámetros más importantes y se les han dado distintos valores. Con los parámetros hidrodinámicos se ha representado gráficamente el efecto que una alteración de ellos tiene en la altura de ola y en la corriente longitudinal. Para los parámetros morfodinámicos escogidos también se ha representado gráficamente como evoluciona la forma del fondo al modificar sus valores. Finalmente, se han estudiado los efectos en la batimetría de casos en los que se varían conjuntamente parámetros hidrodinámicos y morfodinámicos.

Las conclusiones obtenidas en el análisis de sensibilidad realizado para el modelado numérico de la hidrodinámica son:

Las variaciones del ángulo de aproximación del oleaje tienen una menor influencia en la altura de ola cerca de la costa que en la magnitud de las corrientes longitudinales, donde las diferencias son más significativas, especialmente encima de las barras, que es donde se produce la rotura y por lo tanto los mayores gradientes del tensor de radiación. En cuanto a las variaciones en el período estimado afectan poco a la altura de ola y a la corriente longitudinal en la mayor parte del perfil de playa. La introducción de varios valores en el período del oleaje apenas produjo variaciones significativas entre los distintos casos.

El parámetro α del modelo de rotura del oleaje irregular de Battjes y Janssen (1978) presenta una influencia moderada para las variaciones en la altura de ola, aunque estos se producen en todo el dominio (*cross-shore*) modelado. La variación de este parámetro hace que las mayores diferencias entre la corriente longitudinal calculada se dan por encima de las barras, aunque también son moderadas.

El parámetro γ del modelo de rotura del oleaje irregular de Battjes y Janssen (1978) implica una configuración muy diferente de la hidrodinámica en la zona de rompientes en función del valor que se tome. Produce cambios importantes en la altura de ola en todo el dominio representado. Igualmente, se tienen grandes variaciones de la corriente longitudinal, muy importantes a su paso por las barras.

La modificación del nivel del mar como parámetro de entrada en el modelo da lugar a una variación significativa en la altura de ola, ya que en la zona de rompientes el oleaje está fuertemente limitado por la profundidad. Un aumento en el nivel del mar trae como consecuencia que las olas rompan más cerca de la costa, mientras que una disminución del mismo provocará que el oleaje rompa a mayor distancia de la línea de orilla. La configuración de la zona de rompientes depende en gran medida del nivel del mar. Menos destacados son los cambios en la zona costera para la corriente longitudinal.

Tener o no en cuenta el flujo de masa no modifica los valores de la altura de ola, pero da variaciones significativas en la corriente longitudinal, en todo el dominio.

La disipación por fricción de fondo apenas cambia la altura de ola, aunque si afecta la magnitud calculada de las corrientes longitudinales, especialmente al pasar por encima de las barras.

La modificación de los valores de entrada de la viscosidad turbulenta tampoco representa cambios importantes en cuanto al cálculo de la altura de ola. No obstante, en lo que a corrientes longitudinales se refiere, éstas se ven ligeramente modificadas por estos valores, especialmente en la región de las barras, ya que la configuración en planta (distribución *cross-shore* de las corrientes longitudinales) está fuertemente influenciada por el grado de mezcla turbulenta.

Los parámetros hidrodinámicos escogidos para estudiar las variaciones en la batimetría y la evolución del fondo son α , γ y la viscosidad turbulenta. El hecho de haber escogido estos parámetros es porque para ellos se hacen suposiciones sobre su valor aproximado, mientras que el resto son más conocidos, están mejor representados matemáticamente o tienen efectos más fácilmente predecibles, como por ejemplo el nivel del mar, que al aumentar produce que el oleaje rompa más tarde.

Las conclusiones obtenidas para el modelado numérico de la morfodinámica son:

Al aumentar el paso de tiempo Δt (dentro de un cierto rango) en los pases para la morfodinámica, no provoca variaciones en la batimetría.

Las simulaciones de la evolución del fondo con distintos tamaños de sedimento muestran (con excepción de las simulaciones con un $d_{50} = 2$ mm) una misma tendencia para los casos de $d_{50} = 0.25, 0.50$ y 1 mm. En particular, sobre las crestas de las barras se aprecia una mayor diferencia de cota cuanto menor es el tamaño de grano. En cualquier caso, las simulaciones parecen seguir la tendencia marcada por el parámetro ϵ de la formulación de Watanabe (1982) mostrando pequeñas diferencias entre los resultados de la simulación. La marcada diferencia en la evolución del fondo producida con los diámetros anteriores y con un diámetro de 2 mm podría deberse también a que éste último pudiera estar fuera del rango de validez del modelo.

Las variaciones en los valores de entrada del parámetro A_w (Watanabe, 1982) producen cambios muy importantes en el fondo, que afectan sobre todo a los primeros 600 m de distancia, transformándolo totalmente. Lo mismo ocurre al aumentar el valor de entrada del parámetro A_c (Watanabe, 1982), que produce una erosión en las barras y provoca ligeros cambios en las regiones menos profundas (cercanías de la línea de orilla). Esto es un resultado esperable, ya que se aumenta la capacidad de transporte de sedimentos, aunque el modelo es especialmente sensible a estos parámetros. Valores de A_w (Watanabe, 1982) cercanos a 1 producen cambios muy significativos (y poco realistas) del perfil. Los cambios producidos por el parámetro A_c (Watanabe, 1982) también son significativos, aunque menores comparados con los producidos por valores altos del parámetro A_w (Watanabe, 1982). En términos generales, parece adecuado utilizar valores bajos de ambos parámetros.

Las variaciones del parámetro ε provocan también cambios muy acusados del perfil, mostrando que el modelo es bastante sensible a este parámetro, pues el incremento de dicho parámetro hace disminuir la altura de las barras y también modifica la batimetría en la zona cercana a la línea de orilla. Es interesante recalcar que los mayores cambios se producen sobre las crestas de las barras, que es donde las pendientes a lo largo del perfil tienen su mayor gradiente, provocando un aumento en el transporte (de acuerdo con la formulación de Watanabe, 1982). La pérdida del material de las crestas apenas produce cambios importantes en el resto de las distintas pendientes a lo largo del perfil.

El parámetro α (Battjes & Janssen, 1978) provoca un desplazamiento del sedimento de las crestas de las barras y un cambio en la pendiente de la playa, aproximadamente a unos 50 m de distancia. Aunque los distintos valores utilizados para la simulación de α provocan cambios en la batimetría, todas las simulaciones siguen la misma tendencia, muy parecida a la producida por el parámetro ε (un caso parecido a las simulaciones variando el d_{50}).

El parámetro γ (Battjes & Janssen, 1978) provoca grandes cambios en la evolución del fondo. Un aumento del valor del parámetro γ provoca que el oleaje rompa más cerca de la línea de orilla, disipando su energía en un área menor y acotando las corrientes inducidas en una zona de rompientes más estrecha. Esto implica un aumento del transporte de sedimentos cerca de la línea de orilla cuanto mayor es el valor del parámetro γ . Los cambios batimétricos son especialmente evidentes en las crestas de las barras. Valores grandes del parámetro γ pueden llegar a provocar la erosión de la barra interior.

De lo anterior se deduce que la combinación de los parámetros α y γ produce alteraciones importantes en la batimetría. Al aumentar sus valores se transforma todo el fondo, provocando grandes deformaciones de las barras existentes, llegando incluso a desplazar a la barra interior casi la totalidad de su propia longitud.

Los cambios en la *eddy viscosity* no producen variaciones importantes en la evolución del fondo. Tan solo se producen ligeros cambios (desplazamientos) en las crestas de las barras sumergidas.

Las simulaciones llevadas a cabo combinando los parámetros γ y la *eddy viscosity* provocan cambios similares a los obtenidos con la variación exclusiva del parámetro γ , lo que indica que γ tiene una mayor importancia relativa frente a los distintos valores que pueda adoptar la *eddy viscosity*.

Al llevar a cabo los casos variando los parámetros γ y ε simultáneamente, puede verse que las variaciones morfodinámicas responden de forma más acusada con los cambios en los valores del parámetro ε que con los cambios en los valores del parámetro γ .

La evolución del fondo más acusada se produce con la variación de los valores de entrada de los parámetros γ (Battjes & Janssen, 1978) y A_w (Watanabe, 1982), por lo que las simulaciones en los que se modifican ambos parámetros multiplican sus efectos en el fondo, produciendo grandes alteraciones en todo el perfil.

En lo referente a la evolución del fondo simulada con la variación en los valores de entrada del parámetro ε y la *eddy viscosity*, esta acusa más la influencia del parámetro ε mientras que la *eddy viscosity* solo produce cambios suaves (sobre los producidos por el parámetro ε), y solo tiene una repercusión de regular importancia en las crestas de las barras.

Al modificar simultáneamente los parámetros A_w (Watanabe, 1982) y los de la *eddy viscosity*, dada la poca sensibilidad a la simulación de la evolución del fondo producida con distintos valores de la viscosidad, la importancia relativa del parámetro A_w es mucho mayor.

Finalmente, cabe destacar que, en el modelado numérico morfodinámico realizado en este trabajo, los parámetros de entrada que más importancia relativa tienen en la evolución simulada del perfil de playa, y por lo tanto, los que se deben calibrar con más precisión y cautela, son el parámetro γ de Battjes & Janssen (1978) y los parámetros ε y A_w de Watanabe (1982). El resto de los parámetros de ajuste involucrados en la simulación morfodinámica tienen una importancia relativa inferior a las anteriores, por lo que los distintos valores que puedan tener producen cambios menos importantes en el perfil de la playa.

6.6.3.- Modelado 2DV de perfiles de playa. Resultados y limitaciones

Las variables hidrodinámicas medidas han sido adecuadamente reproducidas con el modelo citado aquí, aunque la calidad del ajuste depende de los valores de los parámetros de entrada (calibración), especialmente aquellos relacionados con el modelo de rotura y decaimiento de la altura de ola.

La simulación de la serie de tiempo de alturas de ola para el periodo de tormenta (el más significativo desde el punto de vista de la evolución del fondo) en el punto 1b (*bursts* 9313-9481) muestran un buen ajuste, especialmente para valores de altura de ola por encima de 1 m. El grado de precisión global de las simulaciones de altura de ola se cuantifica por medio del R_{MAE} cuyos valores medios son 0.10 para la estación 2, 0.04 para la estación 1a, 0.03 para la estación 1b, 0.10 para la estación 1c y 0.21 para la estación 1d, que es la más cercana a la línea de orilla.

La simulación de las corrientes longitudinales se llevó a cabo con aquellas simulaciones de decaimiento de altura de ola que dieron el R_{MAE} más pequeño, y utilizando como parámetros de ajuste la viscosidad turbulenta y la fricción con el fondo. Igual que en las simulaciones del decaimiento de la altura de ola, el mejor ajuste fue aquel que minimizó el R_{MAE} entre las simulaciones y las medidas en los 7 puntos de muestreo a lo largo del perfil de playa. Aunque se encontró una mayor dispersión en los resultados del R_{MAE} de las corrientes longitudinales (en particular, las estaciones 2 y 1b), los resultados muestran un ajuste de razonable a bueno (Van Rijn *et al.*, 2003). Los valores medios del R_{MAE} (considerando únicamente el valor "exacto" medido) son de 0.35 para la estación 18b, 0.62 para la estación 2, 0.21 para la estación 1a, 0.41 para la estación 1b, 0.20 para la estación 1c, 0.43 para la estación 1d y 0.72 para la estación 13b. Estos resultados indican que el desempeño del modelo de corrientes da resultados buenos en 5 de las 7 estaciones de medida (salvo en las estaciones 2 y 1b). Al igual que

con el modelo de alturas de ola, el R_{MAE} aumenta cuanto menor es el valor observado en campo. Evaluando el desempeño del modelo considerando posibles bandas de error en las medidas, los valores del R_{MAE} son sensiblemente más pequeños. El desempeño del modelo en la predicción de las corrientes transversales a la playa es más pobre, con valores medios del R_{MAE} de 0.47 para la estación 18b, 0.62 para la estación 2, 5.24 para la estación 1a, 1.13 para la estación 1b, 0.49 para la estación 1c, 0.69 para la estación 1d y 0.42 para la estación 13b. En cualquier caso, esto es esperable ya que los valores de las corrientes medidas fueron muy pequeños, en algunos casos cercanos a cero.

En cuanto a la simulación de la evolución del fondo, los resultados indican, de acuerdo con el índice BSS, que el modelo morfodinámico no reproduce adecuadamente la evolución global del perfil en todos los casos. Los resultados también indican que mientras mayor sea el periodo de simulación, los resultados son más pobres. En el caso de la playa de Egmond, la simulación numérica solo ha proporcionado resultados adecuados en la región de la barra exterior y para el periodo de pre-tormenta. Una posible explicación para esto es que el modelo morfodinámico calcula el campo de oleaje, a partir del cual calcula las corrientes inducidas, y finalmente el transporte de sedimentos asociado al oleaje y las corrientes. Aunque las simulaciones son razonablemente buenas para el campo hidrodinámico, la predicción de la evolución batimétrica trae consigo los errores acumulados en cada cálculo.

Además, cabe mencionar que la evaluación del perfil simulado por medio de este índice tiene el inconveniente de que, en un caso hipotético donde la predicción del modelo fuera pobre y los cambios producidos en el perfil fueran muy grandes, el valor del índice BSS sería alto, indicando una buena predicción cuando esta no ha sido así. Otro inconveniente del índice BSS es la ambigüedad en la que cae cuando este adquiere un valor igual a cero, el cual según Van Rijn *et al.* (2003) sería el obtenido de modelar la condición inicial. Esto implica que el perfil calculado = perfil inicial = perfil medido. En este caso, el cociente del índice BSS tendría una indefinición matemática, implicaría una división por cero. Por lo tanto, la efectividad del índice BSS en la evaluación del desempeño del modelo de evolución del perfil es cuestionable.

6.6.4.- Evaluación numérico-experimental de la corriente longitudinal en la playa de la Barra del Trabucador

Durante la campaña Delta'93 se llevaron a cabo 12 tests donde se obtuvieron una serie de parámetros hidrodinámicos entre los que se incluyeron velocidades de la corriente longitudinal y alturas de ola en la zona de rompientes. Estos tests fueron agrupados en 3 casos, 2 de los cuales mostraron condiciones de oleaje relativamente estacionarias. Esto permitió que, aún cuando los tests fueron secuenciales, las medidas en distintos puntos dentro de la zona de rompientes pudieran ser agrupadas por casos y posteriormente utilizadas para ajustar el modelado numérico de dichas condiciones. Los resultados muestran una excelente concordancia entre las predicciones numéricas de olas y corrientes y los datos experimentales. Esto respalda la idea de agruparlos en casos para obtener el gradiente transversal a la costa del tensor de radiación S_{xy} . Durante la campaña no se tomaron datos de las características del sedimento ni de las formas del fondo, de tal manera que la escala de rugosidad k_n permanece como una de las mayores incertidumbres al evaluar de esta manera la corriente longitudinal. De igual manera, el

análisis de sensibilidad mostró que el ángulo entre olas y corrientes puede variar los resultados de una manera importante, y medir con precisión el ángulo entre las olas y las corrientes no es una tarea trivial, con lo cual, este parámetro es otra gran incertidumbre.

En lo referente al análisis de resultados, queda claro que a partir de la tensión de corte en el fondo τ_c obtenida experimentalmente a partir de los datos de campo de la campaña Delta'93 (y apoyados por el modelado numérico), la velocidad de la corriente longitudinal pudo ser fácilmente obtenida a partir de un balance de *momentum* simplificado para la zona de rompientes. De manera alternativa, la aproximación aquí propuesta puede ser utilizada para evaluar los coeficientes de fricción a partir exclusivamente de los datos hidrodinámicos (puesto que no había información disponible de las características granulométricas o de las formas del fondo). Los resultados obtenidos muestran que este modelo (Madsen, 1994), sobreestima el valor de la corriente longitudinal entre un 50% y un 75% cuando se utilizan los parámetros "estándar" de la rugosidad del fondo en función únicamente del tamaño de grano (d_{50}). Esto es un claro indicativo de que había formas del fondo presentes durante la campaña Delta'93 y da una idea de la importancia que tiene el poder medirlas. El análisis de sensibilidad del modelo indica que pequeñas variaciones en los dos principales parámetros de entrada, el ángulo entre las olas y las corrientes y la escala de rugosidad del fondo (en especial esta última) producen cambios significativos en el valor predicho de la corriente longitudinal. El modelo parece ser más robusto para las variaciones del ángulo entre las olas y las corrientes.

El análisis aquí desarrollado ha permitido una evaluación robusta del coeficiente de fricción de las corrientes en la expresión clásica de Longuet-Higgins (1970a,b). No obstante, la estimación del parámetro de mezcla lateral fue tan solo razonable para el Caso III (debido probablemente a que los tests agrupados en el caso II muestran diferencias más marcadas entre ellos, que los que presentan los agrupados en el caso III, especialmente en lo que se refiere al ángulo de aproximación del oleaje). No obstante, los valores encontrados para los parámetros P , N y C_f son similares a los propuestos por otros autores (e.g. Wu *et al.*, 1985). Otro inconveniente importante en esta estimación es que la ecuación de normalización para la corriente longitudinal propuesta por Longuet-Higgins (1970a,b) fue derivada a partir de la suposición de una playa con pendiente suave y monótona, con una única línea de rotura. La playa de la Barra del Trabucador no cumple con estas características, ya que se trata de una playa con barras. Por último se debe reconocer que estos resultados se han derivado de un número limitado de medidas de campo, y que algunas de las hipótesis de partida, en especial la de suponer un campo de oleaje estacionario, son cuestionables. Por tanto, los resultados obtenidos en este caso deben ser considerados teniendo en cuenta las limitaciones del mismo procedimiento.