



**Dinámica Ambiental**  
UNIVERSIDAD DE GRANADA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**MODELADO NUMÉRICO DE PLAYAS  
HETEROGÉNEAS EN UN CANAL DE OLEAJE**

**Alumno:** Jesús Villegas Pérez

**Tutores de proyecto:** Miguel Ortega Sánchez – Rafael Jesús Bergillos Meca

**Departamento:** Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos



*UGR* | Universidad  
de Granada







**Dinámica Ambiental**

UNIVERSIDAD DE GRANADA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**MODELADO NUMÉRICO DE PLAYAS  
HETEROGÉNEAS EN UN CANAL DE OLEAJE**

**Autor:**

Jesús Villegas Pérez

**Tutores de proyecto:**

Miguel Ortega Sánchez

Rafael Jesús Bergillos Meca

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos



*UGR*

**Universidad  
de Granada**



---

---

---

### *Agradecimientos*

*Quiero dar las gracias a Miguel Ortega por haberme dado la gran oportunidad de desarrollar este proyecto. Expresar mi profunda gratitud a Rafael J. Bergillos por toda su valiosísima ayuda, por su paciencia, por todos los conocimientos que me ha prestado y por haberme guiado durante todo este año. A Montserrat Vilchez y al resto de personas del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales por haberme ayudado durante este año a apartar del camino las pequeñas piedras que iban apareciendo.*

*Y por supuesto, a mi familia.*

---

---

---

# Resumen

Las playas heterogéneas son sistemas formados por una amplia variedad de tamaños de grano en el sedimento. Hoy día contrasta la falta de conocimiento actual sobre su hidrodinámica en comparación con todo el saber adquirido en playas homogéneas, de las cuales, su campo de conocimiento es bastante amplio.

Por ello, este proyecto fin de carrera, atendiendo a esta falta de conocimiento y a la inexistencia de ensayos a pequeña escala en laboratorio de playas heterogéneas, ha fijado su objetivo en el estudio de estas playas centrándose en los distintos efectos que tienen diferentes sedimentos sobre el oleaje incidente en la costa, a través del uso de un modelo matemático ya validado en su uso.

Todo el proyecto se ha desarrollado a través de la elección de un prototipo, que en nuestro caso es Playa Granada (Motril) por ser un claro ejemplo de playa heterogénea, que se encuentra además en nuestra provincia. La elección de esta zona de estudio, además de por pertenecer al tipo de playa que nos interesa, se ha debido a que Playa Granada se ve afectada por graves problemas de erosión en su costa occidental originados en su mayoría por la construcción de la presa de Rules realizada aguas arriba sobre el río Guadalfeo (que desemboca en nuestra playa). A dichos problemas, actualmente de los que no se han conseguido encontrar una solución definitiva, algo que procede de forma directa de la inexistencia presente en el conocimiento sobre el comportamiento de estas playas.

Una vez concretado el objetivo específico de estudio, para poder empezar a obtener resultados, se han representado las condiciones reales del prototipo elegido, tanto de oleaje como de comportamiento de sedimento, para poder reproducir sobre el modelo las condiciones que tendría un ensayo a pequeña escala en un canal de oleaje. Ello se ha llevado a cabo realizando un escalado de todas las variables necesarias (tanto geométricas, como temporales provocando una semejanza cinemática, así como un escalado del tamaño de sedimento) para reproducir con fidelidad las condiciones reales del perfil de playa generando una semejanza lo más real posible entre nuestro prototipo y el modelo a pequeña escala sobre el que queremos obtener resultados. De esta manera nos cercioramos que los datos dados por el modelo matemático IH-2VOF, tras su ejecución, sean fiables en su análisis.

Con tal fin, y tras tener todas las variables necesarias para reproducir con fidelidad a pequeña escala nuestro prototipo sobre un canal de oleaje, se han establecido una serie de casos “simplificados” en los que se ha ido variando el sedimento que compone el lecho de nuestra playa para observar qué efecto tiene sobre el oleaje cada tipo de sedimento.

Dichos casos han contemplado una variación en el tamaño de grano que ha ido componiendo el lecho marino de nuestro perfil de playa. Para ello se ha tenido en cuenta una variación del sedimento tanto en profundidad, como transversalmente a lo largo del perfil según avanza el oleaje. Todo esto se ha llevado a cabo con el fin de poder observar con claridad por una parte, el efecto que tiene por sí solo cada tamaño del sedimento sobre el oleaje, como a su vez, el efecto que induce una variación del mismo en los dos sentidos ya explicados (en profundidad y transversalmente).

Tras la ejecución de todos estos casos, se han obtenido los resultados arrojados por el modelo matemático. En ellos se ha observado como un material menos poroso condiciona un perfil con mayor índice de reflexión de la energía que le llega procedente del oleaje, por lo que la destrucción de energía que transporta el mismo es menor, llegando una mayor cantidad a la costa, lo que provocará una mayor erosión de la playa. Esta reflexión va disminuyendo conforme se han dispuesto materiales más porosos y que aumentaban el tamaño de grano del sedimento, así como su influencia en profundidad debido a factores que ganaban relevancia con estas nuevas configuraciones del lecho marino, como son la infiltración del flujo por el medio poroso que ha ganado importancia en la hidrodinámica de la interacción del flujo con el medio poroso.

Finalmente, de todo el análisis precedente, se han desarrollado las conclusiones de dichos resultados. La más destacable de ellas, se relaciona directamente con la motivación principal del objeto de estudio de este proyecto: el desconocimiento actual sobre las playas heterogéneas, y concretamente en nuestra zona de estudio, el problema de la gran erosión sufrida actualmente en la parte occidental de Playa Granada. Y es que de los resultados, se ha conseguido observar qué configuraciones de perfiles de playa disipan en mayor medida la energía que reciben del oleaje componiendo así un perfil de playa mucho menos erosivo. Siendo dichos perfiles aquellos en los que se consigue aumentar la influencia de la infiltración en el fondo, haciendo que, de esta manera, este factor gane importancia en la hidrodinámica de la interacción playa-oleaje, y provocando así que se reduzca el índice de reflexión. Ello unido a una disposición de tamaños de grano mayores (en los sedimentos que componen el lecho marino en su superficie), son los factores que conforman el perfil de playa que más energía del oleaje disipa, pues estos han mostrado cómo influyen de una forma más eficaz en la disipación de la energía del oleaje.



# Índice general

Resumen .....	7
Índice general.....	9
Índice de figuras .....	13
Índice de tablas .....	15
Capítulo 1.....	17
Introducción.....	17
1.1. Objetivos .....	18
1.2. Organización del trabajo .....	19
Capítulo 2.....	21
Zona de estudio.....	21
2.1. Situación.....	21
2.2. Geología .....	22
2.3. Análisis del clima marítimo.....	23
Problemática actual de la zona de estudio .....	26
Capítulo 3.....	29
Metodología.....	29
3.1. Revisión del estado del arte .....	29
3.2. Campañas de campo .....	31
3.2.1. Batimetría y topografía .....	31
3.2.2. Granulometría .....	34
3.3. Estudio del prototipo.....	35
3.4. Diseño de los casos .....	35
3.4.1. Canal de oleaje.....	36
3.4.2. Escala geométrica .....	37
3.4.3. Escala temporal.....	38
3.4.4. Escala granulométrica .....	39
3.4.5. Condiciones de oleaje .....	42
3.5. Modelo numérico .....	43

---

3.5.1. Características del modelo.....	43
3.5.2. Formulación matemática.....	44
3.5.3. CORAL.....	44
3.5.4. Configuración del modelo.....	44
Geometría de la playa.....	45
Malla.....	45
Condiciones de oleaje.....	46
Características del medio poroso.....	47
Parámetros simulados.....	48
3.5.5. Resultados del modelo.....	49
Capítulo 4.....	51
Resultados.....	51
4.1. Diseño de los casos: escalado.....	51
4.2. Procesos físicos de la hidrodinámica de la playa.....	51
4.2.1. Asomeramiento.....	51
4.2.2. Reflexión.....	52
4.2.3. Rotura.....	53
4.2.4. Disipación.....	54
4.2.5. Infiltración.....	54
4.2.6. Run-up.....	54
4.3. Casos modelados.....	55
4.3.1. Estudio en profundidad. Condición de oleaje media.....	58
CASO 1.....	58
CASO 2.....	61
CASO 3.....	63
CASO 4.....	64
4.3.2. Estudio en profundidad. Condición de oleaje extrema.....	66
CASO 1.....	66
CASOS 2 y 3.....	67
CASO 4.....	68
4.3.3. Estudio en profundidad. Parámetros de la hidrodinámica.....	70
CASO 1.....	70

---

---

CASO 2 .....	72
CASO 3 .....	73
CASO 4 .....	74
4.3.4. Estudio en variabilidad transversal. Condición de oleaje media .....	75
CASOS 1 y 2.....	75
CASOS 3, 4 y 5 .....	77
4.3.5. Estudio en variabilidad transversal. Condición de oleaje extrema....	81
CASOS 1 y 2.....	81
CASOS 3, 4 y 5 .....	82
4.3.6. Estudio en variabilidad transversal. Parámetros de la hidrodinámica	
84	
CASO 1 .....	85
CASO 2 .....	86
CASO 3 .....	87
CASO 4 .....	88
CASO 5 .....	89
Capítulo 5.....	91
Conclusiones .....	91
Capítulo 6.....	93
Líneas de investigación futura.....	93
Apéndice A.....	97
Formulación matemática del IH-2VOF.....	97
Flujo fuera del medio poroso: “The Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations” .....	97
Ecuaciones que gobiernan el flujo en el medio poroso Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS) equations .....	98
Apéndice B .....	103
Análisis de la Reflexión. Baquerizo 1995 .....	103
Bibliografía .....	109



# Índice de figuras

Figura 2.1.1 Localización geográfica de Playa Granda (Motril) .....	21
Figura 2.2.1 Mapa geológico de la zona de Playa Granada (Motril) .....	23
Figura 2.3.2 Localización geográfica del punto WANA utilizado.....	24
Figura 2.3.3 Dispersión altura de ola y periodo de pico WANA 2040079 .....	25
Figura 2.3.4 Dispersión altura de ola y dirección de incidencia WANA 2040079 ....	25
Figura 2.3.1 Foto satélite de la situación actual de Playa Granada (Motril).....	26
Figura 3.2.1 Obtención de la topografía de Playa Granada (Motril).....	32
Figura 3.2.2 Sistema funcionando .....	33
Figura 3.2.3 Embarcación hidrográfica utilizada.....	33
Figura 3.2.4 Granulometría de los sedimentos recogidos.....	34
Figura 3.2.5 Muestras de sedimento recogidas .....	34
Figura 3.4.1 Foto panorámica del canal de oleaje .....	36
Figura 3.4.2 Canal de oleaje corriente. Centro CEAMA-UGR .....	36
Figura 3.4.3 Perfil de playa escalado fijando la escala vertical.....	37
Figura 3.4.4 Perfil de playa escalado fijando la escala horizontal .....	38
Figura 3.4.5 Valores experimentales de la velocidad de caída del sedimento para distintos diámetros de sedimento.....	41
Figura 3.5.1 Situación de los sensores a lo largo de todo el perfil de playa.....	49
Figura 4.3.1 Disposición del Caso 1-Variabilidad de sedimento en profundidad .....	55
Figura 4.3.2 Disposición del Caso2-Variabilidad de sedimento en profundidad .....	55
Figura 4.3.3 Disposición del Caso 3-Variabilidad de sedimento en profundidad .....	56
Figura 4.3.4 Disposición del Caso 4-Variabilidad de sedimento en profundidad .....	56
Figura 4.3.5 Disposición del Caso 1-Variabilidad transversal de sedimento.....	56
Figura 4.3.6 Disposición del Caso 2-Variabilidad transversal de sedimento.....	56
Figura 4.3.7 Disposición del Caso 3-Variabilidad transversal de sedimento.....	57
Figura 4.3.8 Disposición del Caso 4-Variabilidad transversal de sedimento.....	57
Figura 4.3.9 Disposición del Caso 5-Variabilidad transversal de sedimento.....	57
Figura 4.3.10 Evolución de superficie libre. Caso 1. Sensores 1, 7, 10, 16.....	58

---

Figura 4.3.11 Evolución de superficie libre. Caso 1. Sensores 17 y 18.....	59
Figura 4.3.12 Evolución de la velocidad. Caso 1. Sensores 7 y 17.....	60
Figura 4.3.13 Evolución de superficie libre. Caso 2. Sensores 1 y 17.....	61
Figura 4.3.14 Evolución de la velocidad. Caso 2. Sensores 1 y 17.....	62
Figura 4.3.15 Evolución de superficie libre. Caso 3. Sensores 18 y 24.....	63
Figura 4.3.16 Evolución de la velocidad. Caso 3. Sensores 18 y 24.....	64
Figura 4.3.17 Evolución de superficie libre. Caso 4. Sensores 10, 14 y 17.....	65
Figura 4.3.18 Comparación de la evolución de superficie libre. Caso 1. Condición de oleaje media y extrema. Sensor 12 .....	66
Figura 4.3.19 Comparación de la evolución de la velocidad. Caso 1. Condición de oleaje media y extrema. Sensor 12 .....	67
Figura 4.3.20 Evolución de superficie libre. Casos 2 y 3. Sensor 7.....	67
Figura 4.3.21 Evolución de la velocidad. Casos 2 y 3. Sensor 7.....	68
Figura 4.3.22 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensor 7.....	69
Figura 4.3.23 Evolución de la velocidad. Casos 3 y 4. Sensor 7.....	69
Figura 4.3.24 Evolución de superficie libre. Casos 1 y 2. Sensores 10 y 13 .....	75
Figura 4.3.25 Evolución de superficie libre. Casos 1 y 2. Sensores 16 y 17 .....	76
Figura 4.3.26 Evolución de la velocidad. Casos 1 y 2. Sensor 17.....	77
Figura 4.3.27 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensores 11 y 15 .....	78
Figura 4.3.28 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensores 16 y 17 .....	78
Figura 4.3.29 Evolución de superficie libre. Casos 3, 4 y 5. Sensores 11 y 15.....	79
Figura 4.3.30 Evolución de superficie libre. Casos 3, 4 y 5. Sensores 16 y 17 .....	80
Figura 4.3.31 Evolución de superficie libre. Casos 1 y 2. Sensores 10 y 17 .....	81
Figura 4.3.32 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensores 11 y 15 .....	82
Figura 4.3.33 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensores 16 y 17 .....	83
Figura 4.3.34 Evolución de superficie libre. Casos 3, 4 y 5. Sensores 11 y 15.....	83
Figura 4.3.35 Evolución de superficie libre. Casos 3, 4 y 5. Sensores 16 y 17 .....	84

# Índice de tablas

Tabla 3.4.1 Valores ensayados con cada criterio para la elección del mismo.....	42
Tabla 3.5.1 Malla generada para la obtención de resultados .....	46
Tabla 4.1.1 Condiciones de oleaje establecidas.....	51
Tabla 4.3.1 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en profundidad. Caso 1.....	70
Tabla 4.3.2 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en profundidad. Caso 2.....	72
Tabla 4.3.3 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en profundidad. Caso 3.....	73
Tabla 4.3.4 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en profundidad. Caso 4.....	74
Tabla 4.3.5 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 1.....	85
Tabla 4.3.6 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 2.....	86
Tabla 4.3.7 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 3.....	87
Tabla 4.3.8 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 4.....	88
Tabla 4.3.9 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 5.....	89





# Capítulo 1

## Introducción

Como iniciación al presente proyecto es indispensable repasar las clasificaciones que pueden aplicarse en las playas. Así pues nos encontramos con que éstas pueden dividirse en una serie de grupos mediante una clasificación de las mismas según la gradación del tamaño del sedimento que las compone, es decir, según su granulometría.

Por un lado tenemos las playas de grava formadas en su totalidad por un material de un tamaño de grano superior a los 2mm. Y por otro lado, nos encontramos con las playas homogéneas formadas por un tamaño de grano de sedimento uniforme de arena de un tamaño inferior a los 2mm. Y, finalmente, tenemos las playas heterogéneas que son sistemas formados por una amplia variedad de tamaños de grano en el sedimento, formadas a la vez una composición de arenas y gravas de diversos tamaños, y compuestas por una estratificación vertical variable junto a cambios en proporción y gradación de su granulometría tanto transversal como longitudinalmente a lo largo de todo su perfil, tanto emergido como sumergido.

La situación actual del estudio de las playas hace patente que mientras que las playas homogéneas se han convertido en un foco de numerosos estudios que han desembocado en unos grandes avances en el conocimiento de su hidrodinámica, en contraposición se encuentran las playas heterogéneas, objeto de estudio del presente proyecto, con una gran ausencia de unos avances similares para estas playas, resaltando sobre todo la escasez de estudios basados en modelado numérico y medidas experimentales a pequeña escala, ya que únicamente hoy día se cuenta con una serie ensayos sobre playas de grava y a gran escala denominados BARDEX (Whitehouse 2012), (Williams, y otros 2012), (Turner y Masselink 2012), (Masselink y Turner 2012), (Thompson, y otros 2012), (Matias, y otros 2012) y (Williams, y otros 2012)) en los que se estudió la interacción de una barrera de grava situada en el “mar abierto”. Pero como se observa, dichos ensayos no entran en el rango de estudio que se propone en el presente proyecto pues consisten únicamente en investigaciones a gran escala, y no a pequeña escala dentro del canal de oleaje en un laboratorio.

Los distintos porqués por los cuales resulta esencial el estudio de estas playas es evidente si se exponen hechos tales la como la propia ausencia de información existente ya mencionada sobre el comportamiento de estas playas convirtiéndose en el principal motivo esencial que ya sustenta de por sí la motivación de su estudio. Algo

que va unido y que choca a la vez con la numerosa presencia de las playas heterogéneas en las costas de todo el mundo, pudiendo destacar el litoral de nuestro país donde su representación es significativa. Únicamente lo ya expuesto pone en valor que un mayor conocimiento sobre las playas heterogéneas provocaría ganar enteros a la hora de predecir la evolución en el comportamiento de las mismas para prever posibles problemas o afecciones, además de actuar de una forma correcta o más acertada sobre playas que lo requieran.

Otro de motivo que puede llevar a poner en valor el estudio de estas playas, es el ciclo climático de mayor temperatura global en el que nos encontramos, y es que ante el aumento de las temperaturas que va provocando el deshielo de los casquetes polares, cabe predecir un aumento del nivel del mar, algo que sin duda influirá en la evolución y comportamiento en la dinámica de estas playas. Unido conjuntamente a la realidad de encontrarnos también que, cuando en una playa de arena la erosión empieza a actuar de una forma acentuada, una de las soluciones con las que se puede contar y que se ha llevado a cabo en algunos casos, es el uso de grava añadiendo la misma a la arena de la playa. Por ello es conveniente saber cómo va a influir la aportación de esa grava a la evolución de la playa, algo que vuelve a resaltar por sí sólo la escasa información de que se dispone sobre el comportamiento de las playas heterogéneas y de grava.

### **1.1. Objetivos**

El objetivo global del proyecto es dar un primer paso en el estudio de las playas heterogéneas para conseguir un conocimiento hidrodinámico de las mismas debido a la numerosa presencia de éstas en las costas, y que ello conlleve una mayor ventaja, entre otras cosas, en una adecuada actuación sobre las mismas que permita prever y saber anticipar numerosos problemas como el ya expuesto en el caso concreto de la playa de nuestro estudio antes de que se conviertan en problemas mucho más graves o incluso irremediables.

Todo lo anterior es algo que tiene una repercusión directa en la ingeniería marítima y constituye un elemento de interés general por diversos aspectos sociales que pueden ir desde un nivel turístico relacionado con la conservación de playas como resultado de un valor directo en la economía, como a nivel ambiental para un correcto uso y conservación del patrimonio natural que constituyen nuestras costas.

Para la consecución del objetivo expuesto se han llevado a cabo en orden cronológico, las siguientes tareas:

1. Revisión del estado del arte sobre playas heterogéneas, haciendo especial hincapié a los escasos trabajos experimentales llevados a cabo en las mismas.
2. Estudio del modelo numérico IH-2VOF: base teórica, formulación matemática, parámetros del modelo y ejemplos sencillos.
3. Realización de campañas de campo en Playa Granada para llevar a cabo medidas topográficas y granulométricas de la zona emergida del perfil de playa. Estos datos serán utilizados como entrada al modelo numérico.
4. Realización de batimetría en Playa Granada para medir la forma de la zona sumergida del perfil de playa. Estos datos serán utilizados como entrada al modelo numérico.
5. Análisis del clima marítimo de la zona a partir de datos proporcionados por Puertos del Estado. Estos datos serán utilizados como entrada al modelo numérico.
6. Simulación de casos en el modelo numérico IH-2VOF: influencia de variabilidad del sedimento en profundidad, influencia de variabilidad del sedimento en transversal, semejanzas modelo-prototipo y estudio del efecto escala.
7. Discusión de resultados, extracción de conclusiones y redacción del documento final.

### 1.2. Organización del trabajo

La estructura seguida en el presente proyecto es la siguiente:

En el capítulo 2 se hará un análisis completo de la zona de estudio, desde su situación geográfica, junto con la observación de geología de la zona y con el desarrollo del proceso llevado a cabo para el análisis del clima marítimo de nuestra playa. Además se realiza una descripción de la problemática que hoy día afecta a nuestra zona de estudio que justifica por sí misma, la elección de dicha zona como foco de estudio del proyecto.

En el capítulo 3 se desarrolla todo lo relacionado con la metodología seguida para llegar a obtener todos y cada uno de los aspectos necesarios para poder llevar a cabo la ejecución de los casos sobre el modelo numérico elegido. Comenzando desde una revisión del estado del arte sobre las playas heterogéneas para ver la situación de partida, y continuando con la explicación de los trabajos llevados a cabo en las campañas de campo para la obtención de información sobre el lugar con actividades como la recogida de muestras, obtención de topografía o batimetría entre otras. Todo ello seguido de una explicación del esquema que guía la definición de todos y cada uno de los pasos a llevar a cabo para lograr establecer los casos que se ejecutarán con el modelo matemático teniendo siempre como referencia nuestro prototipo real que

es Playa Granada, para poder así simular unas condiciones reales y hacer una acertada interpretación de los datos que se obtengan.

El capítulo 4 está dedicado para mostrar en detalle todo lo relacionado con el modelo numérico. Empezando por una explicación de la formulación matemática en la que se basa, hasta la definición de cada una de los parámetros necesarios que deben ser determinados para reproducir con exactitud el prototipo: geometría de nuestra playa, condiciones de oleaje que se reproducen, mallado requerido para un correcto cálculo de los parámetros simulados por el programa y por supuesto las características del medio poroso que compone nuestra playa modelo reproducida.

En el capítulo 5 se analizan todos y cada uno de los casos ejecutados sobre el modelo matemático IH-2VOF, en los que se quiere observar con precisión el efecto que tiene un distinto tamaño de grano en el sedimento del lecho marino sobre el oleaje. Se describen en detalle cada configuración elegida en todos los casos, con un análisis de los resultados obtenidos por el modelo tras su ejecución.

Y finalmente el capítulo 6 final donde se sintetizan todas las conclusiones a las que se ha llegado mediante el análisis de los resultados, junto con las líneas de investigación futura.

# Capítulo 2

## Zona de estudio

La zona de estudio seleccionada para el desarrollo del presente proyecto es Playa Granada (Motril) por tratarse de un claro ejemplo de playa heterogénea que además actualmente está afectada de graves problemas tanto de erosión en la parte oeste de la playa donde la línea de costa ha sufrido un gran retroceso visible en los últimos años, como de problemas de acumulación de sedimentos en la parte más oriental de la misma. La elección de la zona de estudio nos va a permitir la reproducción de un caso real en el modelo numérico.

### 2.1. Situación

Playa Granada se encuentra situada al sur de España, dentro de la Comunidad Autónoma de Andalucía, en la costa de la provincia de Granada. Se extiende a lo largo de la línea de costa situada entre el Peñón de Salobreña (oeste) y la llamada Punta del Santo (este).

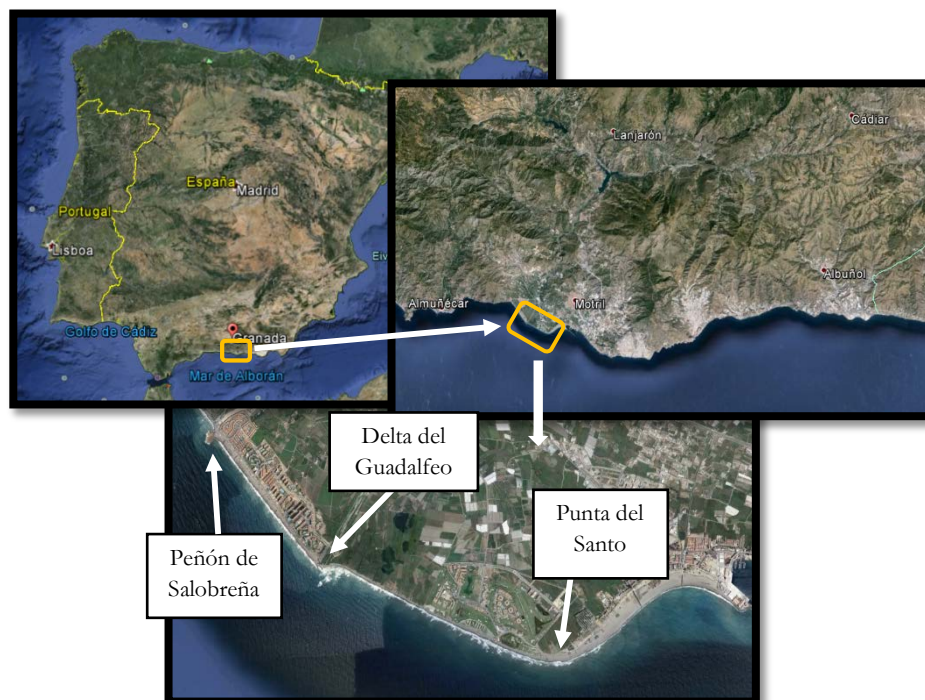


Figura 2.1.1 Localización geográfica de Playa Granda (Motril)

Playa Granada presenta una diversa variedad en el tamaño de grano que compone la playa, la presencia de arena junto con grava tanto fina como gruesa que hace que

sea un buen foco de estudio para desarrollar el objetivo de estudio del presente proyecto, ello se ve en el siguiente apartado de geología. Nosotros nos centraremos en la parte comprendida entre el delta del Guadalfeo y la punta del Santo que es la afectada principalmente por los problemas de erosión que expondremos a continuación.

## 2.2. Geología

Veamos ahora la geología del lugar. De la página web <http://info.igme.es/cartografia/> del Instituto Geológico y Minero de España hemos obtenido la información geológica de nuestra zona de estudio a escala 1: 50 000. En la figura inferior vemos un marco bastante amplio de toda la zona que rodea a nuestra playa.

En cuanto a los materiales que afloran en la superficie, como se observa sobre la zona marcada correspondiente a Playa Granada y sobre la que se ha aplicado un zoom son dos los materiales emergentes en superficie y predominantes en la zona, numerados como 29 y 30, ambos corresponden a gravas y arenas y a arenas de playa respectivamente como nos indica la leyenda. Hecho nos muestra lo que ya sabíamos, y efectivamente se trata de una playa heterogénea. Por otra parte, en la leyenda también podemos observar que bajo éstos se dispone una capa de conglomerados y limos y bajo ella otra capa de arenas amarillas junto con limos y conglomerados sueltos. Así pues ya tenemos una idea de la geología de Playa Granada, en el capítulo de metodología, donde se explican las campañas de campo realizadas, en ellas se han llevado a cabo una serie de recogidas de muestras con las que se han realizado análisis que han ayudado a establecer la granulometría de la playa. En ellos veremos cómo concuerda los resultados obtenidos con lo que este mapa geológico nos ha mostrado.

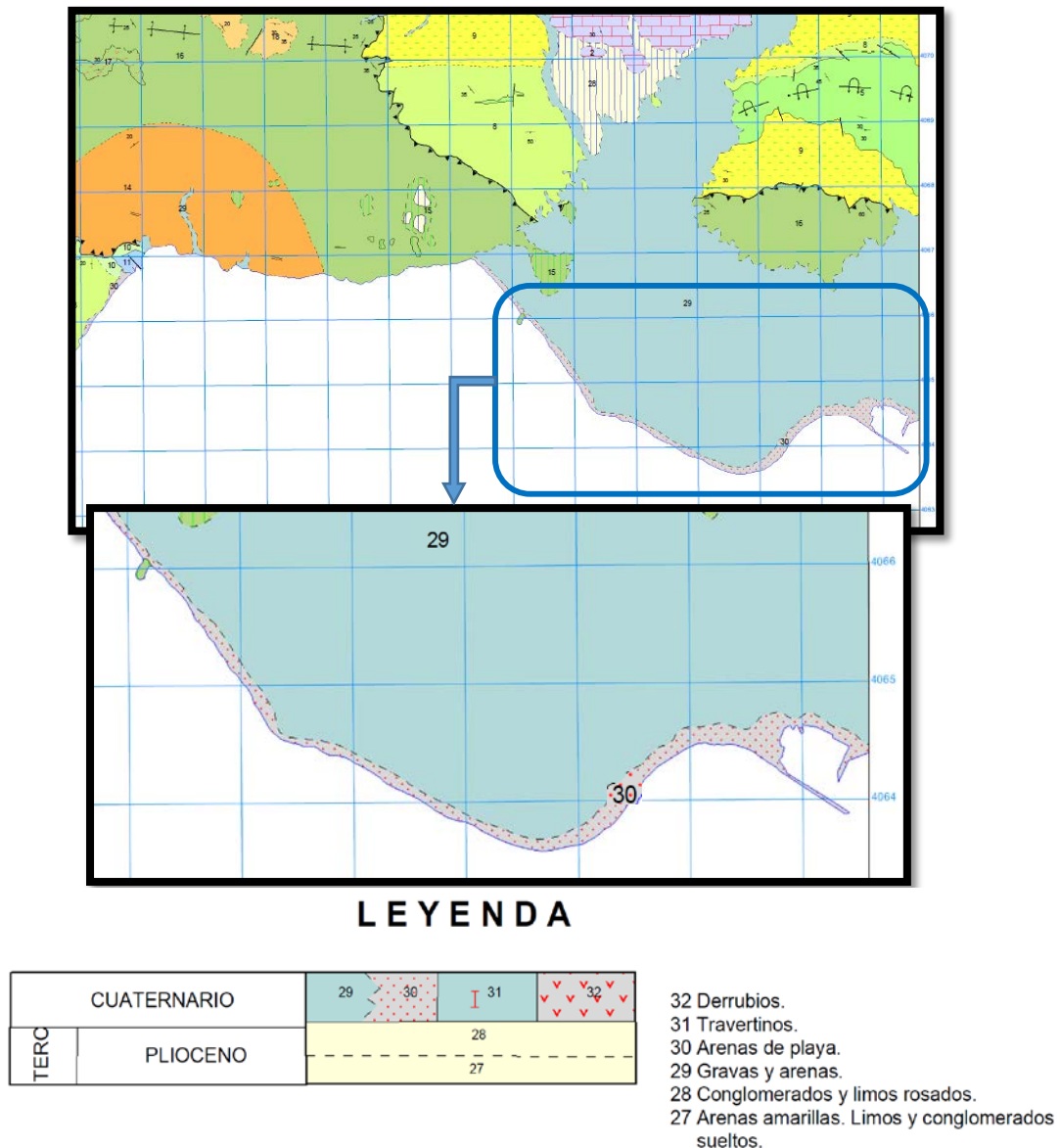


Figura 2.2.1 Mapa geológico de la zona de Playa Granada (Motril)

### 2.3. Análisis del clima marítimo

El objetivo específico del análisis del clima marítimo es llegar a conocer las condiciones de oleaje en aguas profundas que serán utilizadas para caracterizar el oleaje de Playa Granada. Con ello se persigue introducir en el modelo matemático un oleaje que simule lo más cerca posible las condiciones de oleaje reales que se dan en nuestra zona de estudio. Nuestro interés vendrá situado en reproducir tanto unas condiciones medias de oleaje, como unas condiciones extremas para reflejar ambos escenarios y poder ver qué información proporciona el modelo sobre el comportamiento de la playa frente a los mismos.

Para establecer las condiciones de oleaje que existen en la zona se va a analizar el conjunto de datos ofrecidos por el punto WANA correspondiente al lugar.

### Punto WANA 2040079

Un punto WANA proporciona información, no real, sino que otorga datos sintéticos obtenidos a partir de modelos numéricos, un conjunto formado por series temporales de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza. No puede considerarse incluido dentro de la campaña de campo propiamente dicha pero va a ser el último paso que nos va a proporcionar información sobre la zona de estudio para poder reproducirla con fidelidad en el modelo matemático IH-2VOF que se usa en este proyecto y que explicaremos más adelante.

Con el análisis de los puntos WANA vamos a obtener las condiciones de oleaje que deberemos reproducir nosotros para poder obtener datos válidos que permitan realizar una interpretación fiable. Nuestro objetivo principal va a ser obtener distintos valores de altura de ola y periodo del oleaje del lugar en distintos estados, es decir, tanto valores frecuentes de dichas variables expuestas, como valores extremos que nos permitan estudiar distintos escenarios que pueden darse en la zona. Tal y como se mencionó, queremos establecer tanto unas condiciones medias de oleaje como unas condiciones extremas.

En este caso en punto elegido por la situación respecto a Playa Granada ha sido en punto 2040079 cuya localización puede observarse en la figura inferior. Dicho punto contiene información desde Enero de 1998 hasta Octubre de 2014.



Figura 2.3.2 Localización geográfica del punto WANA utilizado

De esta manera con la información proporcionada por el punto se han obtenido los gráficos de dispersión de altura de ola significativa espectral ( $H_s$ ), periodo de pico espectral ( $T_s$ ) y dirección del periodo de pico ( $DirM$ ). De estas representaciones gráficas obtendremos más adelante las condiciones de oleaje que reproduciremos en el modelo matemático para nuestro modelo a escala de la playa.



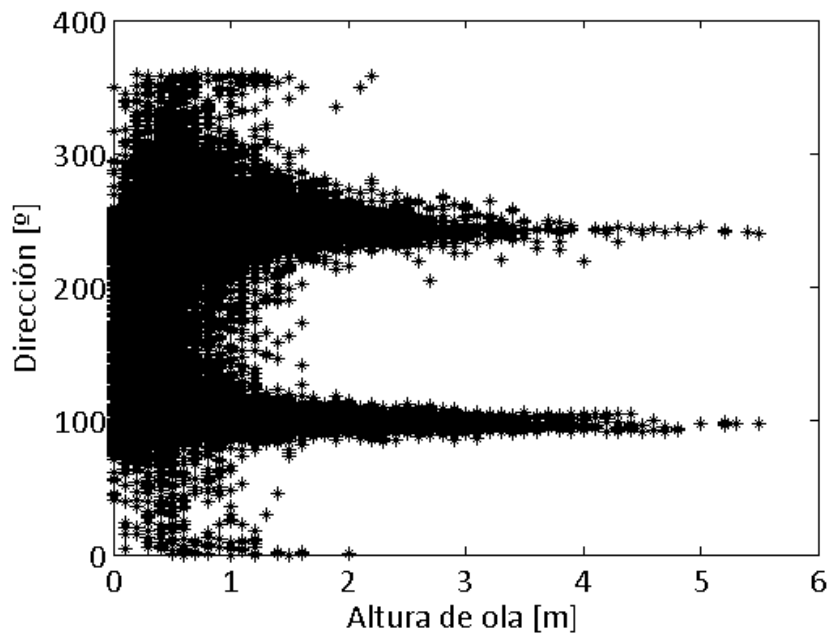


Figura 2.3.4 Dispersión altura de ola y dirección de incidencia WANA 2040079

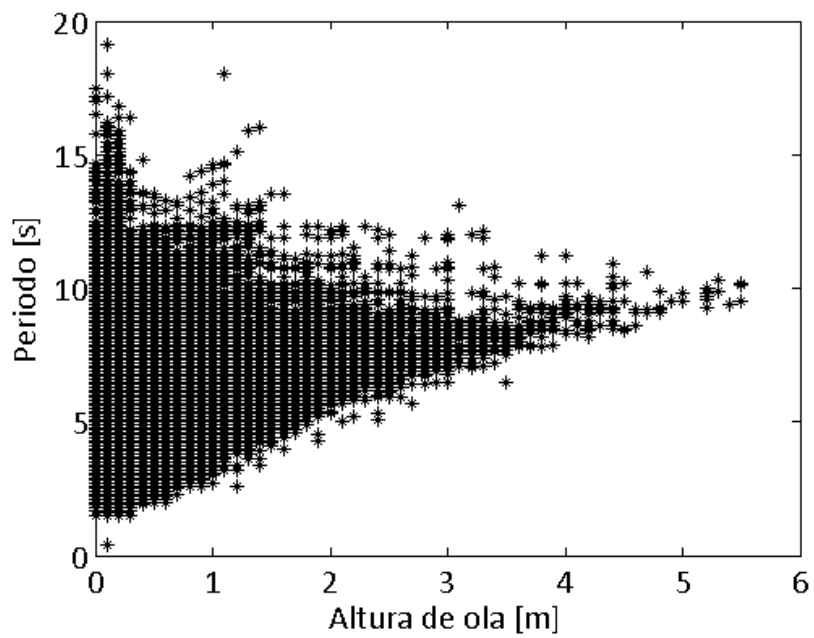


Figura 2.3.3 Dispersión altura de ola y periodo de pico WANA 2040079

## Problemática actual de la zona de estudio

El problema presente en Playa Granada se deriva sobre todo de la construcción de la presa de Rules cuya terminación se dio en el año 2004. Dicha presa está construida sobre el río Guadalfeo que desemboca en nuestra playa.

Mientras que la dinámica de la playa estaba formada por erosión en su parte occidental debido a un oleaje procedente principalmente de dirección oeste, ésta se veía compensada por un aporte de sedimentos procedentes del río Guadalfeo. Este aporte de sedimentos fue interrumpido de una forma brusca tras la construcción de la presa que actualmente actúa como un obstáculo reteniendo la gran cantidad de los sedimentos que el río transportaba a lo largo de su cauce y depositaba en la playa. Ello condujo a un gran retroceso de la línea de costa que actualmente continúa, provocando así que la parte oeste de la playa sea prácticamente nula con apenas unos metros de playa, contrastando con la zona Este de la playa que no para de recibir todo el sedimento erosionado de la otra zona de Playa Granada donde la acumulación de sedimentos ha provocado un ensanche de la playa. Ello obliga a realizar costosas operaciones de regeneración de la playa al ayuntamiento del municipio que únicamente suponen una solución temporal pues consisten en aportar una arena que en un escaso periodo de tiempo el oleaje eliminada del lugar ese aporte realizado sin haber dado una solución definitiva, y por lo tanto requerirá seguir invirtiendo dinero de una manera cíclica y sin éxito alguno.



Figura 2.3.1 Foto satélite de la situación actual de Playa Granada (Motril)

Todo lo anterior pone en valor el estudio de estas playas. Un estudio conjunto realizado en su día de la dinámica del río y la playa donde se hubiera conocido el comportamiento de los dos elementos hubiera sido la solución idónea al problema de tal forma que se hubiese previsto lo que hoy día está ocurriendo, pero actualmente sigue siendo igualmente necesario para poder poner fin al mismo de una manera más acertada que las actuales formas de actuación que se están llevando a cabo sobre la playa y que no suponen ningún tipo de avance en la solución del problema.



# Capítulo 3

## Metodología

Se expone a continuación un desarrollo y explicación de tallada, en el orden cronológico en el que se han llevado a cabo, las actividades realizadas a lo largo del proyecto para el desarrollo de los objetivos expuestos en el mismo.

Toda la ejecución de la metodología va a estar regida por una organización temporal de todas las tareas expuestas en el apartado 1.1 de Objetivos, como se expone en el siguiente diagrama de Gantt en el que se puede observar el tiempo de dedicación previsto a cada actividad llevada cada una a cabo en un orden concreto que permite así un mejor y correctamente estructurado desarrollo del trabajo:

	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9
Revisión del estado del arte	■								
Estudio del modelo numérico		■	■	■	■				
Realización de campañas de campo		■	■	■	■				
Realización de la batimetría			■	■	■	■	■	■	■
Análisis del clima marítimo			■	■	■	■	■	■	■
Simulación de casos (IH-2VOF)				■	■	■	■	■	■
Análisis de resultados de los casos					■	■	■	■	■
Discusión de resultados								■	■

### 3.1. Revisión del estado del arte

De especial interés y antes de dar comienzo de cualquier objetivo del proyecto, es indispensable echar la vista atrás y realizar una revisión previa de todo trabajo que ya se hubiera llevado a cabo en este campo para no empezar un paso atrás y sobre un trabajo ya realizado.

Ésta revisión realizada a través de la lectura de publicaciones en la materia hizo palpable la distancia existente entre el avance en el estudio de playas heterogéneas y homogéneas. Dicha diferencia de conocimiento reconocida además por diferentes autores (Daniel Buscombe, Gerhard Masselink...) hace patente la necesidad de los objetivos planteados en el presente proyecto como ya se ha dicho con anterioridad y remarca las carencias mencionadas, donde principalmente destaca la total falta de ensayos de laboratorio a pequeña escala de playas heterogéneas sobre un canal de oleaje.

Se muestra aquí la lista de los artículos revisados en relación con el tema del presente proyecto:

- (Jennings y Shulmeister 2002)
- (Buscombe y Masselink 2006)
- (Lara, Garcia y Losada 2006)
- (Lara, Losada y Liu, Breaking waves over a mild gravel slope: Experimental and numerical 2006)
- (Torres-Freyermuth, Losada y Lara, Modeling of surf zone processes on a natural beach 2007)
- (Torres-Freyermuth, Lara y Losada, Numerical modelling of short- and long-wave transformation on a barred beach 2010)
- (Lara, Ruju y Losada, Reynolds averaged Navier–Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach 2011)
- (Pedrozo-Acuña, y otros 2010)
- (Miche 1951)
- (Battjes 1974)
- (Nielsen y Hanslow, Wave runup distributions on natural beaches. Journal of Coastal Research 1991)
- (Nielsen y Kang, Groundwater dynamics in beaches and coastal barriers, in: International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments 1996)
- (Román-Blanco y Holmes, Further insight on behaviour of mixed sand and gravel beaches-large scale experiments on profile development, in: Coastal Engineering Conference 2002)

Todos ellos, junto con el resto de artículos presentes en la Bibliografía, mencionan distintos aspectos en relación a las playas heterogéneas, desde un repaso a sus distintas clasificaciones como de distintos conceptos en relación a estas. Además los autores destacan la falta de información actual en lo que respecta a las playas heterogéneas, algo que ya habíamos mencionado en la introducción de este proyecto.

## 3.2. Campañas de campo

Un estudio in-situ de la zona objetivo del proyecto constituye el primer paso fundamental a realizar. Tras haber visto todo el trabajo llevado a cabo dentro de este campo, se empezó a trabajar sobre la zona de estudio seleccionada de Playa Granada (Motril) que constituye nuestro prototipo para la elaboración del modelo que introduciremos en el modelo matemático IH-2VOF para la ejecución de los casos que nos arrojarán resultados.

Para llevar a cabo dicha tarea se han realizado campañas de campo de forma progresiva al lugar. En ellas se han ido realizando observaciones mediante inspecciones visuales de la zona con toma de fotografías para observar el estado de la playa y que permitiesen un análisis de la situación actual. A la vez, se han ido tomando una serie de medidas cuantificables que han permitido establecer y reproducir la situación actual en la que se encontraba la zona en el momento del comienzo del proyecto, así como ver la evolución de la zona a lo largo del desarrollo del mismo. La obtención de esta serie de medidas ha permitido además poder reproducir tanto la geometría de la playa a la hora de elaborar el modelo, como una obtención de los tipos de sedimentos que constituyen la playa, veamos en detalle en qué han consistido las actividades mencionadas.

### 3.2.1. Batimetría y topografía

La obtención del perfil completo de playa ha consistido en un trabajo dividido en dos partes perfectamente diferenciadas.

#### Topografía

Por un lado se ha llevado a cabo un registro de medidas topográficas del perfil de playa emergido en distintos momentos de tiempo, que ha servido para ver la evolución de la playa de una manera más directa y recoger la geometría de la misma. Dichas medidas han constituido la forma de obtención de la parte emergida de nuestro perfil de playa.

Para la obtención de la geometría de la parte emergida no basta con tomar la medida de un solo perfil e introducirlo en el modelo pues no sería fiable, y ello sería equivalente a meter una geometría ficticia o arbitraria. Es evidente que la playa no consiste en un único perfil que se repite longitudinalmente a lo largo de toda su extensión, sino que obviamente el perfil de playa va cambiando a lo largo de la misma. Es por ello que para la obtención de la geometría de la parte emergida, en cada visita al lugar se tomaba un registro de al menos unos diez perfiles de playa a lo largo de la zona elegida. Con esos diez perfiles se lleva a cabo una ‘media’ de los mismos siendo el perfil resultante el que se usará para la elaboración de la geometría del modelo. La realización de esa ‘media de perfiles’ permitirá también minimizar y compensar

posibles errores que puedan haberse cometido tanto por la simple utilización de los aparatos correspondientes como para compensar el propio error de medida que estos puedan cometer.

Las medidas topográficas se han llevado a cabo mediante la utilización de un equipo de material que incluye un GPS Diferencial *Javad Maxor* que será el encargado de generar las señales con la información de las coordenadas geográficas de los puntos que vaya registrando, y una PDA *Getac Nautix X7* la cual recibirá la información del GPS anterior y la guardará generando así el archivo de datos que contendrá toda la información que nos será necesaria.

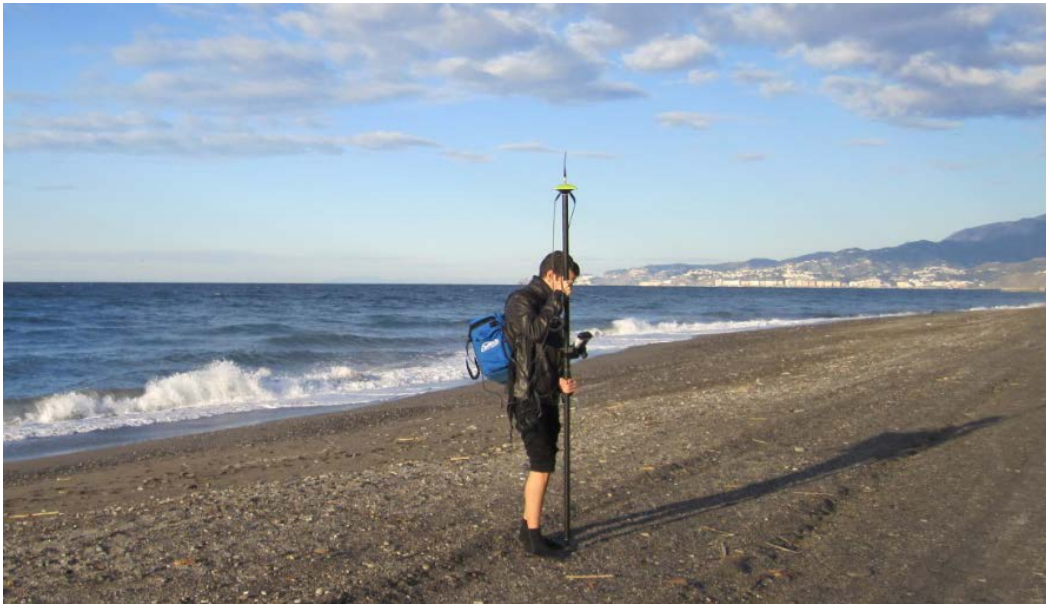


Figura 3.2.1 Obtención de la topografía de Playa Granada (Motril)

### **Batimetría**

Para la batimetría, los trabajos se iniciaron durante el mes de diciembre, transportando hasta Motril una embarcación de polietileno de 4 metros de eslora y un motor fueraborda de 6 caballos con soportes para las cabezas sonar de la sonda y el resto de periféricos, compensadores de movimiento, altímetro, sensor de rumbo y GPS. Esto nos permitirá tener el perfil de playa completo de la zona junto con las medidas topográficas, e introducirlo dentro del modelo. Para llevar a cabo esta actividad se ha utilizado la sonda Multihaz Interferométrica GeoSwath de Geoacoustics-*Kongsberg* y una estación Total GPS Trimble 5700.

El sistema de proyección empleado es el Universal Transversa Mercator (U.T.M), huso 30 norte. En ED50 son los propuestos por el IGN para España y mediante medición topográfica se dan coordenadas WGS 84 a la base, calculadas en modo inverso a la medición del punto de referencia. Los resultados entregados han sido archivos de nube de puntos en tamaño de malla 1x1m, 2x2m, 4x4m y 8x8m y curvas de nivel de la zona, dichas curvas se han entregado cada 0.50m.



### 3. Metodología

---

El alcance de la zona de estudio abarca a partir de la escollera del dique del puerto de Motril hasta el Peñón de Salobreña, hasta una profundidad de 50m y una separación de 1.000m de la rompiente. En total se ha sondado una extensión de unas 700 Hectáreas.



Figura 3.2.3 Embarcación hidrográfica utilizada



Figura 3.2.2 Sistema funcionando

### 3.2.2. Granulometría

Otro aspecto fundamental a establecer es la granulometría del material que compone la playa debido a que uno de los aspectos más importantes, es ver cómo afecta el tamaño de grano que compone la geología del lugar a la hidrodinámica de la zona.

La granulometría ha sido realizada mediante la recogida de muestras del material in-situ a lo largo de todo el perfil de playa tanto con superficie como en profundidad, y su posterior procesado en el laboratorio con el uso de una tamizadora y un peso. Se ha procedido a someter las muestras a un tamizado en el laboratorio para observar por separado la cantidad correspondiente de sedimento en cada rango de tamaño de grano. Ello permitirá que una vez obtenida la geometría del lugar mediante la toma de medidas topográficas y batimétricas explicadas, obtener las franjas granulométricas de material más frecuentes en nuestra playa.



Figura 3.2.5 Muestras de sedimento recogidas

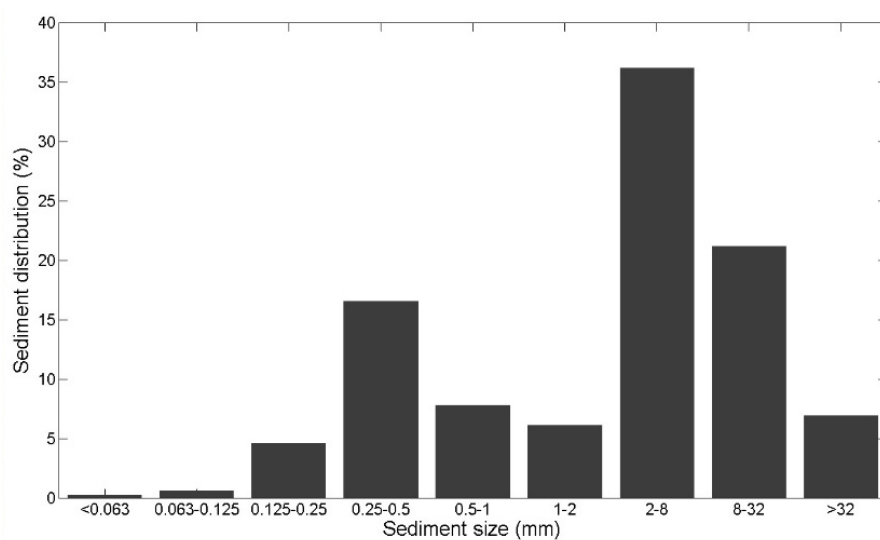


Figura 3.2.4 Granulometría de los sedimentos recogidos

Con ello podremos así fijar unas características a la geometría obtenida mediante la topografía y batimetría explicada en los apartados anteriores, otorgándole así unas propiedades (porosidad, diámetro característico del material...) a las distintas capas de materiales que formarán nuestro modelo, mediante los datos introducidos al mismo, y con la que estableceremos una serie de hipótesis a la hora de establecer distintas distribuciones de capas de sustratos que componen el perfil.

### **3.3. Estudio del prototipo**

No toda la información requerida para llegar a definir los casos a resolver en el modelo matemático pudo ser obtenida mediante las campañas de campo. Aspectos como el clima marítimo analizado en el capítulo anterior junto con toda la descripción de la zona de estudio es fundamental para establecer en este caso.

El clima marítimo se observó a través del análisis del punto WANA explicado en el capítulo 2.3 cuando se llevó a cabo la descripción de la zona de estudio. Con ella determinaremos las condiciones de oleaje reales de nuestra zona de estudio que serán reproducidas en nuestros modelos para la obtención de resultados. Estas condiciones de oleaje se determinarán con precisión en el siguiente capítulo.

### **3.4. Diseño de los casos**

Para la configuración completa y la posible ejecución de un caso que pueda ejecutarse en el modelo numérico, debemos establecer con anterioridad un prototipo real en el que basarnos, como sabemos en nuestro caso es Playa Granada. Todo ello viene en parte dado por las actividades llevadas a cabo en las campañas de campo tanto como con el análisis del clima marítimo mediante la consulta de la información ofrecida por el punto WANA.

Pero una vez obtenida la información necesaria, ésta debe ser transformada para poder con el modelo numérico simular un ensayo a pequeña escala como si se llevase a cabo en el laboratorio del Centro Andaluz de Medio Ambiente de la Universidad de Granada. Primero debemos obtener la geometría de la playa reducida a la escala del modelo, para ello presentaremos el canal de oleaje que nos proporcionará las dimensiones a las que deberemos ceñirnos. Como segundo paso ya podemos pasar a llevar a cabo el escalado de lo que supondrá nuestra playa, aparte de tener que ajustarnos geoméricamente a las dimensiones del canal de oleaje como se ha dicho, así como cinemáticamente, para establecer un oleaje equivalente al real que deberemos reproducir en el canal.

### 3.4.1. Canal de oleaje

Para establecer el diseño de los modelos a ejecutar en el modelo numérico se ha tomado de referencia las dimensiones del canal de ola-corriente del Centro Andaluz de Medio Ambiente de la Universidad de Granada (CEAMA-UGR).

Dicho canal posee unas dimensiones de 20m\*0.65m\*0.90m. Y además el canal está equipado con una pala estática capaz de generar el oleaje que se le establece.



Figura 3.4.2 Canal de oleaje corriente. Centro CEAMA-UGR



Figura 3.4.1 Foto panorámica del canal de oleaje

La geometría del modelo, creada a partir del prototipo real de Playa Granada, se ha elaborado a partir de un perfil de Playa Granada obtenido de la unión de las medidas batimétricas y topográficas obtenidas en las campañas de campo unido a un escalado de las mismas de tal forma que se adaptase a la escala del canal de oleaje-corriente. Una vez obtenido el perfil de playa, con el mismo se han elaborado una serie de casos previos más sencillos en cuanto a disposición de sustratos de material que pueden componer la playa variando longitudinalmente, basándonos también en el análisis de la granulometría que se ha llevado a cabo mediante las muestras de materiales recogidos en las campañas de campo, para poder ver unos primeros resultados orientativos en el modelo.

Tras ello se han diseñado los que se denominan en el proyecto casos definitivos donde se dispone de una forma de más compleja la disposición de los sustratos de materiales que pueden componer la playa, variando los mismos tanto en espesor de capa como en tamaño de grano en dirección longitudinal y transversal.

#### 3.4.2. Escala geométrica

Una vez que sabemos las dimensiones a las que debemos ajustarnos, establecemos la escala geométrica entre el prototipo que es Playa Granada y el modelo que vamos a establecer. Puesto que contamos con dos dimensiones principales para reproducir el perfil de playa, debemos concretar qué dimensión será más restrictiva a la hora de establecer la escala geométrica.

Primero, fijamos la escala vertical y pasamos la distancia horizontal de la sección de la playa a esa escala. En el caso de que esa distancia horizontal se fuese de escala y fuera desproporcionada para colocarse en el canal de ensayo, actuamos al revés, primero fijamos la escala horizontal y luego pasamos la distancia vertical de la sección transversal de la playa a esta escala y comprobamos ahora que esa distancia vertical no sea desproporcionada.

- Ajuste de la escala horizontal fijando la vertical

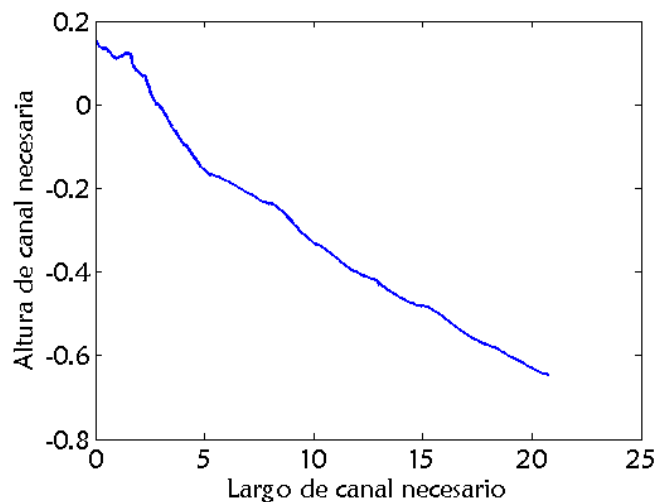


Figura 3.4.3 Perfil de playa escalado fijando la escala vertical

Fijando una *Altura* = 0.8m, es necesario un *Largo de canal* = 20.76m.

- Ajuste de la escala vertical fijando la horizontal

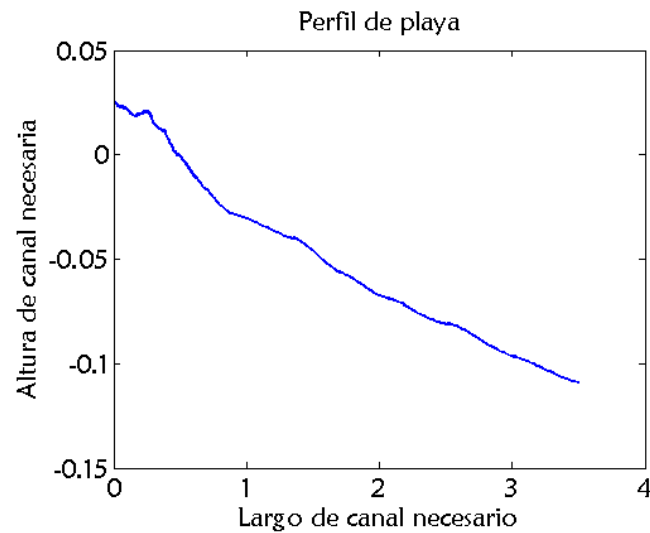


Figura 3.4.4 Perfil de playa escalado fijando la escala horizontal

Fijando un *Largo de canal* = 3.50m, es necesaria una *Altura* = 0.135m.

De esta manera, observando que la dimensión de la altura es mucho más restrictiva, fijaremos la escala geométrica fijando primero la escala vertical de nuestro perfil para una buena adecuada reproducción del mismo en el canal de oleaje. Establecemos como una buena altura del perfil de playa de 25cm y con dicha altura establecemos la escala geométrica calculando tras ello el largo que ocupará nuestra playa en el canal y comprobando que no sea una distancia desproporcionada.

Esta escala geométrica aparte de permitir encajar nuestro perfil de playa en el canal, y además va a permitir una aplicación directa a su vez sobre una de las condiciones de oleaje, la altura de ola, al tratarse ésta de una variable geométrica. La escala geométrica vendrá dada por:

$$\lambda = \frac{\text{Longitud prototipo}}{\text{Longitud modelo}}$$

### 3.4.3. Escala temporal

Establecida la escala geométrica, el siguiente paso es establecer la escala de tiempos mediante una semejanza cinemática provocando la conservación entre modelo y prototipo del número de Froude. Con ello podremos obtener el periodo correspondiente en nuestro modelo, asociado a la altura de ola anterior, del respectivo periodo obtenido del análisis del clima marítimo.

$$\mathcal{F} = \frac{u}{\sqrt{g * h}}$$

Donde  $u$  = velocidad,  $g$  = gravedad y  $h$  = profundidad.

Teniendo en cuenta que la relación de escala de gravedad entre prototipo y modelo es igual a 1, se llega a la expresión que permite establecer la relación de tiempos entre modelo y prototipo  $\frac{t_{prototipo}}{t_{modelo}} = \sqrt{\lambda}$ .

Con esta relación obtenemos el periodo que debe tener la ola que generemos en el canal de oleaje:

$$T_{prototipo} = \sqrt{\lambda} * T_{modelo}$$

#### 3.4.4. Escala granulométrica

Establecida la semejanza cinemática, ésta nos valdrá para obtener el diámetro característico de los distintos materiales que componen la playa, es decir obtendremos el diámetro de grano equivalente a los diámetros de grano obtenidos a través de la granulometría realizada

Para el escalado granulométrico se ha utilizado el número de Dean. Este número establece una relación adimensional entre tres variables (altura de ola, periodo y velocidad de caída del sedimento del material). De entre esas variables, es la velocidad de sedimentación la que está relacionada con el tamaño característico del material, algo que nos va a permitir transformar el tamaño real de grano del prototipo en un tamaño de grano para el modelo y que permita guardar la semejanza entre modelo y prototipo.

En este caso la conversión no ha sido inmediata ya que una de las variables de las que depende el número de Dean no tiene una expresión unificada y su expresión varía dependiendo del autor. Es por ello que se han analizado distintos casos según la expresión de dicha velocidad de sedimentación y se han comparado los valores obtenidos para cada tamaño de grano valores reales medidos la velocidad para distintos diámetros característicos de grano.

Los distintos criterios tenidos en cuenta para la obtención de la velocidad de caída del sedimento según diferentes autores han sido:

a) **Hallermeier**

$$\omega = \frac{\rho' * g * (d_{50})^2}{18 * \nu} \text{ para } A < 39$$

$$\omega = \frac{(\rho' * g)^{7/10} * (d_{50})^{11/10}}{6 * \nu^{2/5}} \text{ para } 39 < A < 10^4$$

$$\omega = \frac{(\rho' * g)^{1/2} * (d_{50})^{1/2}}{0.91} \text{ para } 10^4 < A < 3 * 10^6$$

Donde  $\rho' = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)$  es la densidad sumergida,  $\rho_s$  la densidad del sedimento,  $\rho = 1 \frac{g}{cm^3}$  la densidad el agua,  $\nu$  la viscosidad cinemática del

fluido y  $A$  es la flotabilidad del grano sumergido que se obtiene con la expresión:

$$A = \frac{\rho' * g * (d_{50})^3}{v^2}$$

donde  $g = 980.6 \frac{cm}{s^2}$ ,  $v = 0.0119 \frac{cm^2}{s}$  (para agua salada),  $v = 0.0100 \frac{cm^2}{s}$  (para agua dulce).

**b) Komar y Gaughan**

Velocidad de caída del sedimento:  $\omega = 273 * d_{50}^{1.1} (m)$

Altura de rotura:  $H_b = 0.39 * g^{0.2} * (T * H_0^2)^{0.4}$ , donde  $g = 980.6 \frac{cm}{s^2}$ .

**c) Engelund and Hansen (1972) and Cheng**

$$\omega = \frac{v}{d} * d_*^3 * (38.1 + 0.93 * d_*^{12/7})^{-7/8}$$

Y del cual  $d_* = \left(\frac{\rho' * g}{v^2}\right)^{1/3} * d$ , se define como el diámetro de la partícula adimensional.

**d) Soulsby**

$$\omega = \frac{\mu}{\rho * D} (\sqrt{10.36^2 + 1.049 * D_*^3} - 10.36)$$

Donde  $D_* = D_{50} * \left[\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right) * \frac{g}{v^2}\right]^{1/3}$ .

Con los cuatro criterios anteriores, la expresión del número de Dean es compartida para los cuatro métodos del cálculo de la velocidad de caída del sedimento, siendo su expresión:

$$D_\omega = \frac{H}{\omega * T}$$

Para elegir uno de los anteriores métodos, se han escogido unas condiciones de oleaje, y tres diámetros característicos diferentes correspondientes con arena, grava fina y grava gruesa sacados del análisis granulométrico obtenido a través de las campañas de campo. Con esos datos, de cada criterio mostrado para la obtención de la velocidad de caída del sedimento, se ha obtenido los siguientes valores:



### 3. Metodología

---

- Velocidad de caída del sedimento escalada:  $\omega$
- Diámetro característico del sedimento escalado:  $D_{50}$  [cm]
- Número de Dean:  $D_{\omega}$

Una vez obtenidos estos valores, a través de la comparación de las velocidades de caída del sedimento obtenidas con respecto a valores experimentales registrados, veremos qué criterios proporcionan unos valores adecuados de dicha velocidad. En las imágenes inferiores podemos ver los valores experimentales registrados de velocidad de caída según el tamaño de grano.

diameter	fall velocity
D	w
(m)	(m/s)
0.0001	0.008
0.0002	0.022
0.0004	0.050
0.001	0.122
0.002	0.196
0.004	0.280
0.01	0.440
0.1	1.40
1.0	4.43

Figura 3.4.5 Valores experimentales de la velocidad de caída del sedimento para distintos diámetros de sedimento

De los cuatro casos anteriores, el segundo únicamente nos da valores aceptables de la velocidad de sedimentación para valores pequeños de tamaño de grano y además no tenemos seguridad de que la altura de rotura de ola que proporciona se cumpla, por lo que queda descartado. De los otros tres, los tres proporcionan valores razonables de las velocidades de sedimentación pero nos decantamos finalmente por el primero de ellos pues Hallermeier es uno de los autores con mayor reconocimiento en su campo.

<b>VALORES FIJADOS DEL PROTOTIPO</b>	$H$ [m]	1	1	1
	$T$ [s]	5	5	5
	$D_{50}$ [mm]	0.25	5	20
<b>Criterio de Hallermeier</b>	$\omega$ [cm/s]	2.989	31.256	62.512
	$D_{50}$ [mm]	0.06240	0.2819	0.5295
	$D_{\omega}$	6.6893	0.6399	0.2529
<b>Criterio de Komar y Gaughan</b>	$\omega$ [cm/s]	2.98	80.36	369.23
	$D_{50}$ [mm]	0.03559	-	-
	$D_{\omega}$	6.7114	-	-
<b>Criterio de Engelund and Hansen and Cheng</b>	$\omega$ [cm/s]	2.5061	29.9809	60.5537
	$D_{50}$ [mm]	0.0679	0.2927	0.5362
	$D_{\omega}$	7.9806	0.667809	0.3303
<b>Criterio de Soulsby</b>	$\omega$ [cm/s]	3.2387	28.8858	58.201
	$D_{50}$ [mm]	0.06845	0.23962	0.699
	$D_{\omega}$	6.17529	0.6923	0.3436

Tabla 3.4.1 Valores ensayados con cada criterio para la elección del mismo

### 3.4.5. Condiciones de oleaje

Las condiciones de oleaje se extraen del análisis del clima marítimo a través del análisis del punto WANA correspondiente a nuestra zona. Ello, explicado llevado a cabo en el capítulo anterior, determinará el oleaje que deberemos reproducir a través del modelo numérico. La concretización de estas condiciones se detalla en el siguiente capítulo en el cual se desarrolla todo lo referente a cada uno de los aspectos a definir los casos a ejecutar.

## 3.5. Modelo numérico

En este capítulo se presenta y se desarrolla todo lo que concierne al modelo numérico IH-2VOF utilizado para obtener resultados de los casos ejecutados.

En un primer paso se va a mostrar todo lo que concierne a las características del modelo, explicándolo en sí mismo. Explicaremos la formulación matemática en la que se basa así como el módulo CORAL del que se vale para generar la geometría y las mallas que permitirán el cálculo sobre la geometría introducida en el programa.

A lo anterior le prosigue un análisis de la configuración del modelo. Se mostrará la geometría de la playa unida a las condiciones del medio poroso que constituya la playa según el caso ejecutado, las propiedades de la malla utilizada cuya configuración se basa en las condiciones de oleaje introducidas en cada caso que también serán detalladas. Con todo lo anterior se especificará la situación de los sensores colocados a lo largo del perfil de playa que serán los encargados de registrar el valor numérico de las variables deseadas en el punto de colocación de los mismos.

### 3.5.1. Características del modelo

Como ya se ha presentado anteriormente, el modelo numérico elegido para la propagación del oleaje y análisis del flujo a lo largo del modelo de playa estudiada, es el modelo IH-2VOF. Desarrollado por la Universidad de Cantabria para establecer en run-up y el run-down en playas, el estudio de la interacción del medio poroso con el oleaje en obras marítimas o de cualquier otra estructura marítima en general de la que se desee observar su comportamiento bajo unas determinadas características de oleaje. Todo ello desarrollado en dos dimensiones.

La elección del modelo se ha debido a que ha sido validado con anterioridad contrastando su validez en numerosos trabajos para la propagación del oleaje junto con su interacción con medios porosos, lo que nos resulta muy útil en el caso específico de representar una playa con sus distintas capas de sedimentos. Además permite definir casos con las mismas condiciones ya que permite simular la pala generadora de oleaje del canal junto con todas características geométricas que allí se dan.

La última parte descrita resulta fundamental pues con ello se logrará obtener en una primera instancia resultados que nos permitirán ver si un ensayo real en el laboratorio arrojaría buenos resultados marcando un primer paso en la línea de investigación de estas playas, ya que sería una pérdida de tiempo y dinero lanzarse a la realización de unos ensayos de los que se tenga la certeza que darían resultados que no aportarían nada.

### 3.5.2. Formulación matemática

El software del modelo numérico IH-2VOF se encarga de resolver en dos dimensiones las ecuaciones de Navier-Stokes. Éste permite ver la interacción de medios porosos con un determinado oleaje proporcionando información como la presión a la que está sometida, en run-up de una playa, velocidades, turbulencia, etc.

El flujo del medio poroso en el modelo IH-2VOF se obtiene a través de la resolución de las ecuaciones Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS). Ecuaciones que son derivadas de la integración de las ecuaciones RANS en un volumen de control. En el modelo de IH-2VOF, se supone que el tensor de tensiones de Reynolds está relacionado con la velocidad de deformación del flujo principal a través del modelo algebraico no lineal  $k - \varepsilon$ .

### 3.5.3. CORAL

Este módulo del que se vale el modelo matemático, va a permitir establecer la geometría a ejecutar en cada caso. Para ello establece un dominio donde se dibuja la geometría de la estructura (o playa, en nuestro caso) a estudiar, y en la que especifica también la profundidad del agua y sobre la que se generará el oleaje indicado. Lo anterior se lleva a cabo permitiendo el módulo generar una serie de dominios según sus distintas características:

- Dominio del agua.
- Elementos impermeables.
- Elementos porosos (de los que permite especificar las propiedades de cada uno de ellos).

Los elementos anteriores serán definidos en forma mediante la especificación de las coordenadas de cada uno de los distintos puntos que componen a cada elemento, previa definición del tamaño del dominio general que constituye un marco general que engloba a todos los elementos descritos y sobre el que los mismos ocuparán una posición determinada.

### 3.5.4. Configuración del modelo

La configuración de los casos a ejecutar estará formada por la definición total del modelo siguiendo la referencia de nuestro prototipo (Playa Granada). Para poder ejecutar un caso en nuestro programa deberemos definir geométricamente la situación y escala del elemento que quiere ser estudiado, reproduciendo el perfil de playa ajustado a las dimensiones del canal de oleaje presente en el laboratorio del CEAMA. Una vez establecida la geometría deben introducirse las condiciones de oleaje que

queremos reproducir sobre el elemento definido anteriormente, ello junto a las propiedades de la pala generadora del oleaje que tenemos en el canal. Para finalizar deberemos especificar algunas propiedades que debemos especificar junto con la posición de todos los sensores que deseemos colocar y que obtendrán un registro del valor de los parámetros dados (a nosotros nos interesará tener los valores de superficie libre así como las velocidades horizontal y vertical de las olas).

#### **Geometría de la playa**

Tras la unión de los datos topográficos y batimétricos y de tener así el perfil completo de playa, este deberá escalarse mediante la escala geométrica definida pues debemos recordar que nos interesa simular un ensayo de laboratorio a pequeña escala y no unas condiciones de escala real.

Así pues nuestra geometría estará constituida por un perfil de playa, que según el caso estará compuesto por distintos tipos de lechos formados de medios porosos con distintas características.

#### **Malla**

La malla generada por el módulo CORAL, debe definirse según un balance entre los resultados obtenidos y el tiempo de ejecución necesario para la obtención de esos resultados. Pese a ello, el modelo matemático requiere que se cumplan una serie de criterios para garantizar una correcta resolución de las ecuaciones:

- Antes de todo hay que tener en cuenta que dentro de todo el dominio donde se propaga en oleaje hasta llegar a nuestro elemento, únicamente nos interesa la zona en la que nuestra playa está situada por lo que la malla no tendrá la misma resolución a lo largo de todo el dominio. Crearemos subzonas donde la de mayor resolución estará situada sobre la playa que es donde nos interesan un cálculo más preciso que procure buenos resultados.
- Teniendo en cuenta lo anterior, en la dimensión vertical se requiere un mínimo de 7 celdas, hasta un máximo de 10 por altura de ola. Como tenemos distintas condiciones de oleaje (extremas y medias) este tamaño de celda variará según el caso.
- Para la dimensión horizontal de cada celda, el ratio aceptable para su dimensionamiento se encuentra entre  $1 < \frac{\Delta x}{\Delta y} < 5$ , eligiendo un valor de 2 para la región de máxima resolución de la playa, y un valor de 4 para el resto de subzonas fuera de nuestro interés. Ello provocará un menor tiempo en la resolución de los cálculos en zonas no interesantes de estudio.

De esta manera la configuración de la malla dentro de todo el dominio de trabajo es la siguiente, siempre dividiendo el dominio en tres subzonas:

	Condición de oleaje media			Condición de oleaje extrema		
	<i>Subzona 1</i>	<i>Subzona 2</i>	<i>Subzona 3</i>	<i>Subzona 1</i>	<i>Subzona 2</i>	<i>Subzona 3</i>
$\Delta x$	0.01	0.006	0.01	0.028	0.014	0.028
$\Delta y$	0.003	0.003	0.003	0.007	0.007	0.007

Tabla 3.5.1 Malla generada para la obtención de resultados

**Subzona 1**

La malla de la subzona 1 cubre la zona de generación y regularización del oleaje, es donde se propaga el mismo hasta la playa. Cubre una longitud de 9.5m,

- Condición de oleaje media: el número de celdas que posee a la derecha es de 1 y a la izquierda de 950.
- Condición de oleaje extrema: el número de celdas que posee a la derecha es de 1 y a la izquierda de 340.

**Subzona 2**

La malla de la subzona 2 cubre toda la geometría de la playa, y es donde nos interesa la mayor resolución de la misma pues es donde se produce la interacción entre el oleaje y el medio poroso. Cubre una longitud de 7.1m:

- Condición de oleaje media: el número de celdas que posee a la derecha es de 1190 y a la izquierda de 1.
- Condición de oleaje extrema: el número de celdas que posee a la derecha es de 508 y a la izquierda de 1.

**Subzona 3**

La malla de la subzona 3 cubre la zona final del canal de oleaje. Cubre una longitud de 9.5m:

- Condición de oleaje media: el número de celdas que posee a la derecha es de 450 y a la izquierda de 1.
- Condición de oleaje extrema: el número de celdas que posee a la derecha es de 161 y a la izquierda de 1.

Se observa que una condición de oleaje extrema precisa de una menor resolución del mallado debido a un valor superior de su altura de ola según se ha visto en las condiciones de establecimiento de la malla. Como nota debe decirse que para una correcta interpretación del dominio del agua, éste debe extenderse más allá de los límites del dominio tanto en los extremos como en el fondo del mismo.

Para cada caso ejecutado irán cambiando las condiciones de los medios porosos junto con la malla correspondiente según se traten de una condición de oleaje u otra como se describe en el apartado siguiente.

**Condiciones de oleaje**

Cada caso será ejecutado en el modelo numérico bajo dos condiciones de oleaje distintas. El programa IH-2VOF permite elegir distintas propiedades de este

oleaje y bajo qué condiciones es calculado. Se muestra a continuación las dos series de oleaje elegidas en nuestro caso. La elección del conjunto Altura de ola-Periodo se ha hecho en base al estudio del clima marítimo para reproducir las condiciones de oleaje, tanto medias como extremas, de nuestro prototipo que es Playa Granada. Ocurriendo que la altura de ola 3 m es representativa de condiciones de alto contenido energético en esa zona (Bergillos, Sánchez y Losada 2015) (Bramato, y otros 2012).

#### **Condición de oleaje media:**

- Tipo de oleaje: *Regular*
- Altura de ola: **1m**
- Periodo: **4s**
- Frecuencia: **20Hz**
- Fase:  **$3 * \pi/2$**
- Tiempo de simulación: **75s**
- Teoría: *Linear theory*

#### **Condición de oleaje extrema:**

- Tipo de oleaje: *Regular*
- Altura de ola: **3m**
- Periodo: **9s**
- Frecuencia: **20Hz**
- Fase:  **$3 * \pi/2$**
- Tiempo de simulación: **110s**
- Teoría: *Linear theory*

Como se observa la frecuencia elegida es de 20Hz pues es frecuencia de los sensores presentes en el laboratorio, la fase no ha sido modificada y se ha dejado la que viene por defecto y el tiempo de simulación varía de una condición de oleaje a otra debido a que ésta ha sido elegida en función del periodo. En todo momento se ha buscado que cada sensor obtenga un registro mínimo de 50 olas por ello se ha realizado la siguiente cuenta: *Tiempo simulación = T \* 50 + (Tiempo extra)*, donde el "*Tiempo extra*" resulta ser el "tiempo que tarda en llegar la primera ola al último sensor para asegurarnos de que el registro de esas 50 olas afecte a todos y cada uno de los sensores dispuestos a lo largo de todo el perfil.

#### **Características del medio poroso**

Del análisis de la granulometría surge este apartado van a formarse perfiles de playa con sedimentos que formen el lecho con un tamaño característico referente a los principales tamaños de grano presentes en la playa.

Son tres las fracciones predominantes en la composición del sedimento y de esta forma se irán alternando para los distintos casos previos a ejecutar los siguientes materiales con sus correspondientes características:

- Arena: materializado en el modelo como objeto impermeable debido a su pequeño tamaño de grano y reducida porosidad.
- Grava fina: caracterizado en el modelo por un medio poroso. Sus propiedades son:  $D_{50} = 5mm$ ,  $n = 0.35$ .
- Grava gruesa: caracterizado en el modelo por un medio poroso. Sus propiedades son:  $D_{50} = 20mm$ ,  $n = 0.35$ .

A parte de estas variables, el modelo requiere la fijación de otros dos parámetros denominados  $\alpha$  y  $\beta$  cuyo valor va a depender del  $D_{50}$  característico de cada material. El significado y expresión matemática de ambos parámetros se encuentran explicados dentro del Apéndice que describe la modelización matemática del modelo.

### **Parámetros simulados**

El interés del uso del modelo numérico viene dado por el valor de los parámetros que éste es capaz de aportar. En este caso será el registro de superficie libre calculado (conjuntamente con los registros de velocidad tanto horizontal como vertical) lo que cobra mayor interés para el proyecto para poder realizar un análisis de los fenómenos que tienen lugar y de cómo afecta la evolución de los parámetros registrados según el tipo de sedimento que forme el lecho de la playa.

Es fundamental poder observar la evolución continua a lo largo de todo el perfil de la playa según avance el frente de oleaje hacia la costa para poder observar cómo se comporta éste en todo momento y ser a la vez capaz de detectar cualquier cambio o efecto reseñable. Es por ello que se han dispuesto a lo largo de todo el perfil de playa 26 sensores (con una frecuencia de muestreo de **20Hz**). La posición de estos sensores será idéntica en todos los casos ejecutados pues el mayor interés es detectar de un caso a otro en una misma posición, cambios significativos en los registros de superficie libre. La posición de cada uno de los sensores puede observarse en la figura superior.



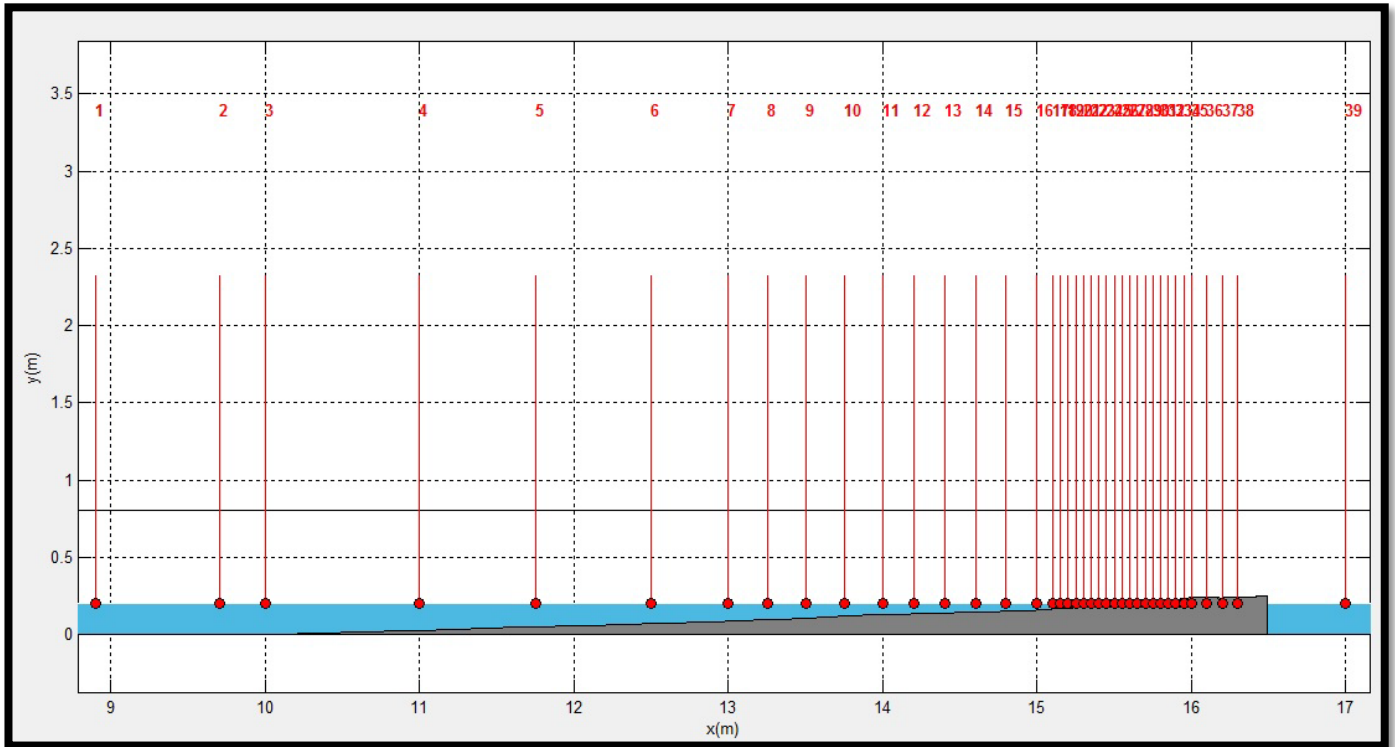


Figura 3.5.1 Situación de los sensores a lo largo de todo el perfil de playa

#### 3.5.5. Resultados del modelo

A partir de los sensores de nivel, el modelo obtendrá un registro de la superficie libre del oleaje generado junto con los valores de la velocidad horizontal y vertical de ese oleaje en para toda la columna de agua sobre la que está situada el sensor, lo que equivale a obtener un registro de tres variables distintas para cada sensor a lo largo de todo el tiempo de simulación establecido en las condiciones de oleaje.

Con ellos, mediante su observación se hará un análisis de los fenómenos hidrodinámicos presentes en la simulación del caso con los que se establecerán ciertos valores de los mismos tales como la reflexión, disipación, y run-up entre otros bajo criterios de distintos autores. Además, de los 26 sensores establecidos, los tres primeros están colocados de tal forma que permitan la aplicación del Método de Baquerizo para el cálculo del coeficiente de reflexión. Todo ello permitirá un análisis mediante la comparación de los datos ofrecidos por el modelo frente a los distintos valores de las variables expuestas obtenidos teóricamente



# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Diseño de los casos: escalado

Como se vio en la explicación del modelo numérico las variables mostradas tanto en la parte geométrica como en la de condiciones de oleaje, dichas variables no podrán ser introducidas tal cual en el modelo ya que deseamos reproducir un ensayo a pequeña escala dentro del canal de oleaje del laboratorio. Es por ello que se escalan las condiciones de oleaje que debemos reproducir en el canal respetando la semejanza geométrica como dinámica entre el prototipo y el modelo. De la lectura de la base de datos del punto WANA establecemos las condiciones de oleaje mencionadas, y tras el escalado, obtenemos los siguientes resultados:

	Condición media		Condición extrema	
	<i>Valor real</i>	<i>Valor escalado</i>	<i>Valor real</i>	<i>Valor escalado</i>
<b>Altura de ola <math>H[m]</math></b>	1	0.0254	3	0.0762
<b>Periodo <math>T[s]</math></b>	4	0.6375	9	1.4343

Tabla 4.1.1 Condiciones de oleaje establecidas

Lo mismo ocurre con los tamaños de grano del sedimento que compone la playa, para la reproducción de un modelo a pequeña escala el sedimento también debe verse afectado por el escalado.

### 4.2. Procesos físicos de la hidrodinámica de la playa

Previo análisis de los resultados, es necesario hacer un repaso teórico de los procesos que están presentes en la interacción de la ola con la playa. Veámoslo de forma más detallada.

#### 4.2.1. Asomeramiento

Es el fenómeno que se espera como predominante de todo el proceso, dicho efecto se da a medida que el oleaje se propaga desde profundidades indefinidas hacia reducidas: la celeridad y la longitud de onda disminuyen conforme el medio de

propagación disminuye la profundidad, y tiene lugar una variación en el peralte  $H/L$  de la ola que da lugar a una pérdida de simetría.

El coeficiente de asomeramiento se define como:

$$k_s = \frac{C_{g1}}{C_{g2}}$$

Siendo  $C_g$  la celeridad de grupo en una sección 1 y 2, anterior y posterior respectivamente.

En términos de coeficiente de asomeramiento:

- $k_s$  disminuye al pasar de profundidades indefinidas a intermedias (menor altura de ola respecto a profundidades indefinidas).
- $k_s$  aumenta al pasar de profundidades intermedias a reducidas (mayor altura de ola respecto a profundidades intermedias).

En conclusión, a medida que el oleaje se propaga desde profundidades indefinidas a reducidas, la altura de ola aumenta hasta producirse la rotura.

### 4.2.2. Reflexión

El fenómeno de reflexión tiene lugar cuando debido a la presencia de un obstáculo, en nuestro caso la playa, parte de la energía de la onda incidente es transmitida en la dirección de propagación, y parte de ella es devuelta en dirección opuesta.

El coeficiente de reflexión se define como:

$$R = |R| * e^{i\varphi} = \frac{A'_R}{A'_I} = \frac{A_R}{A_I} = e^{i(\varphi_R - \varphi_I)}$$

Donde  $A'_R$  y  $A'_I$  son las amplitudes complejas, y  $A_R$  y  $A_I$  las amplitudes reales de las ondas incidente y reflejada respectivamente,  $|R|$  es el módulo y  $\varphi = \varphi_R - \varphi_I$  el desfase entre la onda incidente y la reflejada.

Para el cálculo de dicho coeficiente, tomaremos las siguientes formulaciones:

- Criterio de Battjes (1974):

$$k_R = 0.1 * I_r^2$$

- Criterio de Chesnutt (1978):

$$k_R = 0.1 * \frac{I_r^2}{5.5 + I_r^2}$$

- Criterio de Michie (1951):

$$k_R = \sqrt{\frac{2 * \beta}{\pi} * \frac{\sin \beta^2}{\pi}}$$

Las cuales dependen de la pendiente del perfil de playa  $\beta$  directamente o a través del número de Iribarren  $I_r = \tan \beta / \sqrt{H/L_o}$ , siendo  $H$  la altura de ola y  $L_o$  la longitud de onda en profundidades indefinidas.

A parte de los métodos anteriores, también se contrastará el coeficiente de reflexión mediante la aplicación del Método de Baquerizo (1995) (implementado en el software matemático MATLAB), el cual basa el cálculo del coeficiente de reflexión teniendo en cuenta más variables diferentes a la pendiente del perfil de playa.

### 4.2.3. Rotura

El asomeramiento y la refracción producen en su conjunto un aumento progresivo de la altura de ola conforme el tren de ondas se propaga sobre una batimetría con profundidad decreciente. Lógicamente el aumento en la altura de ola no es ilimitado, dado que a una cierta profundidad la onda se vuelve inestable y rompe, disipando en este proceso una gran cantidad de energía.

Para una onda progresiva se considera que la rotura ocurre cuando se da alguno de los siguientes fenómenos:

- La celeridad de la partícula en la cresta es superior a la celeridad de la onda.
- El peralte  $H/L$  de la onda se sitúa por encima de un cierto valor que hace que su geometría no sea físicamente estable.
- La aceleración vertical de las partículas supera el valor de la gravedad.

Se trata de un fenómeno de caracterizado por la disipación de energía debida a la turbulencia (Higuera et a., 2012).

El criterio que mejor describe el proceso de rotura en playas heterogéneas es el régimen rotura-reflexión (Losada, 2009), según el cual la rotura reproduce con la contribución de la reflexión y la fase determina el punto de rotura. Se define el peralte máximo de la ola como:

$$\left(\frac{H}{L_0}\right)_b \approx 0.0277 * \tanh\left(\frac{\beta_{lim}}{2\pi} * \left(\frac{h}{g * T^2}\right)^{\gamma_{lim}}\right)$$

$$\beta_{lim} = 17.7 \text{ si } m < \frac{1}{15}$$

$$\gamma_{lim} = 0.9 \text{ si } m < \frac{1}{10}$$

$$\left(\frac{H}{L_0}\right)_b \approx 0.0277 * \tanh\left(\frac{\beta_{lim}}{2\pi} * \left(\frac{h}{L_0}\right)^{\gamma_{lim}}\right)$$

$$\beta_{lim} = 1.52 * m + 6.6 \text{ si } m \geq \frac{1}{15}$$

$$\gamma_{lim} = 1.92 * m + 0.72 \text{ si } m \geq \frac{1}{10}$$

Siendo  $h$  el calado,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $m$  la pendiente del perfil de playa.

#### 4.2.4. Disipación

El fenómeno de la disipación refleja la pérdida de energía provocada fundamentalmente mediante rotura y fricción por fondo. Es un proceso complementario con la reflexión, por lo que se define su coeficiente como:

$$k_D = \sqrt{1 - k_D^2}$$

Es por ello que una vez conocido el valor de la reflexión, la obtención del valor del coeficiente de disipación es inmediato.

#### 4.2.5. Infiltración

La infiltración es la penetración de agua a través de los poros del sedimento que compone el lecho. Es un proceso que se relaciona directamente con la porosidad y la permeabilidad, siendo una función dependiendo de variables como el tamaño, forma, mezcla, orientación y gradación del sedimento (Buscombe and Masselink, 2006).

El coeficiente de permeabilidad se relaciona (según McDougal, 1993) con el diámetro nominal ( $D_{50}$ ) y la porosidad ( $n$ ) según la expresión:

$$k_p (m^2) = 1.643 * 10^7 * \left( \frac{D_{50}(mm)}{10} \right)^{1.57} * \frac{n^3}{(1 - n)^2}$$

Al aumentar el valor de la permeabilidad de una playa, menor será el valor de su altura de ola y aumentará la simetría de olas incidentes (Pedro-Azcuña et al., 2010) puesto que aumentará la infiltración del flujo ascendente en la zona *swash*, debilitando la acción del flujo descendente

#### 4.2.6. Run-up

Se define el Run-Up como el valor máximo del ascenso de la lámina de agua sobre el nivel medio del agua. Éste depende del tipo de rotura y de las características del talud (pendiente, rugosidad y permeabilidad)

Tres criterios distintos se tendrán en cuenta para su cálculo:

- Criterio de López de San Román-Blanco (2004):

$$\bar{\eta}_{\infty} = 0.62 * \tan \beta * \sqrt{H * L_0}$$

- Criterio de Nielsen y Kang (1996):

$$\bar{\eta}_{\infty} = 0.55 * \tan \beta * \sqrt{H_{rms} * L_0}$$

- Criterio de Nielsen y Hanslow (1991):

$$\bar{\eta}_{\infty} = 0.36 * \tan \beta * \sqrt{H} * T$$

### 4.3. Casos modelados

Como un paso previo al análisis de casos reales, se han estudiado antes una serie de casos denominados como “previos” con los que se ha buscado partir desde lo simple, y cuyo principal objetivo es comenzar a observar qué es lo que ocurre en nuestro perfil de playa. De esta manera nos permitirá ver claramente qué fenómenos que están teniendo lugar, y a partir de ello ir evolucionando poco a poco a casos más complejos que nos permitan más adelante analizar de una forma correcta los casos reales.

Partiendo del razonamiento anterior, se han establecido dos grandes grupos básicos. En el primero de ellos se ha estudiado la influencia que tiene una variabilidad del sedimento en profundidad, así pues los casos estarán formados por capas de sedimento de un único material, y dispuestas paralelamente a la superficie del perfil de playa. Y el segundo grupo básico se ha formado para tener un estudio de la influencia del tamaño de grano en una variabilidad transversal del sedimento. Con ello las capas de sedimento del primer grupo que estaban formadas de un solo material ahora están compuestas por una alternancia de materiales a lo largo de todo el perfil de playa.

#### Variabilidad de sedimento en profundidad

Cuatro son los casos ensayados en este grupo, tanto para una condición de oleaje media, como para la extrema. Los cuatro casos ejecutados son los siguientes:

1. Perfil de playa totalmente impermeable (se trataría de un perfil de playa compuesto en su totalidad por arena, pero que en el modelo numérico se representa como medio impermeable).

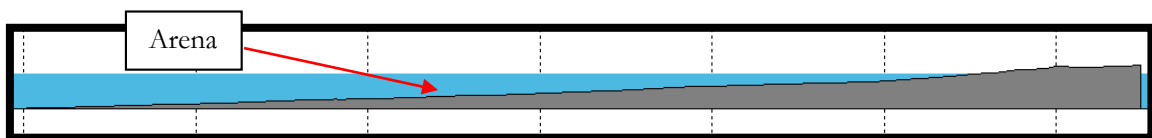


Figura 4.3.1 Disposición del Caso 1-Variabilidad de sedimento en profundidad

2. Base impermeable + capa superior de 1m grava fina (5mm).

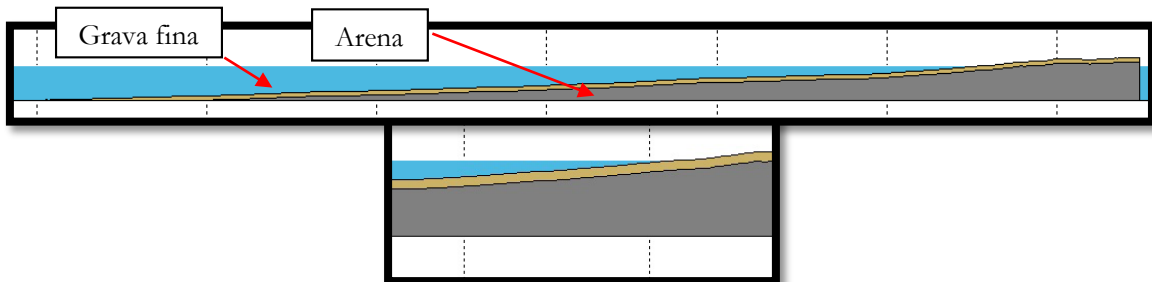


Figura 4.3.2 Disposición del Caso2-Variabilidad de sedimento en profundidad

3. Base impermeable + capa superior de 1m grava gruesa (20mm).

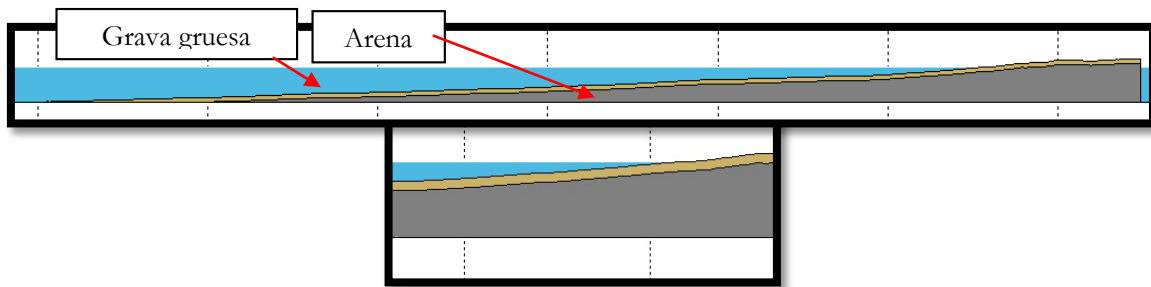


Figura 4.3.3 Disposición del Caso 3-Variabilidad de sedimento en profundidad

4. Base impermeable + capa 1m grava fina (5mm) + capa superior de 1m grava gruesa (20mm).

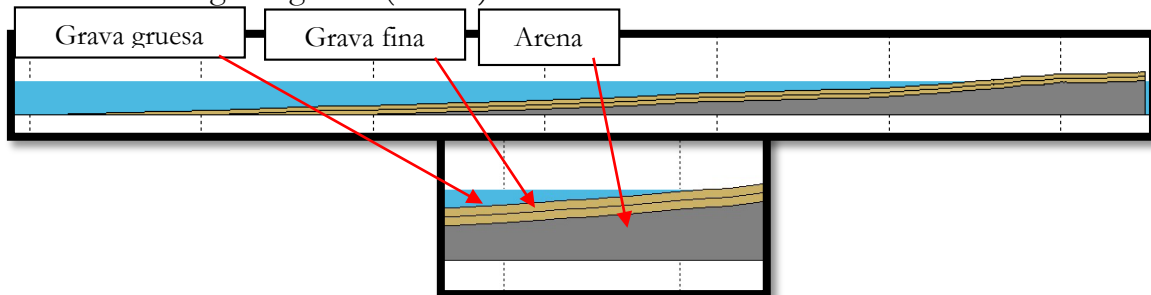


Figura 4.3.4 Disposición del Caso 4-Variabilidad de sedimento en profundidad

### Variabilidad transversal de sedimento

1. Base impermeable + capa superior dividida en 6 tramos en los que empezando por grava fina (5mm), se produce una alternancia entre ésta y la grava gruesa.

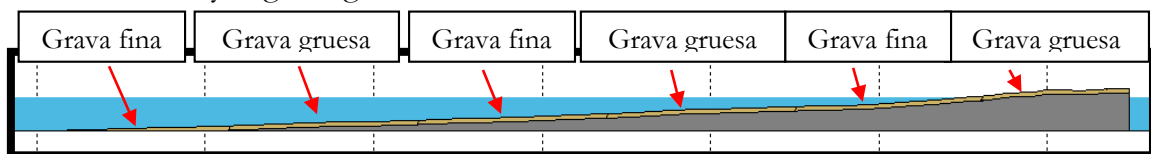


Figura 4.3.5 Disposición del Caso 1-Variabilidad transversal de sedimento

2. Base impermeable + capa superior dividida en 6 tramos en los que empezando por grava gruesa (20mm), se produce una alternancia entre ésta y la grava fina.

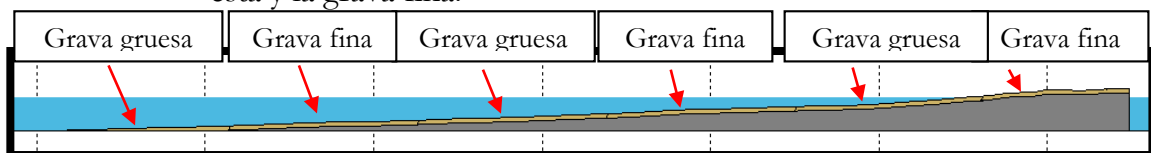


Figura 4.3.6 Disposición del Caso 2-Variabilidad transversal de sedimento



#### 4. Resultados

3. Base impermeable + capa superior dividida en 6 tramos en los que empezando por material impermeable, se produce una alternancia entre ésta, la grava gruesa y la grava fina.

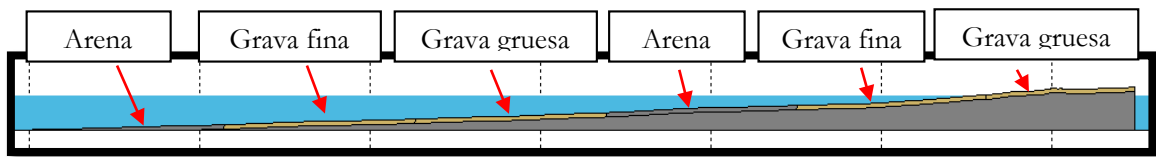


Figura 4.3.7 Disposición del Caso 3-Variabilidad transversal de sedimento

4. Base impermeable + capa superior dividida en 6 tramos en los que empezando por grava fina (5mm), se produce una alternancia entre ésta, el material impermeable y la grava gruesa.

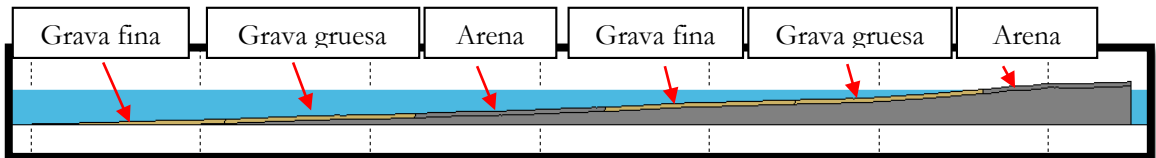


Figura 4.3.8 Disposición del Caso 4-Variabilidad transversal de sedimento

5. Base impermeable + capa superior dividida en 6 tramos en los que empezando por grava gruesa (20mm), se produce una alternancia entre ésta, el material impermeable y la grava fina.

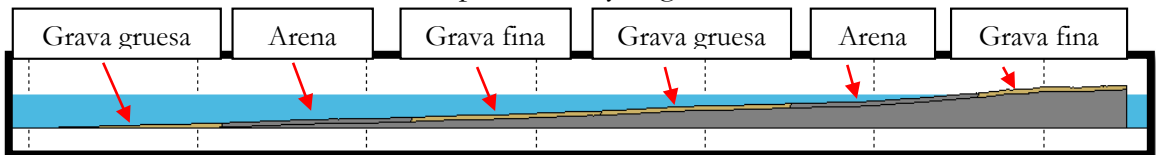


Figura 4.3.9 Disposición del Caso 5-Variabilidad transversal de sedimento

### 4.3.1. Estudio en profundidad. Condición de oleaje media

Vamos a comenzar analizando los resultados de los casos que únicamente varían el tamaño de grano del sedimento en profundidad y bajo unas condiciones medias de oleaje. Observamos detalladamente caso por caso los resultados arrojados por el modelo matemático.

#### CASO 1

El primer caso ensayado para el estudio en profundidad consiste en un perfil de playa compuesto en su totalidad por arena (recordemos que la arena es modelizada por el modelo matemático a través del módulo Coral, como un obstáculo impermeable debido a su muy baja porosidad).

#### Superficie libre

La progresión de datos tomados por los sensores colocados a lo largo de todo el perfil de la playa permite observar claramente como la ola va sufriendo el efecto del asomeramiento por el efecto del fondo según se acerca a la línea de costa. El fondo provoca en definitiva un aumento del peralte de la ola. Más concretamente, éste induce una reducción de la longitud de onda que la ola compensa con un aumento de altura de la misma para mantener la energía que transporta la ola.

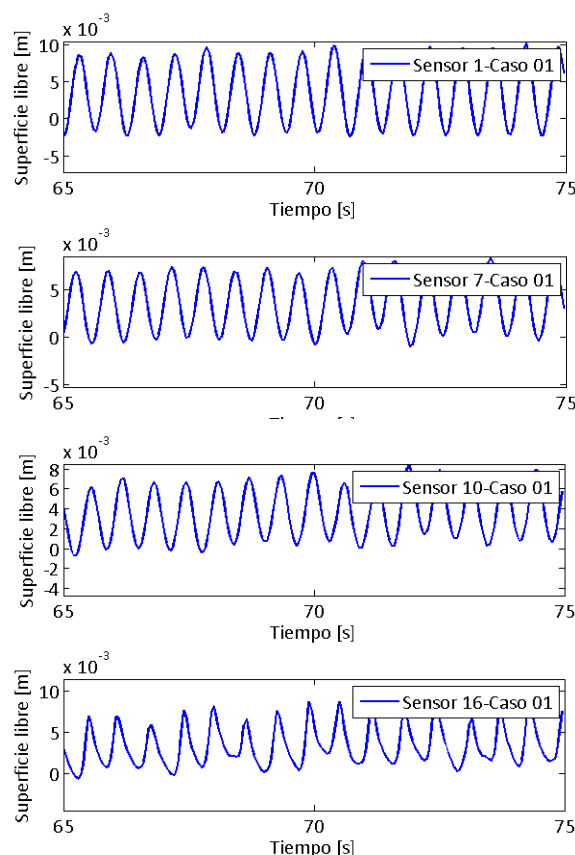


Figura 4.3.10 Evolución de superficie libre. Caso 1. Sensores 1, 7, 10, 16

Por otra parte, el asomeramiento se ve sumado al efecto de la reflexión mucho más perceptible en la zona cercana a la línea de costa donde el calado del agua es mucho menor. Esta reflexión gráficamente se ve reflejada por una suma de oleaje incidente y reflejado que provoca una pérdida de simetría del mismo. Este continuo aumento del valor del peralte según la ola se acerca a la línea de costa se refleja gráficamente entre otras cosas por la pérdida de simetría como puede observarse en la gráfica de los datos registrados por el sensor 17 situada en la figura inferior.

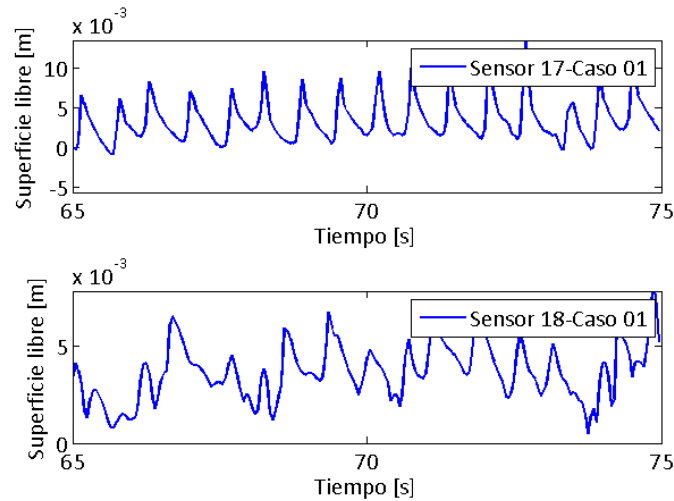


Figura 4.3.11 Evolución de superficie libre. Caso 1. Sensores 17 y 18

Pero el aumento de la altura por parte de la ola lógicamente no se produce de forma ilimitada, llega un momento en el que la ola se hace inestable y la ola rompe.

### **Velocidad horizontal y vertical**

En lo que respecta a las velocidades, la profundidad mediante el asomeramiento ya descrito, afecta a la ola de tal forma que el gradual aumento de peralte conlleva un paulatino descenso de su velocidad, aspecto que la ola compensa aumentando la altura de la ola. Este descenso de la velocidad, conforme la ola va perdiendo la simetría y se acerca a la línea de costa, se invierte y se convierte en una progresiva aceleración de la ola. Debido a que la reducción de profundidad no es brusca, si no que se da progresivamente, el efecto es más palpable según va la ola acercándose a la playa como se percibe en los registros de los sensores.

En un principio tenemos que las velocidades, al no notar la ola todavía el fondo, sus valores se distribuyen simétricamente en torno al eje horizontal de la gráfica. La simetría anterior se pierde conforme nos acercamos a la línea de costa, en donde los valores negativos de la onda se reducen tanto en número como en su valor absoluto en sí, mientras que los valores positivos aumentan su valor ofreciendo picos altos de velocidad vertical alcanzada por la onda que no se daban antes en el resto de sensores que se encuentran más alejados de la línea de costa. Ello nos indica la

continua transformación que sufre la ola en cuanto a su peralte que avanza hacia una rotura de la misma.

Como resulta evidente, y se explicó en la rotura, llega un momento en el que la ola se hace inestable y la ola rompe. Ello va ligado a la continua pérdida de simetría de la ola explicada que va evolucionando hasta un cierto punto en el que ésta adopta una geometría inestable. La celeridad en la cresta supera a la celeridad de la onda, y la aceleración vertical de sus partículas es mayor que la aceleración de la gravedad. Todo ello conlleva que la ola rompa provocando una última aceleración general de la velocidad en todas sus partículas como se aprecia en la figura inferior, debido a esto la ola alcanza unos valores picos tanto en la velocidad horizontal como en la velocidad vertical.

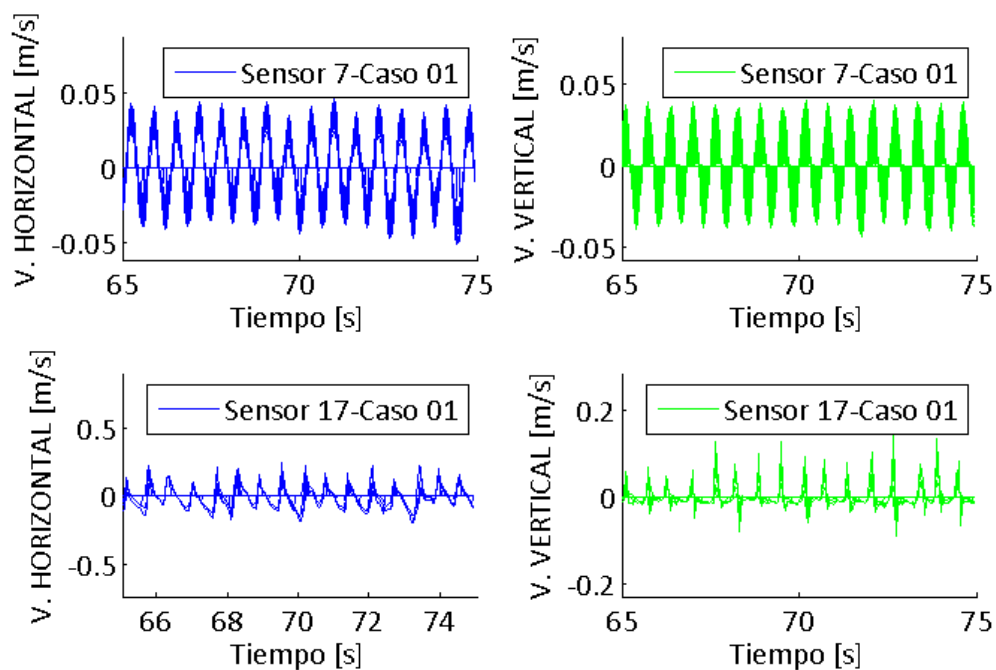


Figura 4.3.12 Evolución de la velocidad. Caso 1. Sensores 7 y 17

## **CASO 2**

El segundo caso ensayado para el estudio en profundidad consiste en un perfil de playa de arena con una capa de 1m de espesor de sedimento en su superficie de gravas finas de 5mm de diámetro característico de tamaño de grano.

### **Superficie libre**

El asomeramiento vuelve a dominar prácticamente el proceso de disipación de energía. Se percibe una menor pérdida de simetría de la ola a lo largo de su avance hacia la línea de costa, esto permite deducir que un proceso adicional está afectando a la disipación de energía.

Este nuevo proceso puede achacarse a la infiltración ahora presente por la capa porosa de 1m de grava fina dispuesta como la superficie del perfil de playa. La infiltración provoca así que la energía del oleaje vaya disipando energía de una forma más suave y menos brusca y esta vaya perdiendo altura de ola de una forma gradual de una forma suave y mucho menos visual, pues el oleaje ahora no se encuentra con una capa de arena modelizada mediante un elemento impermeable por el modelo matemático, sino que ahora se encuentra con un obstáculo poroso de 1m de espesor. Es por ello que la reflexión debe verse reducida, y por ello la suma de onda incidente y reflejada es menos acusada y la pérdida de simetría bastante menor. Todo ello sumando el hecho de estar reproduciendo un oleaje con un contenido energético no muy grande, por lo que la representación de los registros de superficie libre permiten ver una menor altura de ola conforme se avanza a la línea de costa pero donde, como se ha comentado, la ola conserva su simetría.

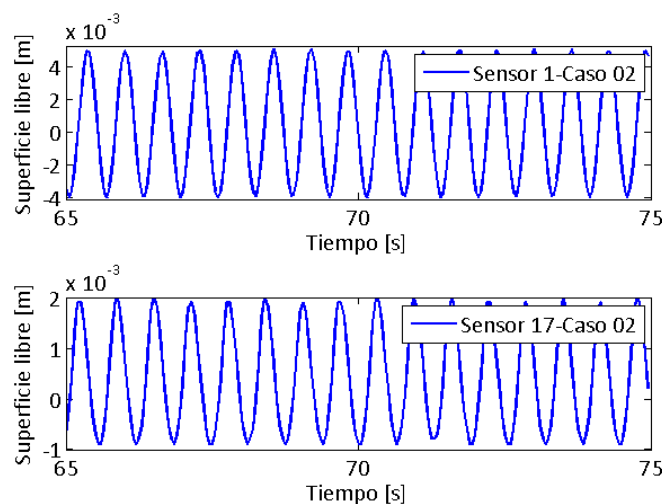


Figura 4.3.13 Evolución de superficie libre. Caso 2. Sensores 1 y 17

En la figura superior se ve claramente lo expuesto en los párrafos anteriores de este apartado donde en el eje de ordenadas podemos comprobar numéricamente que el oleaje ha disipado energía pues tenemos una altura de ola menor, pero la simetría ahora es prácticamente inexistente.

### Velocidad horizontal y vertical

Las velocidades nos muestran la misma evolución, es decir, el valor de estas va reduciéndose continuamente de forma conjunta. Pero no se observa, como ocurre con la superficie libre, en registros de sensores cercanos a la línea de costa una pérdida de simetría. El oleaje va desapareciendo poco a poco conforme se acerca a la costa y la energía se va disipando, pero ese oleaje se ve mucho menos afectado por una pérdida de simetría provocada por una superposición de oleaje incidente y reflejado. Llegamos a la misma conclusión, la capa de grava fina hace que entre en juego la infiltración como un proceso disipativo más, reduciendo la reflexión de la playa.

Igualmente en la representación gráfica de los registros de velocidades se aprecia la disipación de energía pero sin una pérdida de simetría tan apreciable como ocurría para el caso 1 donde el perfil completo de arena (representado en el modelo matemático mediante el módulo Coral como un objeto impermeable debido a su baja porosidad) cuya reflexión es mayor.

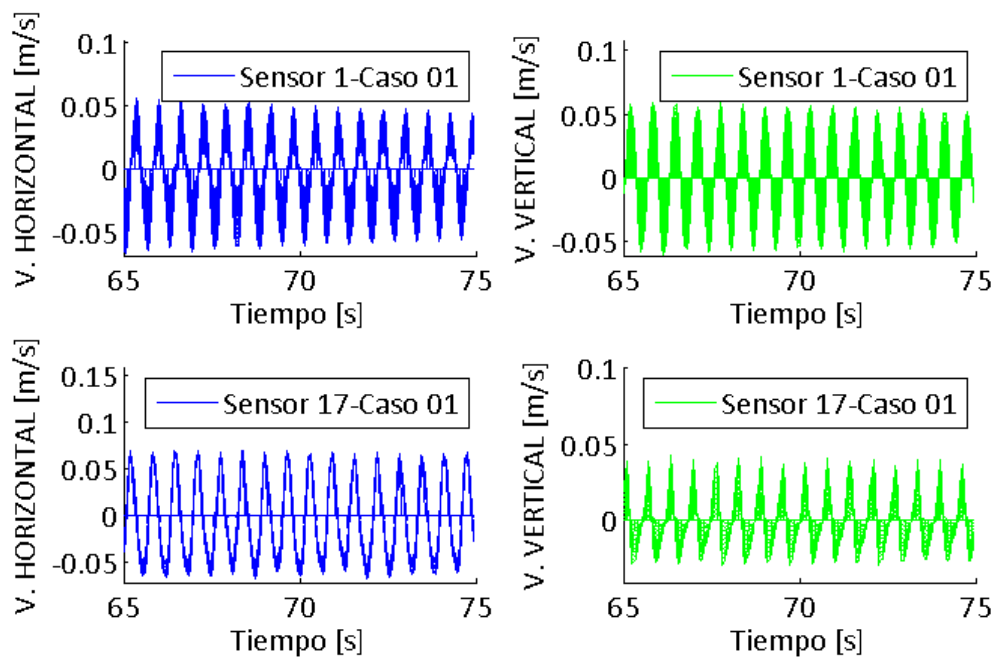


Figura 4.3.14 Evolución de la velocidad. Caso 2. Sensores 1 y 17

### **CASO 3**

El tercer caso ensayado para el estudio en profundidad consiste en un perfil de playa de arena con una capa de 1m de espesor de sedimento en su superficie de gravas gruesas de 20mm de diámetro característico de tamaño de grano.

#### **Superficie libre**

Los resultados muestran unos registros de superficie libre mayores que cuando la capa de sedimento de la superficie del perfil de playa eran gravas finas. Eso nos indica que en cierto modo las gravas gruesas provocan un peralte mayor la ola respecto al peralte que provocaba el lecho de gravas finas del caso anterior. Ello provocará que la geometría de la ola alcance antes la inestabilidad y con ello su rotura. Por eso es por lo que se deduce que las gravas gruesas disipan energía en el oleaje de una forma más acentuada que las gravas finas, lo que nos lleva a concluir que un tamaño de sedimento mayor, para un mismo valor de porosidad, es un material mucho más competente para la destrucción del oleaje.

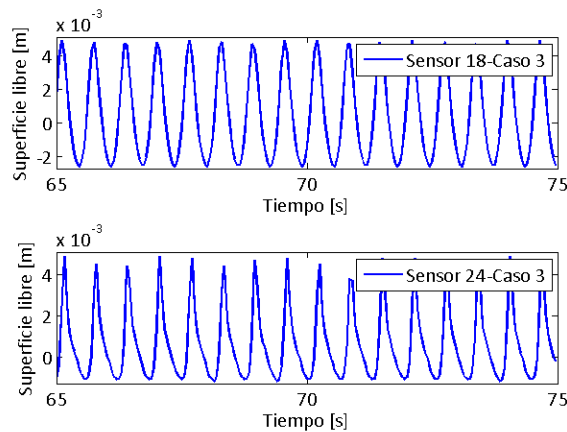


Figura 4.3.15 Evolución de superficie libre. Caso 3. Sensores 18 y 24

#### **Velocidad horizontal y vertical**

Se presenta debajo una figura correspondiente a los registros de velocidades de los sensores mostrados en la superficie libre. Se observa la concordancia con los registros de superficie libre e igualmente de los valores de las velocidades se vuelve a deducir de esta representación gráfica un mayor peraltado de la ola.

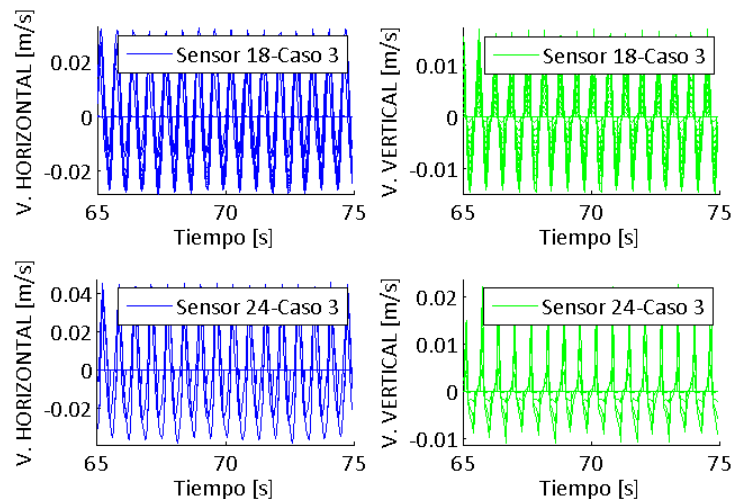


Figura 4.3.16 Evolución de la velocidad. Caso 3. Sensores 18 y 24

#### **CASO 4**

El cuarto caso ensayado para el estudio en profundidad presenta la disposición en nuestro perfil de playa de dos capas de sedimento de 1 m de espesor (una capa de gravas finas bajo una capa de grava gruesa que se encuentra en superficie) dispuestas sobre un núcleo de arena. De esta forma podremos ver cómo afecta una actuación conjunta de varios tipos de sedimento variando en profundidad tras haber visto ya cuales han sido las principales influencias de cada tamaño de grano por separado.

##### **Superficie libre**

Como se observa en la figura, al disponer de dos capas de sedimento de un metro de espesor, el registro de superficie libre en un punto avanzado del perfil es menor respecto a los casos en los que se dispuso una única capa de material poroso en superficie. Comparamos el caso 2, que sólo tenía grava fina, con este nuevo caso. Con ello vemos como tanto el tamaño de grano como una mayor capacidad de infiltración de la playa provocan una disipación de energía transportada por la ola.

La clave más importante aquí es la mayor capacidad infiltración en profundidad, presentada por primera vez en un caso. La infiltración, como se explicó, va relacionada con el tamaño de grano y con la porosidad, a mayor valor de éstas, mayor será el índice de permeabilidad. Frente a una mayor pérdida de energía por infiltración y percolación en el segundo caso, ya que ahora al tener dos capas de sedimentos porosos, la ola va disipando más energía gradualmente. Ello se ve reflejado en las figuras inferiores donde para este último caso se aprecia un registro de superficie libre menor que cuando sólo disponíamos de una capa de material poroso en el lecho de la playa.



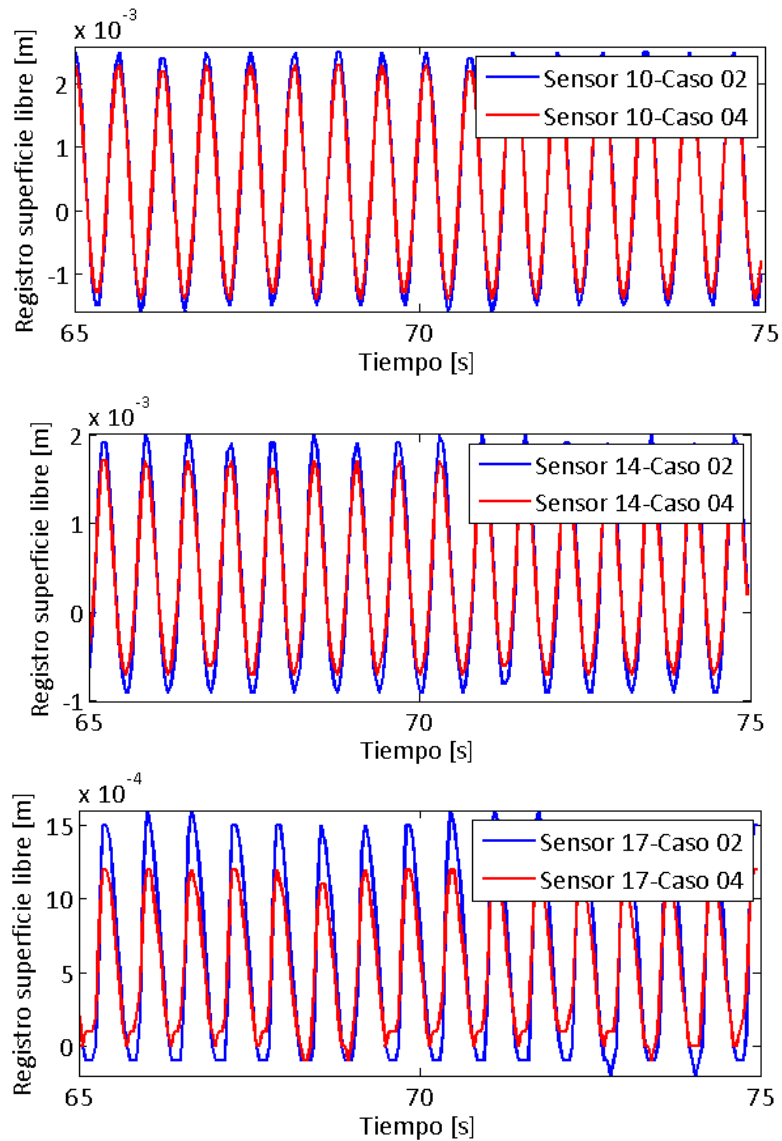


Figura 4.3.17 Evolución de superficie libre. Caso 4. Sensores 10, 14 y 17

### Velocidad horizontal y vertical

La mayor disipación de energía se ve reflejada como resultaría evidente en las velocidades que van a ser menores en este último caso. Así pues las conclusiones finales de estos casos previos del estudio en profundidad son que, cuanto mayor es el tamaño de grano del lecho, mayor energía disipa la playa, y que cuanto mayor es la profundidad disponible para la infiltración de la ola, ésta también influirá en la disipación de energía.

### 4.3.2. Estudio en profundidad. Condición de oleaje extrema

Continuando con el análisis por separado del estudio de la variabilidad en profundidad del sedimento, pasamos ahora examinar todos los casos anteriores pero bajo unas condiciones de oleaje extremas.

#### CASO 1

##### Superficie libre

Para la condición extrema de oleaje, se observa que la ola asomera antes. Una mayor altura de ola provoca que ésta sienta el lecho marino de una forma anticipada, por lo que la ola sufre una pérdida de simetría más temprana y rompe antes. Este efecto puede apreciarse en la figura inferior donde para una misma posición, en este caso para el sensor 12, el registro obtenido para la condición de oleaje extrema muestra los efectos comentados. Mientras que para  $H = 1m$  (línea azul) la ola permanece perfectamente simétrica y apenas le ha afectado el fenómeno del asomeramiento, para  $H = 3m$  ya es claramente perceptible el aumento de peralte sufrido por la ola junto con una pérdida de simetría. Ello es debido sobre todo a un mayor contenido energético transportado por el oleaje

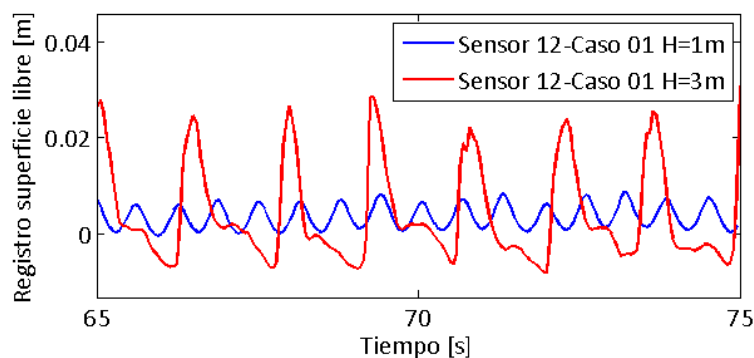


Figura 4.3.18 Comparación de la evolución de superficie libre. Caso 1. Condición de oleaje media y extrema. Sensor 12

##### Velocidad horizontal y vertical

Las velocidades sufren la evolución normal vista hasta ahora. Estas van modificando sus valores y perdiendo su simetría conforme el asomeramiento le afecta a la ola, hasta que llegan a unos valores picos que provocan la inestabilidad final que provoca la rotura de la ola. La inestabilidad más temprana mencionada antes para una  $H = 3m$  puede verse también como es lógico en los registros de velocidad.

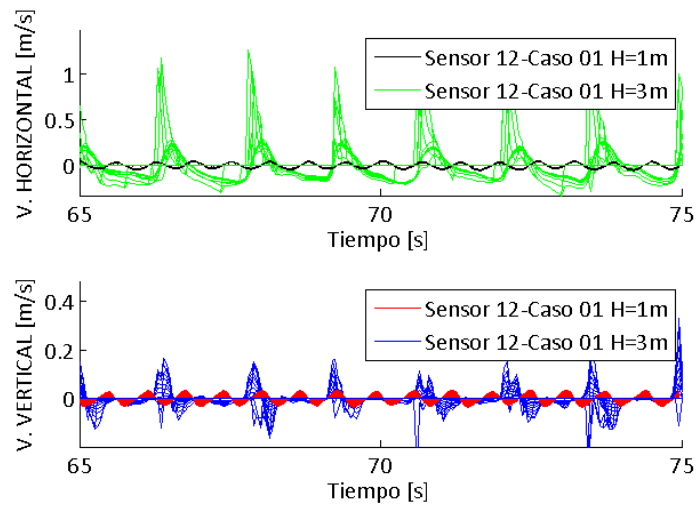


Figura 4.3.19 Comparación de la evolución de la velocidad. Caso 1. Condición de oleaje media y extrema. Sensor 12

### **CASOS 2 y 3**

Mostramos ahora conjuntamente los casos 2 y 3 para mostrar así una comparación directa de los resultados obtenidos por el modelo matemático. Tenemos ahora una capa de sedimento de 1m de espesor de grava fina y otra de grava gruesa en cada caso respectivamente en la superficie del perfil de playa, pero sometidas ahora a unas condiciones de oleaje extremas.

#### **Superficie libre**

Como ocurría bajo una condición de oleaje media, la ola continúa peraltándose de una forma más acentuada en un mismo punto del perfil de playa para el caso en el que el perfil está compuesto por una capa en superficie de grava gruesa. La altura de ola es mayor para este último caso. Con ello reafirmamos que la grava gruesa peralta más la ola en su avance a la línea de costa.

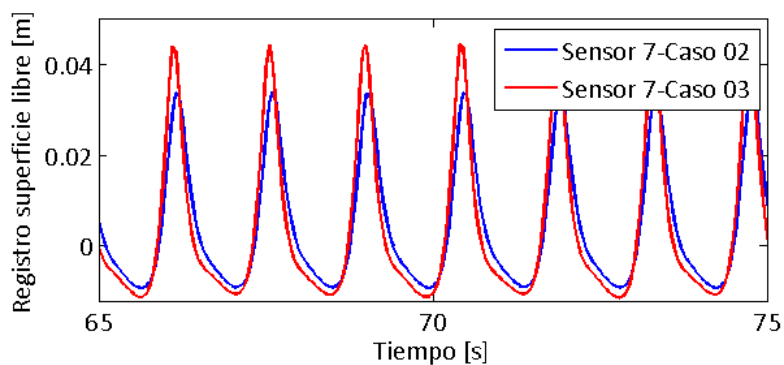


Figura 4.3.20 Evolución de superficie libre. Casos 2 y 3. Sensor 7

### Velocidad horizontal y vertical

En el caso de gravas gruesas, este mayor peraltado de la ola provoca que alcance luego unas velocidades más elevadas, por lo que al romper el run-up en el caso de la grava gruesa llega algo más lejos que respecto a la grava fina, ya que los valores ligeramente superiores de velocidad alcanzados por la ola así lo permiten.

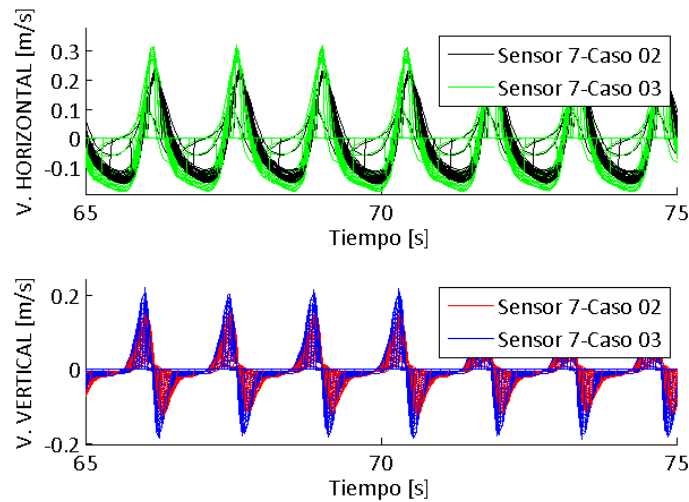


Figura 4.3.21 Evolución de la velocidad. Casos 2 y 3. Sensor 7

### CASO 4

El último caso a analizar del estudio en profundidad del sedimento es el caso de dos capas de 1m de profundidad de material poroso sometida a la condición de oleaje extrema.

#### Superficie libre

El principal efecto de las dos capas de sedimento dispuestas es que la infiltración aumenta en profundidad y ésta afecta a la altura de ola que se ve reducida. Esta reducción no es muy significativa pero observable, por lo que según el espesor y disposición de las capas de sedimentos sobre el perfil de playa puede convertirse en un aspecto más significativo a tener en cuenta como una herramienta disipadora de energía que transporta la ola.

En la figura inferior se muestra este efecto superponiendo los registros de superficie libre de los casos 03 y 04, compuestos por un lecho marino de una y dos capas de sedimento respectivamente.

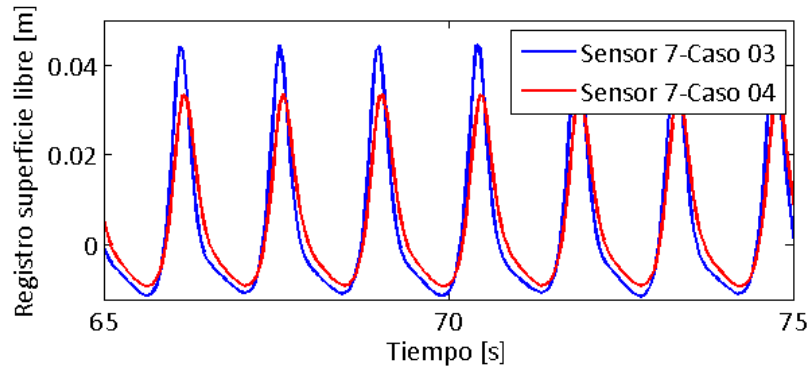


Figura 4.3.22 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensor 7

### Velocidad horizontal y vertical

La mayor infiltración en profundidad afecta de igual manera a las velocidades bajo las condiciones de oleaje extremas. De la misma manera para un mismo sensor, los registros obtenidos son de menor valor para este caso en el que están dispuestas dos capas porosas, comparándolo con el caso anterior en el cual únicamente se dispuso una capa de grava gruesa.

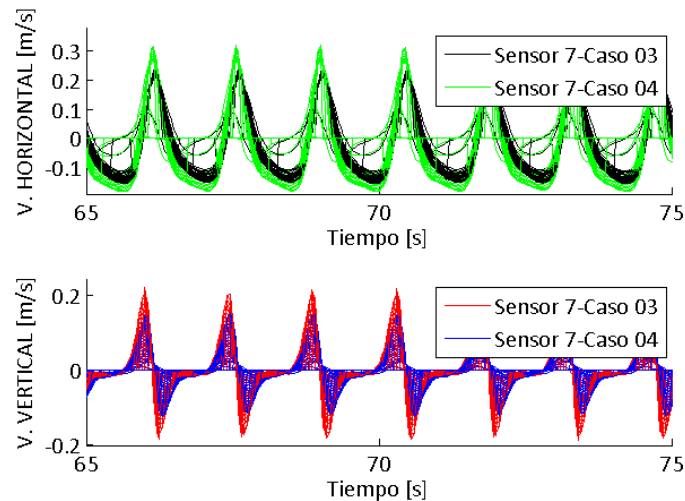


Figura 4.3.23 Evolución de la velocidad. Casos 3 y 4. Sensor 7

### 4.3.3. Estudio en profundidad. Parámetros de la hidrodinámica

Analicemos ahora mediante la observación de ciertos valores de parámetros relacionados con la hidrodinámica de la playa. Con ello pretendemos reafirmar conclusiones ya sacadas del análisis de los registros de la superficie libre, además de alguna que otra nueva conclusión junto con una comparación de la validez del modelo matemático.

Para ello, se presentan una serie de tablas donde se recogen conjuntamente los valores para la condición de oleaje media como la extrema, y para cada caso mostrado.

#### CASO 1

En este primer caso, la tabla inferior nos permite comparar y observar por ejemplo, que el valor del run-up calculado por el modelo está bastante bien ajustado, pese al haber algún valor algo discordante. Como pretendíamos con la elaboración de dicha tabla, con ella reafirmamos que como se dedujo del análisis de los registros de superficie libre, la reflexión es un fenómeno menor y que el proceso dominante es el de la disipación (es decir, la pérdida de energía sobre todo por la fricción del fondo y la rotura de la ola).

PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO			
Altura de rotura $H_b$ [m]		Run-up $\bar{\eta}_\infty$ [m]	
<i>Oleaje medio</i>	0.0048	<i>Oleaje medio</i>	0.0100
<i>Oleaje extremo</i>	0.0537	<i>Oleaje extremo</i>	0.0226

PARÁMETROS CALCULADOS			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
Nº Iribarren en la rotura		0.4432	0.2982
Altura de rotura $H_b$ [m] [Losada (2009)]		0.0057	0.001
Reflexión $k_R$	Battjes (1974)	0.0443	0.0298
	Chesnutt (1978)	0.0345	0.0159
	Michie (1951)	0	0
	Baquerizo (1995)	0.0172	0.1156
Disipación $k_D$	Battjes (1974)	0.9990	0.0995
	Chesnutt (1978)	0.9994	0.9999
	Michie (1951)	1	1
	Baquerizo (1995)	0.9851	0.9933
Run-up $\bar{\eta}_\infty$ [m]	Román-Blanco (2004)	0.003	0.0118
	Nielsen y Kang (1996)	0.0027	0.0200
	Nielsen y Hanslow (1991)	0.0014	0.0055

CASO 01 – ESTUDIO EN PROFUNDIDAD

Tabla 4.3.1 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en profundidad. Caso 1

#### 4. Resultados

---

Por otra parte vemos como el Método de Baquerizo nos da un valor de reflexión mucho más alto que las otras tres formulaciones utilizadas, pero es que en este método se tienen en cuenta aspectos que los otros criterios no consideraban tales como el tipo de oleaje, que en nuestro caso es regular, como la frecuencia de muestreo de los sensores, o el calado del oleaje.

En cuanto a la altura de rotura, para la condición de oleaje medio más o menos se ajusta el modelo matemático y la formulación utilizada. Pero cuando pasamos a la condición de oleaje extremo, los dos valores obtenidos se separan.

**CASO 2**

El parámetro más importante para analizar ahora es la reflexión cuyo valor disminuye tanto del caso anterior a éste.

La presencia de un material poroso antes inexistente es la principal razón, la infiltración toma relevancia en el proceso de disipación de energía y provoca la disminución de la energía reflejada hacia el mar desde la línea de costa. Es el primer indicio que nos indica qué materiales son los más efectivos para disipar energía de una manera más eficaz.

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO</b>			
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m]</b>		<b>Run-up <math>\bar{\eta}_\infty</math> [m]</b>	
<i>Oleaje medio</i>	0.0020	<i>Oleaje medio</i>	0.0100
<i>Oleaje extremo</i>	0.0348	<i>Oleaje extremo</i>	0.0150

<b>PARÁMETROS CALCULADOS</b>			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
<b>Nº Iribarren en la rotura</b>		0.6867	0.3704
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m] [Losada (2009)]</b>		0.0053	0.001
<b>Reflexión</b> $k_R$	<b>Battjes (1974)</b>	0.0687	0.0370
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.0790	0.243
	<b>Michie (1951)</b>	0	0
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.0598	0.0636
<b>Disipación</b> $k_D$	<b>Battjes (1974)</b>	0.9976	0.9993
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.9969	0.9997
	<b>Michie (1951)</b>	1	1
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.9982	0.9979
<b>Run-up</b> $\bar{\eta}_\infty$ [m]	<b>Román-Blanco (2004)</b>	0.003	0.0118
	<b>Nielsen y Kang (1996)</b>	0.027	0.0105
	<b>Nielsen y Hanslow (1991)</b>	0.014	0.0055

Tabla 4.3.2 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en profundidad. Caso 2

En cuanto al run-up vemos que vuelve a ajustarse de una manera razonable para ambas condiciones de oleaje pero que vuelve a depender de nuevo criterio elegido, aunque los tres se mueven dentro de límites razonables.



**CASO 3**

Los números nos muestran esta vez que la disipación continúa permaneciendo como fenómeno predominante, y ésta además se ve reforzada con la presencia de las gravas gruesas que ahora componen el lecho marino como nos indica los valores respectivos de los coeficientes de reflexión en comparación con el caso anterior.

La conclusión es que un tamaño de grano mayor en el sedimento provoca una mayor pérdida de energía por disipación, disminuyendo así la cantidad de energía que es devuelta al mar mediante la reflexión.

CASO 03 – ESTUDIO EN PROFUNDIDAD

PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO			
Altura de rotura $H_b$ [m]		Run-up $\bar{\eta}_\infty$ [m]	
<i>Oleaje medio</i>	0.0048	<i>Oleaje medio</i>	0.022
<i>Oleaje extremo</i>	0.0511	<i>Oleaje extremo</i>	0.025

PARÁMETROS CALCULADOS			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
Nº Iribarren en la rotura		0.4432	0.3057
Altura de rotura $H_b$ [m] [Losada (2009)]		0.0053	
Reflexión $k_R$	Battjes (1974)	0.0443	0.0306
	Chesnutt (1978)	0.0345	0.0167
	Michie (1951)	0	0
	Baquerizo (1995)	0.1380	0.2113
Disipación $k_D$	Battjes (1974)	0.9990	0.9995
	Chesnutt (1978)	0.9994	0.9999
	Michie (1951)	1	1
	Baquerizo (1995)	0.9904	0.9774
Run-up $\bar{\eta}_\infty$ [m]	Román-Blanco (2004)	0.003	0.0118
	Nielsen y Kang (1996)	0.027	0.0105
	Nielsen y Hanslow (1991)	0.0014	0.0055

Tabla 4.3.3 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en profundidad. Caso 3

**CASO 4**

La reflexión vuelve a sufrir una disminución en valor para las dos condiciones de oleaje respecto al caso anterior, las dos capas de sedimento provocan un aumento de la infiltración por lo que la energía devuelta al mar es menor que en los casos anteriores. La disipación es el fenómeno predominante como hasta ahora tomando valores cercanos a la unidad.

Los valores del run-up vuelven a rondar el mismo valor numérico tanto en datos del modelo como de la formulación con la que lo estamos comparando

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO</b>			
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m]</b>		<b>Run-up <math>\bar{\eta}_\infty</math> [m]</b>	
<i>Oleaje medio</i>	0.0016	<i>Oleaje medio</i>	0.0253
<i>Oleaje extremo</i>	0.0345	<i>Oleaje extremo</i>	0.0348

<b>PARÁMETROS CALCULADOS</b>			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
<b>Nº Iribarren en la rotura</b>		0.7677	0.3720
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m] [Losada (2009)]</b>		0.0053	0.0010
<b>Reflexión</b> $k_R$	<b>Battjes (1974)</b>	0.0768	0.0372
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.0968	0.0245
	<b>Michie (1951)</b>	0	0
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.0587	0.0632
<b>Disipación</b> $k_D$	<b>Battjes (1974)</b>	0.9970	0.9993
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.9953	0.9997
	<b>Michie (1951)</b>	1	1
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.9983	0.9980
<b>Run-up</b> $\bar{\eta}_\infty$ [m]	<b>Román-Blanco (2004)</b>	0.003	0.0118
	<b>Nielsen y Kang (1996)</b>	0.027	0.0200
	<b>Nielsen y Hanslow (1991)</b>	0.0014	0.0055

Tabla 4.3.4 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en profundidad. Caso 4

### 4.3.4. Estudio en variabilidad transversal. Condición de oleaje media

En este apartado nos centraremos en una disposición del sedimento variable en la dirección transversal. Aquí estudiaremos aisladamente este aspecto y por lo tanto no variaremos de un caso a otro las capas porosas en profundidad, únicamente dispondremos una capa de 1m de espesor dividida en seis partes iguales en donde iremos alternando el material poroso.

#### CASOS 1 y 2

En estos dos primeros casos la alternancia de materiales se dará entre grava fina y grava gruesa. Esto se ha hecho así porque es interesante alternar sobre todo el material poroso de la zona donde la ola desaparece para ver cómo afecta el sedimento presente en la zona de rotura de la ola. En el caso 1 el perfil comenzará con gravas gruesas en su lecho, pasando éstas a ser grava fina en el caso 2, y a partir de este primer material, el sedimento se irá alternando como ya se comentó.

#### Superficie libre

Ante la variación transversal de sedimento, los fenómenos hidrodinámicos presentes son los mismos que en el caso del estudio en profundidad. El asomeramiento es el fenómeno que domina la interacción oleaje-playa, por lo que ola va perdiendo progresivamente altura y ganando peralte. Aunque ahora la infiltración va a actuar desde este primer caso al tener material poroso dispuesto en el lecho marino.

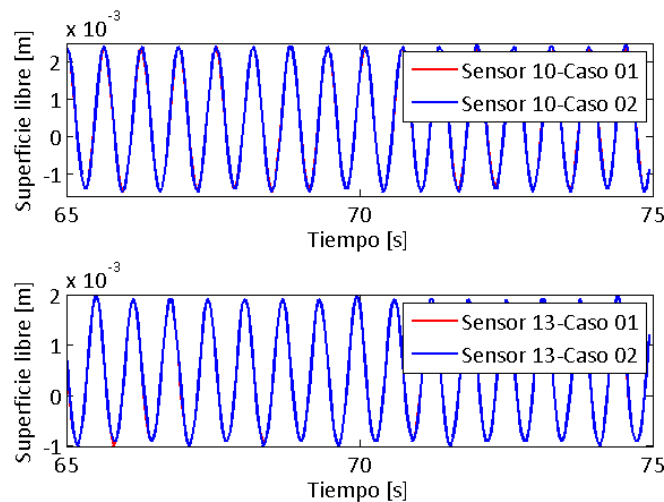


Figura 4.3.24 Evolución de superficie libre. Casos 1 y 2. Sensores 10 y 13

En la imagen se han superpuesto los casos 1 y 2 sobre dos gráficas distintas. En cada gráfica se representa un sensor diferente, pero el mismo para ambos casos. Se puede ver que los sensores escogidos han sido los número 10 (situado sobre grava

gruesa en el caso 1 y sobre grava fina en el caso 2), 13 (situado sobre grava fina en el caso 1 y sobre grava gruesa en el caso 2) y los número 16 y 17 (situados sobre grava fina en el caso 1 y sobre grava gruesa en el caso 2, respectivamente).

El porqué de la elección de estos sensores se debe a que, como se observa con el sensor 10, para ambos casos la evolución de la ola se superpone, no se distingue la medición del sensor para el primer caso, de la medición del mismo sensor para el segundo caso. Aunque la ola va sintiendo el fondo, no nota o percibe hasta una cierta profundidad el tipo de material que compone el lecho marino, es decir, que a esas profundidades afecta más la reducción del fondo que el material que compone ese fondo en sí.

Lo anterior no ocurre para el caso del sensor 16 y 17 cuando la ola ya está más cercana a romper. Los registros de superficie libre se separan en esta ocasión mostrando unos valores registrados más altos para el caso 1 donde el sedimento es de grava fina. Por lo que se pone de manifiesto los resultados anteriores, la ola que tiene ahora más cerca el fondo de sí misma, es influenciada de manera mucho más clara y directa por el material que compone el lecho de playa, la grava gruesa disipa más energía que la grava fina para una misma porosidad de sedimento.

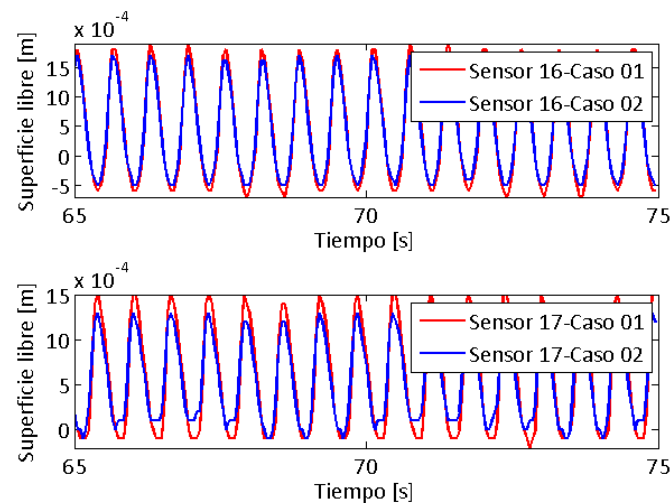


Figura 4.3.25 Evolución de superficie libre. Casos 1 y 2. Sensores 16 y 17

### **Velocidad horizontal y vertical**

En la representación de velocidades mostramos ahora la evolución en el sensor y 17 cercano a la zona de rotura de la ola, ya que como ocurría antes en sensores tempranos el registro de superficie libre se superpone.

Coherente a los resultados de la superficie libre, la velocidad volverá a ser menor en el caso 2 (donde el sedimento es de grava gruesa) en los dos sensores, haciéndose más significativa esta diferencia en el sensor 17 al ser este posterior. La mayor disipación de energía que induce esta grava gruesa es evidente.

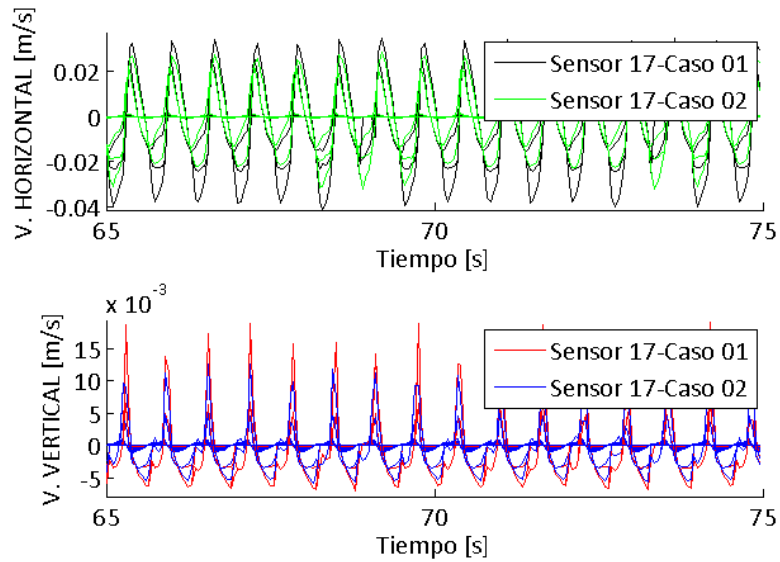


Figura 4.3.26 Evolución de la velocidad. Casos 1 y 2. Sensor 17

### **CASOS 3, 4 y 5**

Los últimos tres casos del estudio en variabilidad transversal, se diferencian de los dos primeros en que incorporan otro material más en su alternancia, la arena. Es preciso recordar que dentro de nuestro modelo IH-2VOF, esta arena será representada como un obstáculo impermeable debido a la baja porosidad de ésta.

De los tres casos, como ocurría en los dos primeros, únicamente habrá presencia de una sola capa de sedimento que se ha dividida en 6 partes iguales. La secuencia de materiales que se seguirá será la siguiente (siempre en el mismo orden): arena (obstáculo impermeable), grava fina y grava gruesa.

En el caso 3 el perfil de playa comenzará por arena, en el 4 por grava gruesa, y en el 5 por grava fina. Con ello se conseguirá que en la zona de rompiente en cada caso haya un material distinto pues será la zona que mayor interés tenga en su observación ya que como pusieron en relieve los dos primeros casos, es donde la ola nota realmente el material del que está compuesto el lecho.

### **Superficie libre**

Comencemos con la comparación del caso 3 y 4. Los primeros sensores elegidos son: sensor 11 (sobre arena en el caso 3 y sobre grava gruesa en el caso 4) y el sensor 15 (sobre grava fina en el caso 3 y sobre arena en el caso 4).

Para el sensor 11 en el caso 4 con grava gruesa el que registra menor superficie libre, pero esta inferioridad se invierte en el sensor 15 donde ahora en el caso 4 la ola está sobre arena y en el 3 sobre grava fina. Con esto vemos que la disipación de energía de una manera más rápida o más lenta se va alternando conforme se suceden capas de sedimento que disipan más rápida o lentamente a la energía, respectivamente. Es decir, cuando la ola atraviesa la zona de grava, la disipación de energía comienza de manera inmediata, de la misma forma que esa disipación de energía se frena cuando entra en la arena de la que ya se había constatado que no era tan agresiva en la destrucción de la ola. Esto se intuía pero no se ponía de manifiesto de una forma tan clara en los dos casos anteriores donde la arena no tenía presencia en la capa de sedimento.

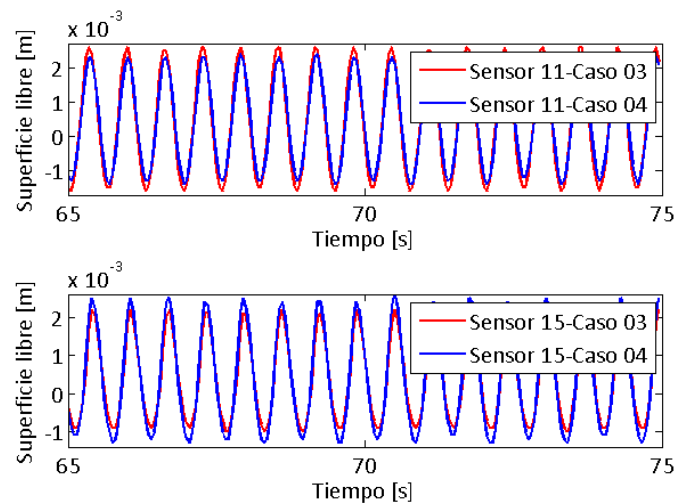


Figura 4.3.27 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensores 11 y 15

Como muestra la figura inferior, el proceso explicado se reafirma. Se muestra ahora los sensores 16 y 17 (sobre grava fina en el caso 3 y sobre arena en el caso 4). Como es visible, la destrucción de la ola para el caso 3 en el que el lecho es de grava fina se acelera mientras que para el caso 4 donde tenemos arena bajo los sensores, esa destrucción de energía es más moderada.

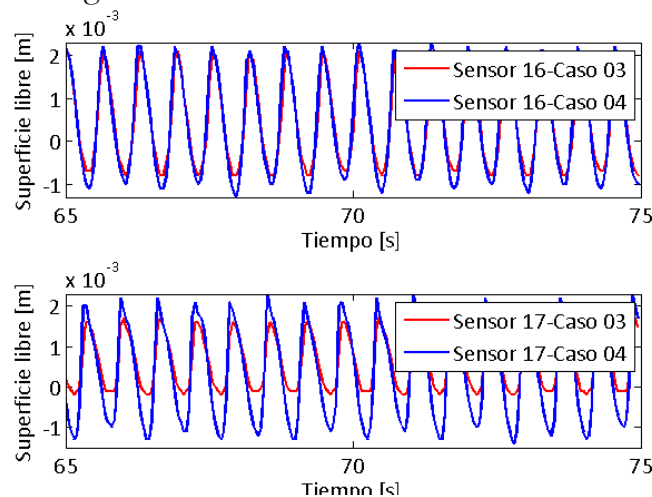


Figura 4.3.28 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensores 16 y 17

#### 4. Resultados

Justo en el apartado anterior para los casos 1 y 2 se mostraba como en el sensor 11, los registros coincidían, pero en este caso, en el sensor 10 sí que observa diferencia. Ello nos muestra que la ola ha sido más sensible ahora a la presencia de materiales que en el fondo que disipen menos energía que frente a la contraposición de grava fina y grava gruesa del caso anterior.

Si introducimos ahora el caso 5, vemos que los resultados encajan con todo lo expresado en los casos 3 y 4. Sobre este último caso, bajo el sensor 11 se encuentran situadas gravas finas, y sobre los sensores 15, 16 y 17 gravas gruesas. Observando la figura inferior donde se muestran los tres casos, para el sensor 11, vemos que la altura de ola sigue el siguiente orden (de mayor a menor altura de ola): su mayor valor se da para el caso 3 (sensor bajo arena), le sigue el caso 5 (sensor bajo grava fina) y finalmente se registra el caso 4 (sensor bajo grava gruesa).

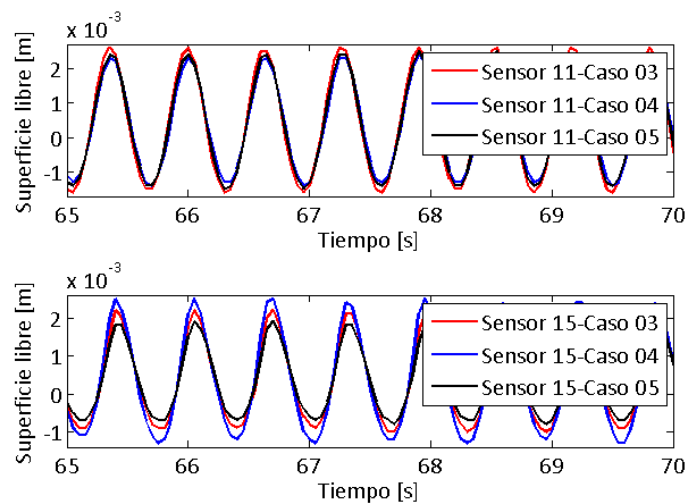


Figura 4.3.29 Evolución de superficie libre. Casos 3, 4 y 5. Sensores 11 y 15

Como se vio en la comparación de los casos 3 y 4, tras avanzar la ola y cambiar de sedimento en el lecho de la playa, en el sensor 15 se invierten las lecturas anteriores. Ahora el mayor valor de altura de ola se registra en el caso 4 que ha frenado la destrucción de energía al estar bajo arena, pasando a ser el caso 5 en el sensor 15, bajo grava gruesa, el que posee el mínimo valor de superficie libre.

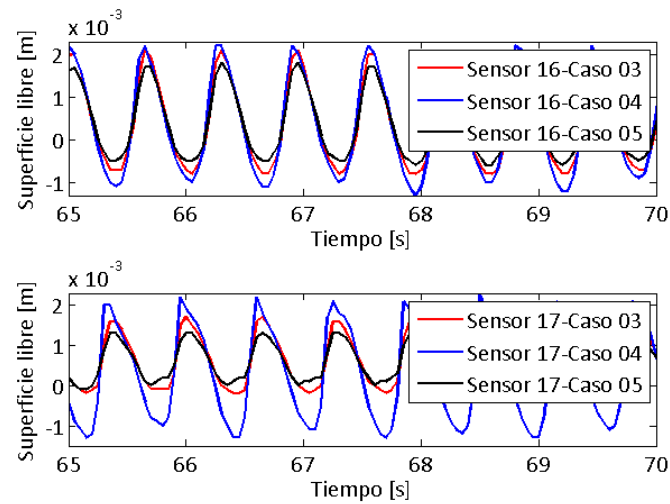


Figura 4.3.30 Evolución de superficie libre. Casos 3, 4 y 5. Sensores 16 y 17

Todo ello confirma los resultados y conclusiones que se han ido observando y deduciendo a lo largo del análisis de los casos anteriores hasta este punto. Un sedimento de mayor tamaño de grano, bajo una misma porosidad de material, contribuye indudablemente a una mayor disipación de la energía transportada por la ola.

#### **Velocidad horizontal y vertical**

Las velocidades no muestran ningún valor discordante respecto a los registros de superficie libre tal y como ocurre en todos los casos precedentes vistos hasta ahora.

Ésta sufre la misma evolución que la superficie libre. Cuando estamos bajo una grava gruesa, los valores registrados son menores al haber sufrido una disipación mayor.



### 4.3.5. Estudio en variabilidad transversal. Condición de oleaje extrema

#### CASOS 1 y 2

#### Superficie libre

Sometidos los dos primeros casos de estudio de la variabilidad transversal del sedimento a lo largo del perfil de playa a una condición de oleaje extrema, lo primero que llama la atención es, que como ocurría para el caso de condición de oleaje medio, conforme se acerca la ola a la línea de costa los registros de superficie libre para ambos casos se van distanciando según los sensores se acercan a la línea de costa.

Como muestra la figura inferior, se repite que es el caso 2 quien bajo el sensor 17 tiene dispuesta grava gruesa quien obtiene un menor registro de superficie libre, al haber concluido ya que ésta disipa más intensamente la energía transportada por la ola. Pero ocurre que este distanciamiento entre ambos casos en el registro de superficie libre ahora es mucho menor. Se deduce por tanto que esa disipación de energía lógicamente es pequeña ante un cambio transversal donde la capa de grava gruesa ocupa unos metros y luego se intercambia por grava fina. Antes era más perceptible porque bajo condición de oleaje media, la energía transportada por el oleaje era mucho menor y una disipación pequeña de energía era mucho más notoria, en contrapartida ahora la energía del oleaje es netamente superior y una disipación pequeña de la misma es más imperceptible.

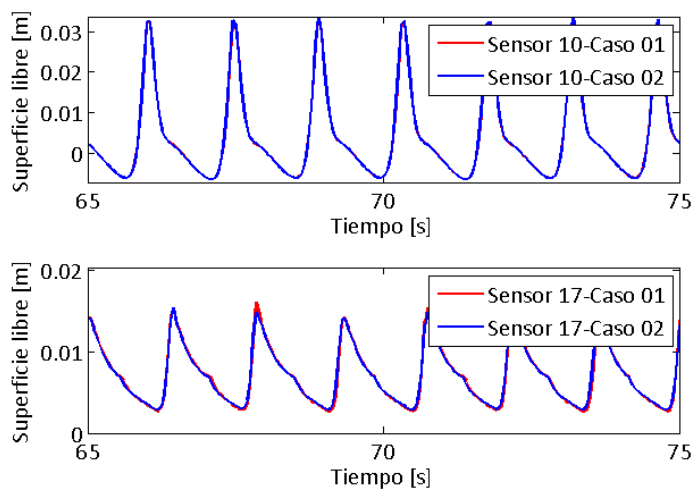


Figura 4.3.31 Evolución de superficie libre. Casos 1 y 2. Sensores 10 y 17

### Velocidad horizontal y vertical

La velocidad, al obtener registros similares de superficie libre y al haber aclarado que la disipación de energía es pequeña, tampoco va a observar grandes diferencias como se observan en las figuras superiores y los registros de diferentes sensores para ambos casos se irán superponiendo en valor.

### CASOS 3, 4 y 5

#### **Superficie libre**

Para contrastar en un primer momento los casos caso 3 y 4. Los sensores elegidos son los mismos que cuando comparamos la condición de oleaje media: sensor 11 (sobre arena en el caso 3 y sobre grava gruesa en el caso 4) y el sensor 15 (sobre grava fina en el caso 3 y sobre arena en el caso 4).

La gráfica inferior muestra como la arena del sensor 11 para el caso 3 registra una mayor altura de ola. Debajo el sensor 15 refleja unos valores de superficie libre para el caso 4 que es en el que ahora la ola está atravesando un lecho de arenas. La grava vuelve ser el elemento dominante en la disipación de energía, el asomeramiento más acusado bajo este tipo de sedimento junto con una mayor infiltración en gravas que respecto a la arena, provocan ese descenso de la altura de ola.

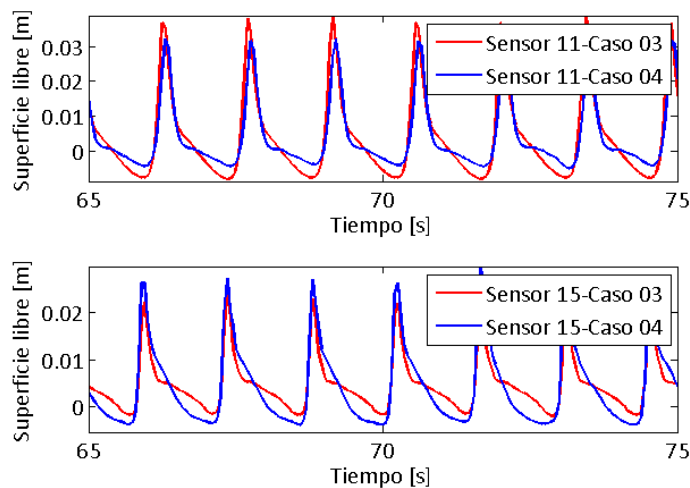


Figura 4.3.32 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensores 11 y 15

En la figura inferior finalmente se muestran los datos de los sensores 16 y 17 para los mismos casos de los que hablábamos, el 3 y 4 (ambos sensores colocados sobre grava fina y arena respectivamente en los dos casos). Estos dos sensores, en un punto del perfil de playa donde la ola ya está sufriendo la rotura, muestran como la grava fina del caso 3 colabora con una destrucción más rápida de la ola manteniéndose el registro de la superficie libre en los dos sensores por debajo de los datos aportados por el sensor 3.

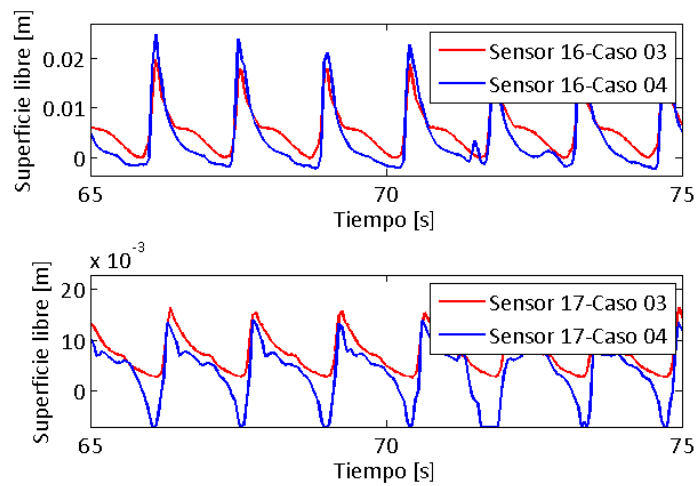


Figura 4.3.33 Evolución de superficie libre. Casos 3 y 4. Sensores 16 y 17

Presentando ahora el caso 5 ahora, que recordemos que bajo el sensor 11 se encuentran situadas gravas finas, y sobre los sensores 15, 16 y 17 gravas gruesas, vemos que ocurre la misma graduación en los registros de superficie libre para los tres casos y para los tres sensores: mayor registro bajo arenas, seguido de gravas finas y por último las gravas gruesas. Atendiendo a lo anterior, los registros van cambiando el orden según el material sobre el que avance la ola en el sensor correspondiente como puede observarse en las gráficas inferiores donde se muestran los tres casos simultáneamente.

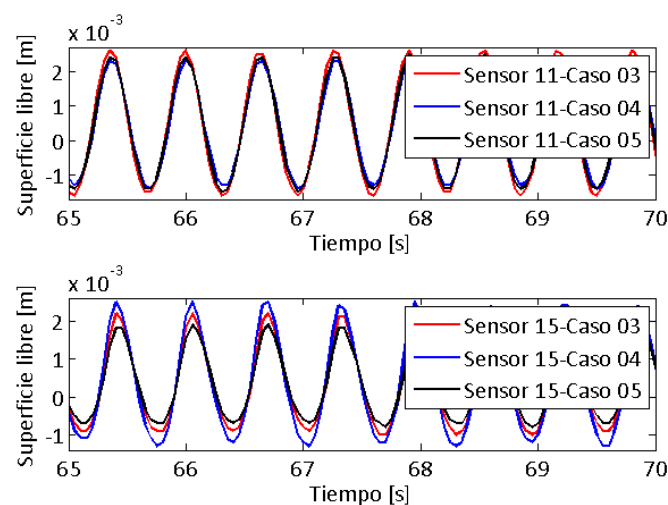


Figura 4.3.34 Evolución de superficie libre. Casos 3, 4 y 5. Sensores 11 y 15

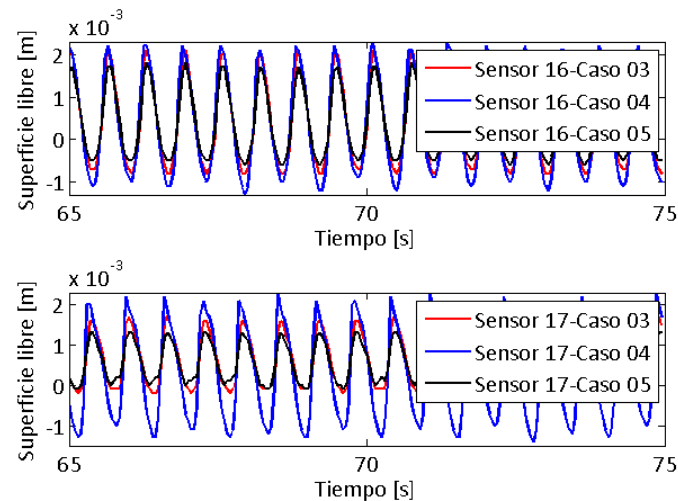


Figura 4.3.35 Evolución de superficie libre. Casos 3, 4 y 5. Sensores 16 y 17

#### 4.3.6. Estudio en variabilidad transversal. Parámetros de la hidrodinámica

El análisis de los mismos parámetros estudiados en el caso del estudio en profundidad del sedimento se realiza ahora para la variabilidad transversal del mismo. Las conclusiones, apartándonos de los valores concretos de cada parámetro para cada caso, son las mismas como puede observarse en las siguientes cinco tablas para los cinco casos estudiados, tanto bajo la condición media de oleaje como la condición extrema.

Vuelve a observarse que la reflexión es un fenómeno menor y que el fenómeno que gobierna es la disipación de energía mediante efectos tales como la filtración, tomando a su vez valores más elevados bajo la condición de oleaje extrema, algo coherente ya que ésta transporta una cantidad de energía de oleaje mayor. En lo que ese refiere al run-up, vemos como disminuye en cuanto la porosidad del sedimento que compone el lecho aumenta.

**CASO 1**

CASO 1 – ESTUDIO VARIABILIDAD TRANSVERSAL

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO</b>			
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m]</b>		<b>Run-up <math>\bar{\eta}_\infty</math> [m]</b>	
<i>Oleaje medio</i>	0.0019	<i>Oleaje medio</i>	0.0214
<i>Oleaje extremo</i>	0.0339	<i>Oleaje extremo</i>	0.0263

<b>PARÁMETROS CALCULADOS</b>			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
<b>Nº Iribarren en la rotura</b>		0.7045	0.3715
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m] [Losada (2009)]</b>		0.0057	0.0033
<b>Reflexión</b> $k_R$	<b>Battjes (1974)</b>	0.0705	0.0371
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.0828	0.0245
	<b>Michie (1951)</b>	0	0
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.0595	0.0629
<b>Disipación</b> $k_D$	<b>Battjes (1974)</b>	0.9975	0.9993
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.9966	0.9997
	<b>Michie (1951)</b>	1	1
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.9982	0.9980
<b>Run-up</b> $\bar{\eta}_\infty$ [m]	<b>Román-Blanco (2004)</b>	0.0030	0.0118
	<b>Nielsen y Kang (1996)</b>	0.0027	0.0200
	<b>Nielsen y Hanslow (1991)</b>	0.0014	0.0055

Tabla 4.3.5 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 1

**CASO 2**

CASO 2 – ESTUDIO VARIABILIDAD TRANSVERSAL

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO</b>			
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m]</b>		<b>Run-up <math>\bar{\eta}_\infty</math> [m]</b>	
<i>Oleaje medio</i>	0.0018	<i>Oleaje medio</i>	0.0200
<i>Oleaje extremo</i>	0.0343	<i>Oleaje extremo</i>	0.0214

<b>PARÁMETROS CALCULADOS</b>			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
<b>Nº Iribarren en la rotura</b>		0.7748	0.3715
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m] [Losada (2009)]</b>		0.0112	0.0030
<b>Reflexión</b> $k_R$	<b>Battjes (1974)</b>	0.0745	0.0371
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.0916	0.0245
	<b>Michie (1951)</b>	0	0
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.0590	0.0636
<b>Disipación</b> $k_D$	<b>Battjes (1974)</b>	0.9972	0.9993
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.9958	0.9997
	<b>Michie (1951)</b>	1	1
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.9983	0.9979
<b>Run-up</b> $\bar{\eta}_\infty$ [m]	<b>Román-Blanco (2004)</b>	0.0030	0.0118
	<b>Nielsen y Kang (1996)</b>	0.0027	0.0200
	<b>Nielsen y Hanslow (1991)</b>	0.0014	0.0055

Tabla 4.3.6 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 2

**CASO 3**

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO</b>			
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m]</b>		<b>Run-up <math>\bar{\eta}_\infty</math> [m]</b>	
<i>Oleaje medio</i>	0.0021	<i>Oleaje medio</i>	0.022
<i>Oleaje extremo</i>	0.0381	<i>Oleaje extremo</i>	0.0253

<b>PARÁMETROS CALCULADOS</b>			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
<b>Nº Iribarren en la rotura</b>		0.6701	0.3583
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m] [Losada (2009)]</b>		0.0112	0.0033
<b>Reflexión</b> $k_R$	<b>Battjes (1974)</b>	0.0670	0.0358
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.0755	0.0228
	<b>Michie (1951)</b>	0	0
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.0622	0.0661
<b>Disipación</b> $k_D$	<b>Battjes (1974)</b>	0.9978	0.9994
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.9971	0.9997
	<b>Michie (1951)</b>	1	1
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.9980	0.9978
<b>Run-up</b> $\bar{\eta}_\infty$ [m]	<b>Román-Blanco (2004)</b>	0.0030	0.0118
	<b>Nielsen y Kang (1996)</b>	0.0027	0.0200
	<b>Nielsen y Hanslow (1991)</b>	0.0014	0.0055

Tabla 4.3.7 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 3

**CASO 4**

CASO 4 – ESTUDIO VARIABILIDAD TRANSVERSAL

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO</b>			
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m]</b>		<b>Run-up <math>\bar{\eta}_\infty</math> [m]</b>	
<i>Oleaje medio</i>	0.0025	<i>Oleaje medio</i>	0.0025
<i>Oleaje extremo</i>	0.0363	<i>Oleaje extremo</i>	0.0214

<b>PARÁMETROS CALCULADOS</b>			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
<b>Nº Iribarren en la rotura</b>		0.6142	0.3627
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m] [Losada (2009)]</b>		0.0057	0.0033
<b>Reflexión</b> $k_R$	<b>Battjes (1974)</b>	0.0614	0.0363
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.0642	0.0234
	<b>Michie (1951)</b>	0	0
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.0644	0.0668
<b>Disipación</b> $k_D$	<b>Battjes (1974)</b>	0.9981	0.9993
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.9977	0.9997
	<b>Michie (1951)</b>	1	1
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.9979	0.9977
<b>Run-up</b> $\bar{\eta}_\infty$ [m]	<b>Román-Blanco (2004)</b>	0.0030	0.0118
	<b>Nielsen y Kang (1996)</b>	0.0027	0.0200
	<b>Nielsen y Hanslow (1991)</b>	0.0014	0.0055

Tabla 4.3.8 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 4



**CASO 5**

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO</b>			
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m]</b>		<b>Run-up <math>\bar{\eta}_\infty</math> [m]</b>	
<i>Oleaje medio</i>	0.0023	<i>Oleaje medio</i>	0.0035
<i>Oleaje extremo</i>	0.0312	<i>Oleaje extremo</i>	0.0100

<b>PARÁMETROS CALCULADOS</b>			
		<i>Oleaje medio</i>	<i>Oleaje extremo</i>
<b>Nº Iribarren en la rotura</b>		0.6403	0.3912
<b>Altura de rotura <math>H_b</math> [m] [Losada (2009)]</b>		0.0057	0.0033
<b>Reflexión</b> $k_R$	<b>Battjes (1974)</b>	0.0640	0.0391
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.0694	0.0271
	<b>Michie (1951)</b>	0	0
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.0437	0.0683
<b>Disipación</b> $k_D$	<b>Battjes (1974)</b>	0.9979	0.9992
	<b>Chesnutt (1978)</b>	0.9976	0.9996
	<b>Michie (1951)</b>	1	1
	<b>Baquerizo (1995)</b>	0.9990	0.9977
<b>Run-up</b> $\bar{\eta}_\infty$ [m]	<b>Román-Blanco (2004)</b>	0.003	0.0118
	<b>Nielsen y Kang (1996)</b>	0.0027	0.0200
	<b>Nielsen y Hanslow (1991)</b>	0.0014	0.0055

Tabla 4.3.9 Parámetros de la hidrodinámica. Estudio en variabilidad transversal. Caso 5



# Capítulo 5

## Conclusiones

El proyecto ha centrado su objetivo en la falta de conocimiento actual del comportamiento de las playas heterogéneas. Tomando como objetivo de estudio el caso concreto de Playa Granada (Motril), haciendo un análisis de su situación actual mediante la observación junto con campañas de campo que mostrasen el estado actual de la playa, se ha formado toda una base que ha permitido recoger un conjunto de datos que son los que han permitido reproducir las condiciones reales de la playa, haciendo de esta forma unas simulaciones como si fueran ensayos reales a pequeña escala en un canal de oleaje.

El objetivo principal era observar los resultados obtenidos de estas simulaciones a través de un modelo matemático validado. Observando del análisis de los datos arrojados distintos comportamientos que tiene en oleaje sobre la playa dependiendo del tipo de sedimento que conforme en lecho de ésta. Analizándose por separado y conjuntamente, cambiando su variación en profundidad y transversalmente para poder determinar también así cómo afecta la colocación de este sedimento según su tamaño de grano a la evolución del oleaje.

Con todo lo anterior, mediante el análisis de los datos obtenidos, se concluye que los tres principales puntos de análisis de los resultados son:

- Los fenómenos hidrodinámicos fundamentales observados del análisis de los resultados del modelo son: la reflexión en estas playas, aunque presente no constituye un elemento fundamental dentro de los principales procesos que disipan la energía que transporta el oleaje. Ello se suponía mediante un fundamento de base teórica y que ha sido respaldado mediante el cálculo del coeficiente de reflexión para cada caso.
- El asomeramiento en el fenómeno principal que afecta al oleaje, la reducción de la profundidad conforme se avanza a la línea de costa es clave para una transformación de la ola que va afectar principalmente a una geometría que llegará un punto en la que alcance valores muy inestables.
- Otro factor igualmente importante y donde quizá se ha querido poner el punto de mira en este proyecto, es la variación del tamaño de sedimento. Se ha visto que no actúa de la misma forma sobre el oleaje un tamaño de grano u otro. En líneas generales se ha detectado que a mayor tamaño de sedimento, la infiltración refuerza su papel en la destrucción de energía que transporta el oleaje, que contribuye a una destrucción más rápida del mismo provocando una disipación mayor y una desestabilización más temprana de la geometría de la ola, que como todo conlleva a una destrucción del oleaje de forma más rápida.

Esto provoca que ante ciertas medidas de actuación en playas si se tiene, por ejemplo, un oleaje de un gran contenido energético sobre el que se quiere actuar, teniendo un conocimiento profundo de cómo actúan estos tamaños de sedimentos se podrían tomar soluciones que no constituyesen algo temporal, si no de las que se obtendría un alto rendimiento tanto medioambiental como económico en caso de llevarse a cabo su realización.

Por ello, principalmente lo que se persigue, es un conocimiento amplio y certero en cómo influyen de una manera lo más exacta posible la distribución del sedimento. Cómo afecta que un tamaño mayor se encuentre más cercano a la superficie o a la línea de costa. Los puntos expuestos anteriormente ya han mostrado ciertos “patrones de conducta” que hacer prever que ese conocimiento puede ser perfectamente alcanzable en el caso de continuar de forma activa con la investigación de este campo. Y es aquí donde entran en juego las líneas de investigación futura que se exponen a continuación.

Además es significativo señalar por su especial importancia, que lo analizado en el presente proyecto puede constituir una poderosa herramienta en la gestión de costas. Y es que de la observación de cada caso por separado puede establecerse, de los perfiles ejecutados sobre el modelo matemático IH-2VOF, cuál de ellos provoca una mayor disipación de la energía transportada por el oleaje incidente a la costa. Ello puede deducirse de aquellos casos que muestren un menor valor de su coeficiente de reflexión. Todo ello significa que puede encontrarse un caso específico en el que llegue menos contenido energético a la costa, y con ello, por lo tanto una configuración de perfil de playa que reduzca la erosión que sufra la misma. Siendo esto último la motivación que justifica el estudio de este trabajo, pues la erosión es una de las principales afecciones que actualmente padece la zona de estudio que ha sido nuestro prototipo de referencia, a lo largo del desarrollo de todo el presente proyecto fin de carrera. En nuestros casos, particularmente nos encontramos que los perfiles que disipan más energía son:

- Aquellos en los que el alcance de un medio poroso en profundidad es mayor.
- Aquellos en los que su lecho marino está compuesto por un tamaño de sedimento mayor en superficie destruye energía de una manera más significativa que un tamaño de grano menor.

## Capítulo 6

### Líneas de investigación futura

El presente proyecto fin de carrera, como proyecto que forma una parte que contribuye al Proyecto de Investigación Fundamental no orientada *Morfodinámica de playas heterogéneas en el litoral andaluz del mar de Alborán*, ha sentado las bases para la continuación en la investigación de las playas heterogéneas a pequeña escala dentro de un canal de oleaje.

Como se ha justificado a lo largo del proyecto, el modelo matemático, como se ha dicho antes, ha mostrado ciertos “patrones de conducta” de dichas playas, no mostrando en principio resultados que nos indicasen que la ejecución de esos ensayos de laboratorio no tendrían ningún tipo de valor que contribuyesen a mejorar el campo del conocimiento sobre las playas heterogéneas. Es decir, que si bajo el uso del modelo matemático IH-2VOF (cuya validez ya ha sido contrastada para la propagación del oleaje y análisis del flujo a lo largo de medios porosos), en una primera instancia no da razones que muestren que esos ensayos a pequeña escala no aportarían datos de interés para el avance del conocimiento en el campo de las playas heterogéneas, esto constituye un pilar base que viene a reforzar todos los motivos que razonaban el objetivo bajo el cual se ha realizado el presente proyecto.

Problemas como los que afectan actualmente a Playa Granada, frente a los cuales actualmente no se les ha encontrado solución debido al desconocimiento existente en el comportamiento hidrodinámico de estas playas, y sobre los cuales únicamente se aplican unas soluciones temporales que implican un gran desembolso económico, serían altamente beneficiados mediante el apoyo a la investigación de estas playas que como ya se dijo están altamente presentes en las costas de todo el mundo. Es por ello que se propone principalmente la elaboración de ensayos de laboratorio reales a pequeña escala en los que se reproduzca el perfil de playa de Playa Granada que permitan la medición de datos. Con ello se podrá realizar un análisis comparando directamente con Playa Granada y ello constituiría una información fundamental a partir de la cual y según los resultados obtenidos permitirían ver hacia qué punto debería evolucionar la investigación.



# Apéndice





# Apéndice A

## Formulación matemática del IH-2VOF

El software del modelo numérico IH-2VOF desarrollado por la universidad de Cantabria se encarga de resolver en dos dimensiones las ecuaciones de Navier-Stokes. Este modelo permite ver la interacción de medios porosos con un determinado oleaje proporcionando información como la presión a la que está sometida, en run-up de una playa, velocidades, turbulencia, etc.

El valor del uso de este modelo viene dado debido a que integra un módulo denominado CORAL que permite establecer la geometría del medio que quiere ser ensayado, es por ello que nos va a ser posible reproducir las condiciones tal y como se dan en el canal de oleaje.

### Flujo fuera del medio poroso: “The Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations”

Las ecuaciones que rigen el dominio del fluido son las Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), que resultan por el modelo en dos dimensiones. En un flujo turbulento, la velocidad instantánea y el campo de presiones quedan definidas como la suma de dos partes: el promedio de las mismas ( $\bar{u}_i$  y  $\bar{p}$ ) y la velocidad de la turbulencia y fluctuación de presión respectivamente ( $u'_i$  y  $p'$ ):

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, p = \bar{p} + p'$$

Donde  $i = 1,2$  para flujo bidimensional.

Aplicando la descomposición anterior a las ecuaciones de Navier-Stokes y asumiendo fluido incompresible, las ecuaciones RANS se derivan como siguen:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = \bar{u}_j * \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} * \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j}$$

Siendo  $\rho$  la densidad del fluido,  $g_i$  la componente  $i$  de la aceleración de la gravedad y  $\overline{\partial\tau_{ij}}$  la media de tensor de carga viscosa que para un fluido Newtoniano es:

$$\overline{\partial\tau_{ij}} = 2\mu\overline{\sigma_{ij}}$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad molecular y

$$\overline{\sigma_{ij}} = \frac{1}{2} * \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

el tensor de tensión del flujo principal.

Finalmente contamos con:

$$R_{ij} = \rho * \overline{u'_i u'_j}$$

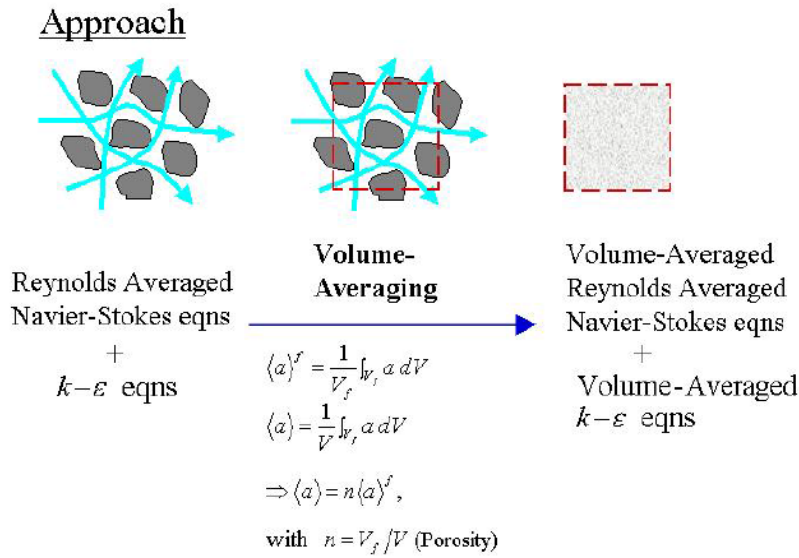
Que representa la influencia de la fluctuación de la turbulencia en el flujo principal requiere una hipótesis de cierre. En el modelo de IH-2VOF, se supone que el tensor de tensiones de Reynolds está relacionado con la velocidad de deformación del flujo principal a través del modelo algebraico no lineal  $k - \epsilon$  (Shih et al., 1996; Lin y Liu, 1998), no se encuentra desarrollado aquí.

### Ecuaciones que gobiernan el flujo en el medio poroso Volume-

#### Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS) equations

La principal asunción del modelo IH-2VOF consiste en considerar las ecuaciones RANS acopladas a un adecuado modelo de turbulencia, ya explicado, que pueda describir adecuadamente el campo del flujo en el medio poroso. Dada la compleja estructura del material poroso, la resolución directa del campo de flujo no es posible aún. Por ello, para hacer más fácil el modelado de la interacción del fluido/material poroso, se aplica un proceso de promedio a un volumen tanto a las ecuaciones RANS como al modelo  $k - \epsilon$ .

El flujo del medio poroso en el modelo IH-2VOF se obtiene a través de la resolución de las ecuaciones Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS). Ecuaciones que son derivadas de la integración de las ecuaciones RANS en un volumen de control. El tamaño medio del volumen de control elegido es mucho más largo que el tamaño característico del tamaño de poro (escala microscópica) pero mucho más pequeña que la longitud de escala del flujo, p.e. la escala de la variación espacial de las variables físicas en el dominio del fluido (escala macroscópica). Ver Figura 1.



El proceso matemático de un promedio de volumen “a” está definido por la siguiente expresión:

$$\langle a \rangle = \frac{1}{V_f} * \int_{V_f} a dV$$

Donde “ $\langle \ \rangle$ ” indica el promedio de volumen,  $V$  es el promedio de volumen total,  $V_f$  es el volumen en  $V$  el cual es ocupado por la fase del fluido y  $\langle a \rangle$  es la magnitud media. El operador intrínseco definido por la ecuación (20) puede ser unido al operador de promedio de volumen de Darcy definido como:

$$\langle a \rangle_D = \frac{1}{V_f} * \int_{V_f} a dV$$

A través de la relación:

$$\langle a \rangle_D = n * \langle a \rangle$$

Donde

$$n = \frac{V_f}{V}$$

Es la porosidad que por simplicidad se asume constante dentro del modelo. En términos de velocidad,  $\langle a \rangle_D$  sería la velocidad de descarga y  $\langle a \rangle$  la velocidad de filtración.

Para cuantificar el flujo en el medio poroso, el número de Reynolds del poro se define como:

$$Re_p = \frac{D_{50} * |U|}{\nu}$$

Donde  $D_{50}$  es el diámetro medio equivalente del material poroso,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $|U|$  es la velocidad típica alrededor del poro.

Las ecuaciones VARANS son obtenidas aplicando el promedio de volumen a las ecuaciones RANS. El conjunto de la velocidad promedio de las ecuaciones RANS se asume expresado por:

$$\bar{u}_i = \langle \bar{u}_i \rangle + \bar{u}_i''$$

Donde  $\langle \bar{u}_i \rangle$  es la velocidad del conjunto del volumen promedio, y  $\bar{u}_i''$  es la fluctuación de la velocidad respecto al volumen promedio.

Aplicando esta descomposición en las ecuaciones de continuidad y de conservación de la cantidad de movimiento, se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle \bar{u}_i' \bar{u}_j' \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} * \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + g_i + \frac{1}{\rho} * \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle \bar{u}_i'' \bar{u}_j'' \rangle}{\partial x_j} \\ &+ \frac{1}{V_f} * \int_{A_{int}} \left[ -\bar{u}_i' \bar{u}_j' - \frac{\bar{p}}{\rho} * \delta_{ij} + \frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho} \right] n_j dA \end{aligned}$$

$A_{int}$  es la interfase entre el sólido-fluido y  $n_j$  es la  $j$  – *ésima* componente del vector unitario normal a la fase sólida del fluido. El último término de la ecuación, simboliza el salto en la interfase y representa la relación de transferencia de movimiento entre la fase líquida y el esqueleto sólido. Este término es fundamental para modelizar el flujo en el medio poroso.

El término anterior en la ecuación es la tensión residual debida al volumen promediado: este resulta del volumen promedio del término convectivo  $\bar{u}_i \bar{u}_j$  como:

$$\langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle = \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle + \langle \bar{u}_i'' \bar{u}_j'' \rangle$$

Dentro del medio poroso, estos dos últimos términos se modelizan utilizando las ecuaciones descriptoras del flujo en el medio poroso desarrolladas por Forchheimer; incluyendo los efectos fluctuantes:

$$-\frac{\partial \langle \bar{u}_i'' \bar{u}_j'' \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} * \int_{A_{int}} \left[ -u_i' u_j' - \frac{\bar{p}}{\rho} * \delta_{ij} + \frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho} \right] n_j dA =$$

$$-\left[ \frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 * D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle + \frac{\beta (1-n)}{n D_{50}} \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2} * \langle \bar{u}_i \rangle + c_A \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} \right]$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los coeficientes experimentales basados en [Van Gent \(1995\)](#), asociados a la linealidad y no linealidad de las fuerzas resistivas. El tercer término representa los efectos inerciales, siendo  $c_A$  el coeficiente de masa añadida. La descripción precisa de estos tres parámetros son está comprendida totalmente en la actualidad, en principio dichos parámetros dependen del número de Reynolds poroso y de las direcciones del flujo.

Tanto  $\alpha$  como  $\beta$ , pueden ser expresados en términos del diámetro nominal de las partículas  $D_{50}$  y de la porosidad  $n$  como muestran las siguientes expresiones:

$$\alpha = 4409.22 * D_{50}^{0.43} \text{ y } \beta = 12.27 * \frac{n^3}{(1-n)^{1.5}} * D_{50}^{0.1075}$$



## Apéndice B

### Análisis de la Reflexión. Baquerizo 1995

Al interactuar el tren de ondas con la estructura vertical porosa parte de la energía incidente se transforma en energía reflejada. El método que se utiliza en este trabajo para evaluar la reflexión, es el método desarrollado por Baquerizo (1995). En este anexo se presentan los fundamentos teóricos desarrollados por la autora.

#### Método Baquerizo 1995

Dado sistema de coordenadas  $(x; y; z)$ , se considera un tren de ondas irregulares que incide sobre una estructura formando un ángulo  $\vartheta$  con la dirección  $x < 0$ . Sean  $M$  puntos  $x_i = (x_i; y_i)$  con  $i = 1, 2, \dots, M$ , donde se obtienen los registros temporales de la superficie libre del agua  $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_M(t)$ . Para lograr que la media de las series sea nula, se asume, sin perder generalidad, que el nivel medio del agua coincide con el plano  $z = 0$ . Sea  $x_{m1} = (x_{m1}; y_{m1})$  la posición relativa del  $m$  -ésimo sensor:

$$x_{m1} = (x_1 - x_m, -y_1 - y_m)$$

En  $I_1 = (t_0, t_0 + D_T)$ , siendo  $t_0$  el instante en el que se comienza a medir el oleaje y  $D_T$  la duración de los registros.

Fijado  $x = x_{m1}$ , la superficie libre  $z = \eta(x; t)$ , es una función real dependiente del tiempo:

$$z = \eta(x, t) = \eta_m(t)$$

Si se supone que  $\eta_m(t)$  es una función continua en  $I_1$  y periódica de período  $D_T$ , puede aplicarse el Teorema de Weierstrass para polinomios trigonométricos que afirma que para cualquier  $\varepsilon > 0$  existe un único polinomio trigonométrico de grado  $N$ , o sea, de la forma:

$$T_N^m = \sum_{j=1}^N \left( \alpha_j \cos\left(\frac{2\pi jt}{D_T}\right) + b_j \sin\left(\frac{2\pi jt}{D_T}\right) \right)$$

Que verifica:

$$|\eta_m(t) - T_N^m| < \varepsilon \quad \forall t \in I_n$$

Siendo  $I_n = (t_0 + (n - 1)D_T, t_0 + nD_T)$ , con  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Lo que significa que  $T_N^m$  converge a  $\eta_m(t)$  cuando  $N \rightarrow \infty$ . El teorema de Fejer y De la Vallée Poussin asegura que la convergencia es uniforme, además de puntual. El polinomio  $T_N^m$  es la mejor aproximación a  $\eta_m$  en el conjunto de los polinomios trigonométricos de grado  $N$ ,  $T^N$ , lo que quiere decir que cualquier polinomio  $p \in T^N$  distinto de  $T_N^m$  es tal que:

$$\|\eta_m(t) - T_N^m\|_\infty < \|\eta_m - p\|_\infty$$

Donde la norma del máximo  $\| \cdot \|_\infty$  queda definida por:

$$\|f\|_\infty = \max_{t \in I_n} |f(t)|$$

Definiéndose  $B_j^m = a_j^m - ib_j^m$ , se puede expresar el desarrollo en serie de Fourier de  $\eta_m(t)$  como:

$$\eta_m(t) = \sum_{j=1}^N (B_j^m e^{i\omega_j t}) \quad m = 1, 2, \dots, N$$

Donde  $\omega_j = \frac{2\pi j D_T}{h_m}$  con  $j = 1, 2, \dots, N$ .

Por otra parte, se supone que el oleaje irregular se puede expresar como la superposición de un número finito de ondas lineales que inciden y son reflejadas en la estructura. Cada onda tiene su propia amplitud, fase y frecuencia diferente:

$$\eta_m^T(t) = \eta^T(x_m t) = \sum_{j=1}^N \left[ z_I^j e^{i(k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} + z_R^j e^{i(-k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} \right] e^{i\omega_j t}$$

Donde:

$$k_{jx}^m = k_j^m \cos \theta \quad k_{jy}^m = k_j^m \sin \theta$$

Donde  $k_j^m$  es el número de onda correspondiente a la pareja formada por la frecuencia angular y la profundidad,  $\omega_j, h_m$ .

$z_I^j$  y  $z_R^j$  representan las amplitudes complejas de oleaje incidente y reflejado respectivamente. Es importante hacer notar, que la incidencia del oleaje y la orientación de la estructura se expresan con respecto al sistema considerado que es totalmente arbitrario. Como es desarrollo en Serie de Fourier de  $\eta_m(t)$  es único para cada frecuencia angular  $j$ , debe verificarse:

$$z_I^j e^{i(k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} + z_R^j e^{i(-k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} = B_j^m \quad j = 1, 2, \dots, N$$

Siendo a Mansard y Funke la función de error se define como:

$$\varepsilon_j^m(z_I^j, z_R^j) = z_I^j e^{i(k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} + z_R^j e^{i(-k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} - B_j^m$$



$$m = 1, 2, \dots, M \quad j = 1, 2, \dots, N$$

El objetivo del método es encontrar  $z_I^j$  y  $z_R^j$  tales que las funciones error  $\varepsilon_j^m$ , sean lo más pequeñas posibles para  $m = 1, 2, \dots, M$  y  $j = 1, 2, \dots, N$ . Estas funciones nunca serán idénticamente nulas, pues en ellas se engloban los errores debidos a (1) ruido y efectos de no linealidad en sensores y sistema de adquisición de datos; (2) efectos no lineales en la propagación del oleaje; (3) efectos viscosos,.... Por ello, el método trata de determinar los valores de  $z_I^j$  y  $z_R^j$  que minimicen las funciones  $\varepsilon_j^m$ . A continuación se definirá el concepto de minimizar la función error  $\varepsilon_j^m$ .

Es importante resaltar que  $\varepsilon_j^m$  se ha definido como una función dependiente de las variables complejas  $z_I^j$  y  $z_R^j$ , por lo que esta función toma valores complejos.

Se considera la función suma de los cuadrados de los módulos de los errores cometidos en cada uno de los  $M$  sensores y para cada una de las  $N$  frecuencias:

$$E_j = E_j(z_I^j, z_R^j) = \sum_{m=1}^M |\varepsilon_j^m|^2$$

Como  $E_j$  toma valores reales no negativos, tiene sentido matemático y físico buscar un punto  $z_o^j = (z_I^j, z_R^j)$  que minimice la función  $E_j$  aunque  $z_I^j$  y  $z_R^j$  sean números complejos.

### Solución

La función  $E_j$  puede considerarse como una aplicación  $E_j : R^4 \rightarrow R$  que a cada punto:

$$Z^j = (R\{z_I^j\}, I\{z_I^j\}, R\{z_R^j\}, I\{z_R^j\})$$

Hace corresponder  $E_j(z_I^j, z_R^j)$ .  $R\{\}, I\{\}$  denotan la parte real e imaginaria de un número complejo respectivamente.

Si  $E_j(z_I^j, z_R^j)$  tiene un mínimo  $z_o^j$ , éste debe verificar:

$$\begin{aligned} \frac{\delta E_j}{\delta R\{z_I^j\}} = 0 & \quad \frac{\delta E_j}{\delta I\{z_I^j\}} = 0 \\ \frac{\delta E_j}{\delta R\{z_R^j\}} = 0 & \quad \frac{\delta E_j}{\delta I\{z_R^j\}} = 0 \end{aligned}$$

Resolver el sistema anterior, equivale a resolver el sistema:

$$\frac{\delta E_j}{\delta z_I^j} = 0 \quad \frac{\delta E_j}{\delta z_R^j} = 0$$

Operando queda:

$$M\bar{z}_I^j + S_+ * \bar{z}_R^j - B_I = 0$$

$$M\bar{z}_R^j + S_- * \bar{z}_I^j - B_R = 0$$

Donde:

$$S_+ = \sum_{m=1}^M e^{2ik_x^j x_{m1}} \quad S_- = \sum_{m=1}^M e^{-2ik_x^j x_{m1}}$$

$$B_I = \sum_{m=1}^M \bar{B}_J^m \sum_{m=1}^M e^{i(-k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})} \quad B_R = \bar{B}_J^m \sum_{m=1}^M e^{i(-k_{jx}^m x_{m1} + k_{jy}^m y_{m1})}$$

Obteniéndose como solución del sistema:

$$\bar{z}_I^j = \frac{B_R M - B_I S_-}{M^2 - S_+ S_-} \quad \bar{z}_R^j = \frac{B_I M - B_R S_-}{M^2 - S_+ S_-}$$

Siempre que se cumple que  $M^2 - S_+ S_-$  no sea idénticamente nulo, lo que ocurre cuando:

$$M + 2 \sum_{m,n=1, m \neq n}^M \cos(2k_{jx}^m (x_{m1} - x_{n1})) \neq M^2$$

Y

$$\sum_{m,n=1, m \neq n}^M \sin(2k_{jx}^m (x_{m1} - x_{n1})) \neq M^2$$

Para aquellas funciones en las que el sistema tiene solución, el punto crítico es un mínimo estricto de  $E_j$ .

### Limitaciones

Existen dos limitaciones en la aplicación del método, que se deben a la pérdida de coherencia entre señales y a que el sistema de ecuaciones a resolver no tiene solución para ciertas frecuencias.

#### Pérdida de coherencia

Este método que utiliza por lo menos tres señales temporales, precisa que entre ellas exista una gran correlación. Físicamente significa que las series registradas deben

ser manifestaciones del mismo fenómeno. Una forma de verificar esta correlación es mediante la función de coherencia  $\gamma_{ij}(f)$  que se define como:

$$\gamma_{ij}(f) = \left( \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde  $s_{ij}(f)$  es el espectro cruzado entre las señales de los sensores  $i$  y  $j$ ,  $S_{ii}(f)$  y  $S_{jj}(f)$  son los correspondientes espectros suavizados de las series temporales. La función  $\gamma_{ij}(f)$  toma valores entre 0 y 1. Los valores de  $\gamma_{ij}(f)$  próximos a 1 corresponden a frecuencias para las que las señales están muy correlacionadas.

#### No existe solución

Los coeficientes complejos de Fourier de los trenes incidente y reflejado  $z_I^j$  y  $z_R^j$ , respectivamente, resultan del cálculo del cociente de dos determinantes. Cuando el denominador se anula, el sistema no tiene solución.

Las limitaciones antes señaladas pueden solucionarse colocando de forma apropiada los sensores, teniendo en cuenta que: (1) para que exista coherencia entre señales es aconsejable que los sensores no estén muy alejados unos de otros; (2) deben evitarse que estén uniformemente espaciados y debe procurarse que las distancias de los sensores verifiquen B.20 y B.21.



# Bibliografía

- Baquerizo, A. «Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y predicción.» *PhD thesis*, 1995.
- Battjes, J.A. «Surf similarity. Coastal Engineering Proceedings 1.» 1974.
- Bergillos, R. J., M. Ortega Sánchez, y M. A. Losada. «Field observations on the foreshore evolution of a microtidal mixed sand and gravel beach. Geomorphology, Under review.» 2015.
- Bramato, S., M. Ortega-Sánchez, C. Mans, y M. A. Losada. «Natural recovery of a mixed sand and gravel beach after a sequence of a short duration storm and moderate sea states.» *Journal of Coastal Research* 28, 2012: 89-101.
- Buscombe, Daniel, y Gerhard Masselink. «Concepts in gravel beach dynamics.» *Earth-Science Reviews*, 2006: 33-52.
- Carrasco, Pilar Díaz. «Metodología de mejora para el diseño de los diques en talud: corrección del efecto escala.» *Dinámica ambiental. Universidad de Granada*, 2014.
- Chesnutt, C. B. «Laboratory Effects in Beachs Studies. Volume VIII. Analysis of Results from 10 Movable-Bed Experiments. Technical Report.» 1978.
- Correa, Mariana. «Estudio experimental de la influencia de la anchura del dique en el comportamiento del oleaje.» 2009: 103-107.
- Hughes, Steven A. *Physicals modelsand laboratory techniques in coastal engineering*. World Scientific, s.f.
- Jennings, Richard, y James Shulmeister. «A field based classification scheme for gravel beaches.» *Marine Geology*, 2002: 211-228.
- Lara, J.L., N. Garcia, y I.J. Losada. «RANS modelling applied to random wave interaction with submerged.» *Coastal Engineering*, 2006: 395-417.
- Lara, Javier L., Andrea Ruju, y Inigo J. Losada. «Reynolds averaged Navier–Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach.» *Proceedings of the Royal Society*, 2011: 1215-1242.
- Lara, Javier L., Inigo J. Losada, y Philip L.-F. Liu. «Breaking waves over a mild gravel slope: Experimental and numerical.» *Journal of geophysical research*, 2006.

- 
- Losada, M. A. «Recomendaciones para Obras Marítimas 1.0-09. Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo. Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.» 2009.
- Masselink, G., y I.L. Turner. «Large-scale laboratory investigation into the effect of varying back-barrier lagoon.» *Coastal Engineering*, 2012: 16.
- Matias, Ana, Jon J. Williams, Gerhard Masselink, y Óscar Ferreira. «Overwash threshold for gravel barriers.» *Coastal Engineering*, 2012: 14.
- McDougal, W. G. «State of the art practice in coastal engineering.» *Lecture Notes, National Cheng Kung University, Taiwan*, 1993: 10-25.
- Meca, Rafael Jesús Bergillos. «Caracterización de procesos hidrodinámicos y morfológicos en playas heterogéneas.» 2013: 4-7.
- Meca, Rafael Jesús Bergillos. «Estudio de la evolución reciente del delta del Guadalfeo.» 2014.
- Miche, A. «Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritimes exposés a l'action de la houle. Annales des Ponts et Chaussées.» 1951: 285–319.
- Nielsen, P., y D. J. Hanslow. «Wave runup distributions on natural beaches. Journal of Coastal Research.» 1991: 1139–1152.
- Nielsen, P., y H. Y. Kang. «Groundwater dynamics in beaches and coastal barriers, in: International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments.» 1996: 521-532.
- Pedrozo-Acuña, Adrián, Alec Torres-Freyermuth, Qingping Zou, Tian-Jian Hsu, y Dominic E. Reeve. «Diagnostic investigation of impulsive pressures induced by plunging breakers impinging on gravel beaches.» *Coastal Engineering*, 2010: 252–266.
- Román-Blanco, B. López de San. «Dynamics of gravel and mixed sand and gravel beaches.» *Ph.D. thesis. University of London*, 2004.
- Román-Blanco, B. López de San, y P. Holmes. «Further insight on behaviour of mixed sand and gravel beaches-large scale experiments on profile development, in: Coastal Engineering Conference.» 2002: 2651–2663.
- Thompson, C.E.L., J.J. Williams, N. Metje, L.E. Coates, y A. Pacheco. «Turbulence based measurements of wave friction factors under irregular waves on a gravel bed.» *Coastal Engineering*, 2012: 9.
- Torres-Freyermuth, Alec, Inigo J. Losada, y Javier L. Lara. «Modeling of surf zone processes on a natural beach.» *Journal of geophysical research*, 2007.

- Torres-Freyermuth, Alec, Javier L. Lara, y Inigo J. Losada. «Numerical modelling of short- and long-wave transformation on a barred beach.» *Coastal Engineering*, 2010: 317-330.
- Turner, Ian L., y Gerd Masselink. «Coastal gravel barrier hydrology — Observations from a prototype-scale laboratory.» *Coastal Engineering*, 2012: 10.
- Whitehouse, Richard J.S. «BARDEX: A large-scale laboratory study of gravel barrier dynamics.» *Coastal Engineering*, 2012: 2.
- Williams, J.J., D. Buscombe, G. Masselink, I.L. Turner, y C. Swinkels. «Barrier dynamics experiment (BARDEX): Aims, design and procedures.» *Coastal Engineering*, 2012: 10.
- Williams, Jon J., Amaia Ruiz de Alegría-Arzaburu, Robert T. McCall, y Ap Van Dongeren. «Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: Laboratory and field results.» *Coastal Engineering*, 2012: 19.
- Zhiyao, Song, Wu Tingting, Xu Fumin, y Li Ruijie. «A simple formula for predicting settling velocity of sediment particles.» *Water Science and Engineering*, 2008: 37–43.