



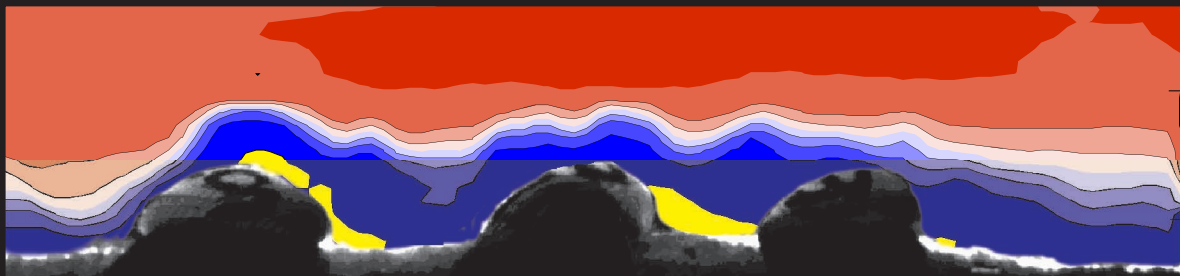
UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Grupo de Ingeniería
del Agua y del
Medio Ambiente

- TESIS DOCTORAL -

Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación
Programa de Doctorado en Ingeniería Civil



**CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL
ARRASTRE DEL MOLUSCO *C.edule* CON LA
METODOLOGÍA DEL DOBLE PROMEDIADO.
ESTUDIO EN MODELO FÍSICO CON
TECNOLOGÍA PIV**

autor
JOSE ANTA ÁLVAREZ

bajo la dirección de
Enrique Peña González

A Coruña, Diciembre de 2009





UNIVERSIDADE DA CORUÑA



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERÍA CIVIL

- TESIS DOCTORAL -

**CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ARRASTRE
DEL MOLUSCO *C.edule* CON LA METODOLOGÍA DEL
DOBLE PROMEDIADO. ESTUDIO EN MODELO FÍSICO
CON TECNOLOGÍA PIV**

POR:

JOSE ANTA ÁLVAREZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

ENRIQUE PEÑA GONZÁLEZ

A Coruña, Diciembre de 2009

**SIEMPRE ACABAMOS LLEGANDO A
DONDE NOS ESPERAN**

- *Libro de los itinerarios* -

José Saramago

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis Doctoral ha sido posible gracias a la colaboración de muchas personas y entidades. Espero que no se escape ninguno. Gran parte del trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto “*Afecciones a la fauna de las aguas de transición por las variaciones de caudal originadas por las centrales hidroeléctricas de punta*”, financiado por la Secretaría General e Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, desarrollado por el área de Ingeniería Hidráulica del GEAMA en consorcio con la empresa SOCOIN, SL.

Gracias por su colaboración al Centro de Investigaciones Mariñas de Corón, Antonio Villalba, Jose Molares, y Adoración Sánchez-Mata, así como a Pedro Montero del Intecmar, por la introducción y asesoramiento en el arte de mantener con vida a los berberechos y por transmitirnos su experiencia en la problemática de estos moluscos en los Lombos do Ulla. Merece especial mención el Grupo de Microbiología de la Universidade da Coruña, quienes además de enseñarnos y asesorarnos sobre el cultivo de fitoplancton, cedieron tiempo, material y laboratorio para desarrollar adecuadamente los cultivos.

También han colaborado en el desarrollo de la experimentación los miembros de la Cofradía de Pescadores de A Coruña y los vigilantes del Servizo de Conservación da Naturaza de la Xunta de Galicia, que nos proporcionaron los berberechos para los ensayos y colaboraron en la recogida de sedimentos de la zona. Gracias también a Cristina Martínez del Departamento de Ecología y Biología Animal de la Universidad de Vigo por proporcionarme un punto de partida para la revisión bibliográfica de las comunidades bentónicas. A Noela Sánchez del Fismare, por su revisión de la parte “biológica” del documento.

Durante estos años en el GEAMA he compartido muchos ratos con investigadores y compañeros del grupo: Víctor (que metía plastina dentro de los berberechos), Inés, Marta, los *Luises*, Andrea, Alfredo Jácome, Juan Cagiao, Judith, Héctor o Manuel Alonso. Con ellas y ellos he crecido profesional y personalmente. Espero que hayan disfrutado de los buenos momentos como yo lo he hecho.

Quiero agradecer especialmente el trabajo realizado por Eva Martín y Ramón Losada, que participaron activamente en el diseño y realización de los experimentos, y de la colaboración de Inés Mera, Sabela Pan y Andrea Louro en la fase final de la experimentación. No me olvido tampoco de Félix Sánchez-Tembleque, que me enseñó los fundamentos de la técnica PIV.

También quiero aprovechar estas líneas para agradecer a Alberto Varela el haber estado ahí en mi fase de investigador be-pre-cario de la Xunta de Galicia y siempre que lo necesité. Alberto, ahora te va tocando a ti. Extiendo el agradecimiento a los Cartolá, especialmente a Lalo, aunque esta vez no haya necesitado asesoramiento sobre civilizaciones antiguas, y a Dani, con el que levanté muchas tapas en Carral.

Y para el final lo más importante. En primer lugar va el agradecimiento a mi Director de Tesis, el Doctor Enrique Peña. Aquella llamada telefónica hace cinco años “¿Conoces a alguien a quién le interese trabajar con el PIV?”, nos coloca en el principio de este documento. Gracias por tu confianza, por dejarme libertad para trabajar y disfrutar con ello, así como por amoldarte a mis tiempos, especialmente en la recta final del documento.

También a mis otros dos “tutores” de mi etapa predoctoral. Gracias a Joaquín Suárez y a Jerónimo Puertas por su apoyo, cariño y por la confianza que depositaron en mí cuando comenzamos con “*El Libro*”. Provocasteis mi dispersión (sana) en el ámbito de la hidrología urbana y en vuestro honor van estas palabras: DSU y TGEU.

A mi familia y amigos, porque todo lo que soy se lo debo en gran parte a ellos. A mis padres por su apoyo y comprensión (¡Ya está!, ¡Ya está!), y a mi hermano, reconvertido a la vida de Escuela (quién lo diría). Aca, gracias por tu paciencia, cariño, comprensión y por ayudarme también con esta aventura. Ya sabes lo que me cuesta cerrar las cosas.

RESUMEN

La hidrodinámica del flujo juega un papel muy importante en la mayoría de los procesos físicos que se desarrollan en ríos, lagos y aguas de transición. Además, la estructura y funcionalidad de las comunidades biológicas en estos ecosistemas acuáticos está fuertemente ligada y controlada por las relaciones que surgen entre los procesos físicos, químicos y biológicos. Con objeto de mejorar la gestión y el conocimiento de los ecosistemas acuáticos están surgiendo nuevas áreas en la Ingeniería Hidráulica y en la Mecánica de los Fluidos relacionadas con la Hidrodinámica de los Ecosistemas Acuáticos. Estas nuevas disciplinas cubren un amplio rango de escalas y de ecosistemas terrestres y acuáticos, y representan un buen ejemplo de la aproximación multidisciplinar de la ciencia moderna.

Un ejemplo aplicado de la interacción de la hidrodinámica en los ecosistemas acuáticos se puede encontrar en la desembocadura del río Ulla, en la ría de Arousa (Galicia). En el banco marisquero de los Lombos do Ulla se han registrado importantes episodios de mortandad del molusco *Cerastoderma edule*, asociados a fuertes descensos de salinidad y al arrastre de los stocks de este berberecho provocados por los episodios de precipitaciones y las crecidas del río.

El principal objetivo de esta investigación es mejorar el conocimiento del fenómeno de arrastre de los berberechos adultos. Para ello, en esta Tesis Doctoral se ha realizado un estudio hidrodinámico en laboratorio sobre el arrastre de varios grupos de berberechos adultos, con diferentes tamaños y número de individuos por superficie. Para la determinación de los campos de velocidades y esfuerzos turbulentos se ha empleado con éxito la tecnología Particle Image Velocimetry.

Para describir los parámetros hidrodinámicos del flujo rugoso que se produce sobre el lecho irregular y heterogéneo formado por los bivalvos se ha empleado la Metodología del doble promediado (*Double Averaged Methodology*). Con este procedimiento se han determinado los parámetros descriptores del flujo así como las distribuciones de velocidades, intensidades y tensiones, con sus términos turbulentos y también de forma o dispersivos. El trabajo realizado ha puesto de manifiesto la importancia de las corrientes secundarias y la tridimensionalidad del flujo cerca del lecho en las distribuciones de esfuerzos cortantes, y su relación con la distribución de tamaños y la densidad de los berberechos en el lecho.

En el análisis de los factores que afectan al arrastre de los moluscos se han empleado técnicas estadísticas habituales en los trabajos de ecología y biología marina como el Análisis de la Varianza. En el mismo, se han puesto de manifiesto ciertas interacciones entre el transporte del sedimento del lecho y el arrastre de los moluscos. Por último, la movilización de los bivalvos también se ha descrito a través del ajuste de funciones de transporte de caudal sólido de fondo, de aplicación habitual en la Ingeniería Fluvial.

ABSTRACT

Hydrodynamics plays a very important role in most of the physical processes at rivers, lakes and transitional waters. Moreover, the structure and functionality of the biological communities in these aquatic ecosystems are largely controlled by an interplay of physical, chemical and biological processes. New areas associated with Hydrodynamics of the Aquatic Ecosystem are appearing in Hydraulic Engineering and Fluid Mechanics in order to improve the management and knowledge of the aquatic ecosystems. These new programs cover a wide range of scales in aquatic and terrestrial ecosystems, and they represent a good example of a multidisciplinary approach in modern science.

An applied example of the interaction of hydrodynamics in aquatic ecosystems can be found at the mouth of the Ulla river, located in the Arousa ria (Galicia). In the shellfish bed of Lombos do Ulla, important episodes of mortality of the *Cerastoderma edule* mollusk have been recorded, which have been associated with the strong decreases in salinity and dragging of the stocks of this cockle due to precipitation episodes and rising of the river's level.

The main goal of this research is to advance in the knowledge of the phenomenon of the dragging of the adult cockles. In order to do so, this PhD Dissertation has carried out a hydrodynamic study in a laboratory of the entrainment of several groups of adult cockles, each with different recruitment rates and sizes. Particle Image Velocimetry technology has successfully applied to determine velocity fields and turbulent forces.

In order to describe the hydrodynamic parameters involved in the rough flow that takes place in irregular and heterogeneous beds of bivalves, the *Double Averaged Methodology* has been applied. With this method's support, the parameters that describe the flow have been determined, as well as velocity, intensity and stress distributions, with its turbulent and drag (or dispersive) factors. The performed analysis reveal the importance of the secondary currents and the tridimensional character of the flow close to the river bed in the distribution of shearing stresses, and their relationship with the distribution of the cockle's sizes and densities.

In the analysis of the factors that affect the mollusk movement, common statistic techniques in ecology and marine biology works have been adopted, like the Analysis of Variance (ANOVA). In this analysis, certain interactions between the transport of bed sediment and the dragging of the mollusks have appeared. Lastly, the bivalve's mobilization has also been described by adjusting bed transport functions, commonly used in River Engineering.

ind

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL

C01. INTRODUCCIÓN.....	1.1
1.1. HIDRODINÁMICA DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS.....	1.1
1.2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN	1.3
1.3. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO	1.4
C02. ECUACIONES FUNDAMENTALES Y DESCRIPCIÓN DE FLUJOS	
TURBULENTOS.....	2.1
2.1. ECUACIONES FUNDAMENTALES.....	2.1
2.1.1. Introducción	2.1
2.1.2. Descomposición de Reynolds. Ecuaciones RANS.	2.3
2.1.3. Otras formas reducidas de las ecuaciones de Navier-Stokes	2.5
2.2. METODOLOGÍA DEL DOBLE PROMEDIADO.....	2.12
2.2.1. Aspectos previos	2.13
2.2.2. Teoremas y procedimiento de promediado.....	2.13
2.2.3. Ecuaciones DANS	2.16
2.3. VARIACIONES DE LA VELOCIDAD EN LA VERTICAL	2.18
2.3.1. Estructura vertical del flujo turbulento en canales abiertos.....	2.18
2.3.2. Zona de flujo libre	2.27
2.3.2.1. Zona logarítmica.....	2.27
2.3.2.2. Determinación del plano de referencia $z=0$	2.29
2.3.2.3. Zona externa.....	2.32
2.3.3. Zona rugosa.....	2.33
2.3.4. Capa subsuperficial	2.35
2.4. TENSIONES TANGENCIALES EN FLUJOS EN LÁMINA LIBRE.....	2.36
2.4.1. Flujo 2D uniforme	2.37
2.4.2. Flujo 3D uniforme en canales rectos.....	2.40
2.4.2.1. Influencia de las corrientes secundarias.....	2.40
2.4.2.2. Distribución de tensiones y velocidades	2.43
2.4.3. Flujo 2D y 3D no uniforme.....	2.50
2.4.4. Otros factores que pueden afectar a la distribución de tensiones y veloc.....	2.56
2.4.5. Determinación de u^*	2.69
2.5. DESCRIPCIÓN DE LA TURBULENCIA	2.73
2.5.1. Introducción. Descripción estadística de la turbulencia.	2.73
2.5.2. Energía en cascada.....	2.79
2.5.3. Intensidad turbulenta	2.82
2.6. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO	2.87
C03. HIDRÁULICA EXPERIMENTAL	3.1
3.1. INTRODUCCIÓN.....	3.1
3.2. TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN DE FLUJO	3.2
3.3. VELOCIMETRÍA PIV	3.10
3.3.1. Introducción: Fundamentos básicos.....	3.10

3.3.2. Principales tipologías y aplicaciones	3.13
3.3.3. Fundamentos físicos y tecnológicos.....	3.18
3.3.3.1. <i>Partículas trazadoras</i>	3.18
3.3.3.2. <i>Fuentes de luz. El láser Nd: YAG</i>	3.20
3.3.3.3. <i>Formación del plano de luz</i>	3.22
3.3.3.4. <i>Adquisición digital de imágenes</i>	3.23
3.3.3.5. <i>Formación de la imagen</i>	3.23
3.3.3.6. <i>Procesado digital de la imagen</i>	3.25
3.3.4. Fundamentos de la evaluación de las imágenes	3.28
3.3.4.1. <i>Fundamentos del análisis de correlación espacial</i>	3.28
<i>Efecto de la densidad de partículas en la imagen, N_i</i>	3.31
<i>Efecto del movimiento en plano, F_i</i>	3.32
<i>Efecto del movimiento fuera de plano, F_o</i>	3.32
<i>Efecto del gradiente de velocidades, F_Δ</i>	3.33
<i>Normas de diseño para obtener una buena correlación con la técnica PIV</i> ..	3.33
3.3.4.2. <i>Análisis de correlación cruzada digital: optimización del tamaño de las partículas</i>	3.35
3.3.4.3. <i>Algoritmos avanzados de correlación cruzada</i>	3.38
<i>Algoritmos iterativos con desplazamiento de la segunda ventana de</i> <i>interrogación</i>	3.39
<i>Esquemas de refinamiento de malla</i>	3.40
<i>Esquemas de deformación de la imagen</i>	3.41
<i>Otros métodos avanzados</i>	3.42
3.3.4.4. <i>Postprocesado</i>	3.44
<i>Validación de datos</i>	3.45
<i>Sustitución de datos incorrectos</i>	3.48
3.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PIV DEL CITEEC-ETSECCP	3.49
3.4.1. Fuentes láser	3.50
3.4.2. Cámaras y sistema de adquisición	3.51
3.5. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO.....	3.53

C04. ANÁLISIS DEL ARRASTRE DEL BERBERECHO *C. edule*..... 4.1

4.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	4.1
4.2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	4.10
4.2.1. Introducción	4.10
4.2.2. Aspectos biológicos: el ciclo de vida de los bivalvos.....	4.11
4.2.2.1. <i>Producción de gónadas y fertilización de la columna de agua</i>	4.13
4.2.2.2. <i>Etapas planctónica</i>	4.14
4.2.2.3. <i>Etapas de asentamiento larvario</i>	4.16
4.2.2.4. <i>Crecimiento: etapas de juvenil y adulto</i>	4.17
4.2.3. Dinámica de las poblaciones bentónicas	4.20
4.2.3.1. <i>Introducción</i>	4.20
4.2.3.2. <i>Procesos y factores involucrados</i>	4.22
<i>La etapa planctónica</i>	4.23
<i>La fijación en el sustrato</i>	4.24
4.2.3.3. <i>Las hipótesis de la selección activa y pasiva</i>	4.26
<i>La selección pasiva</i>	4.26
<i>La selección activa</i>	4.26
<i>Las evidencias en los trabajos de campo</i>	4.33
<i>Recapitulación</i>	4.38
4.2.4. La hidrodinámica y las poblaciones bentónicas	4.39

4.2.5. Estudios en modelo físico.....	4.47
4.3. METODOLOGÍA: DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL	4.60
4.3.1. Introducción	4.60
4.3.2. Instalaciones.....	4.62
4.3.3. Instrumentación empleada	4.66
4.3.4. Campaña experimental	4.71
4.3.4.1. Ensayos por grupos de tamaños	4.74
4.3.4.2. Ensayos de poblaciones estacionales	4.75
4.3.5. Análisis hidrodinámico.....	4.77
4.3.6. Análisis estadístico de los resultados.....	4.81
4.3.6.1. Ensayos por grupos de tamaños	4.84
4.3.6.2. Ensayos por grupos de poblaciones.....	4.86
4.4. RESULTADOS	4.87
4.4.1. Caracterización de los berberechos.....	4.87
4.4.2. Análisis hidrodinámico: lecho de arena.....	4.91
4.4.2.1. Características generales	4.91
4.4.2.2. Velocidades doblemente promediadas.....	4.96
4.4.2.3. Intensidades turbulentas y tensiones de corte.....	4.100
4.4.3. Ensayos por grupos de tamaños.....	4.103
4.4.3.1. Análisis estadístico	4.103
Análisis exploratorio	4.103
Análisis de la varianza	4.109
Análisis a posteriori de los factores principales.....	4.110
Análisis a posteriori de las interacciones	4.115
4.4.3.2. Análisis hidrodinámico	4.118
Características generales	4.118
Velocidades doblemente promediadas	4.126
Intensidades turbulentas y tensiones de corte	4.138
4.4.3.3. Desarrollo de funciones de transporte de fondo	4.152
4.4.4. Ensayos por poblaciones estacionales	4.156
4.4.4.1. Análisis estadístico	4.156
Análisis exploratorio	4.156
Análisis de la varianza	4.162
Análisis a posteriori de los factores principales.....	4.164
Análisis a posteriori de las interacciones	4.168
4.4.4.2. Análisis hidrodinámico	4.169
Características generales	4.169
Velocidades doblemente promediadas	4.173
Intensidades turbulentas y tensiones de corte	4.178
4.4.4.3. Desarrollo de funciones de transporte de fondo	4.184
4.5. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO	4.187
C05. SINTÉSIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	5.1
5.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	5.1
5.2. SINTÉSIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	5.3
5.2.1. Ecuaciones fundamentales y metodología del doble promediado.....	5.3
5.2.2. Dinámica de las poblaciones bentónicas	5.5
5.2.3. Materiales y métodos	5.7
5.2.3.1. Introducción	5.7
5.2.3.2. Instalaciones e Instrumentación	5.8

5.2.3.3. Campaña experimental.....	5.10
5.2.3.4. Análisis hidrodinámico	5.11
5.2.3.5. Análisis estadístico de los resultados	5.12
5.2.3.6. Funciones de transporte de fondo	5.13
5.2.4. Caracterización de los berberechos	5.13
5.2.5. Caracterización del flujo en los ensayos de fondo liso.....	5.14
5.2.6. Análisis estadístico de la movilización de los berberechos.....	5.16
5.2.7. Caracterización del flujo sobre los berberechos.....	5.19
5.2.7.1. Características generales	5.19
5.2.7.2. Velocidades doblemente promediadas	5.22
5.2.7.3. Intensidades turbulentas y tensiones de corte.....	5.23
5.2.8. Desarrollo de funciones de transporte de fondo.....	5.25
5.3. CONCLUSIONES	5.27
5.4. TRABAJOS FUTUROS	5.29
5.5. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO.....	5.31

NOTACIÓN

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

APÉNDICES

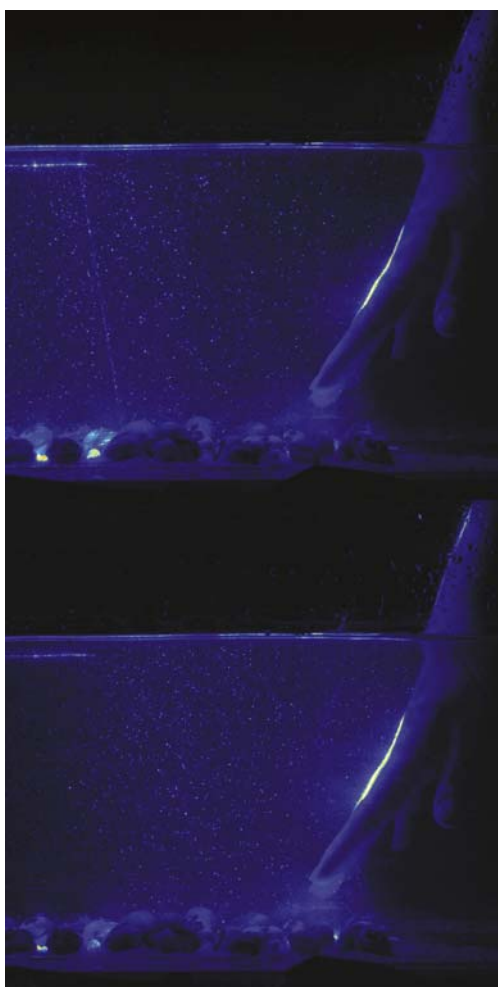
APÉNDICE 1. PUBLICACIONES PREVIAS MÁS RELEVANTES

APÉNDICE 2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA VARIANZA EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

APÉNDICE 3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ARRASTRE DE BERBERECHOS

C01

INTRODUCCIÓN



Fotografía de Portada:

Imagen doble en falsa escala de colores capturada con el equipo PIV durante la preparación de uno de los ensayos de arrastre de berberechos (la intensidad está realzada).

1. INTRODUCCIÓN

1.1. HIDRODINÁMICA DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

La hidrodinámica juega un papel muy importante en la mayoría de los procesos físicos que se desarrollan en ríos, lagos y aguas de transición. Así, los mecanismos de erosión, transporte y sedimentación de partículas o las variaciones morfológicas de cauces y lechos están íntimamente ligados a las características del flujo. También los procesos de intercambio de masa y momento entre el flujo y los intersticios de la zona hiporréica (p.ej. el volumen de huecos en lechos granulares) están ligados a la hidrodinámica. En estas zonas el movimiento del agua juega un papel fundamental en la calidad del hábitat para los microorganismos como insectos o larvas, para los juveniles en los frezaderos de especies piscícolas y para los organismos bentónicos de las aguas de transición.

Además, la hidráulica regula la cinética de muchos procesos reactivos de la biomasa microbiana (algas, bacterias y hongos), afecta a los procesos de alimentación, reproducción, dispersión, oxigenación de microorganismos (invertebrados, organismos bentónicos) así como a la movilización y propagación de contaminantes (reactivos o conservativos) como metales pesados, dioxinas o vertidos.

En los ecosistemas de bivalvos marinos, la hidrodinámica juega un papel vital en los procesos de dispersión y recolocación de los individuos. Estos movimientos, favorecidos por las corrientes de agua, no responden siempre a un proceso pasivo sino que en algunos casos se ha constatado que los organismos pueden favorecer la dispersión a través de una serie de mecanismos para, p.ej., seleccionar un sustrato más favorable para su desarrollo. En el campo de la ecología marina, existe cierta controversia sobre qué mecanismo de selección, activo o pasivo, determina la estructura de las comunidades bentónicas (ver entre otros Butman, 1987).

Por tanto, se puede decir que la estructura y funcionalidad de las comunidades biológicas en lagos, ríos, cauces, estuarios y en el entorno marino en general, está fuertemente ligada y controlada por las relaciones que surgen entre los procesos físicos, químicos y biológicos (Butman, 1987; Statzner *et al.*, 1988; Snelgrove y Butman, 1994; Hart y Finelli, 1999; Boudreaux y Jorgensen, 2001; Nikora *et al.*, 2002; Statzner, 2008).

Con objeto de mejorar la gestión y el conocimiento de los ecosistemas acuáticos han surgido nuevas áreas de la hidráulica y de la mecánica de fluidos con diversos nombres como la ecohidráulica, ecohidrología o hidráulica ambiental, entre otros (Nikora, 2007). Estas nuevas disciplinas cubren un amplio rango de escalas y de ecosistemas terrestres y acuáticos, en ríos, lagos y estuarios, y representan un buen ejemplo de la aproximación multidisciplinar de la ciencia moderna.

La hidrodinámica de los ecosistemas acuáticos juega un papel fundamental en estas nuevas áreas de conocimiento, y debe responder a dos grandes cuestiones que están interconectadas (Nikora, 2009):

- Las interacciones físicas entre el flujo y los organismos, como p.ej. la respuesta de un organismo frente a las fuerzas de arrastre ejercidas por el movimiento del agua.
- Los procesos de transferencia y dispersión de masa ecológicamente relevantes, como los relacionados con la difusión molecular o turbulenta.

Para ello, es importante conocer los métodos y conceptos claves que juegan un papel importante en la hidrodinámica de los ecosistemas acuáticos.

Desde la perspectiva de la ingeniería hidráulica, la herramienta habitual de trabajo ha sido el estudio de la hidrodinámica. En este sentido, en los ecosistemas naturales se deberá tener un amplio conocimiento de la estructura del flujo, el desarrollo de la capa límite, los procesos de mezcla y formación de inestabilidades o la mecánica del transporte de sedimentos. Sin embargo, hay que considerar que el entorno natural, como condición de contorno, posee una complejidad que en muchos casos no podrá reproducirse en unas condiciones controladas en laboratorio (p.ej. tridimensionalidad, diferentes escalas de rugosidad, variabilidad espacial y temporal del flujo, etc.).

Desde un enfoque multidisciplinar no se deben olvidar los aspectos relacionados con la ecología y la dinámica de los ecosistemas, y sus posibles interacciones con el flujo. Algunas veces los factores bióticos pueden modificar algunos parámetros hidrodinámicos, como p.ej. la tensión crítica de arrastre de un lecho de arena, de un modo poco intuitivo. Por ejemplo, algunas aves migratorias pueden mejorar la estabilidad de las superficies donde se encuentran algunos tipos de anfípodos (camarones) alimentándose de ellos. El descenso en la capacidad de erosión se atribuye a que los camarones se alimentan de diatomeas, que a su vez segregan unos polisacáridos que dan cohesión (trabazón) a los sedimentos (Snelgrove y Butman, 1994).

En los últimos años se ha producido un incremento en la capacidad de determinar la estructura y propiedades del flujo con la ayuda de nuevas técnicas experimentales que permiten obtener parámetros más sofisticados que el calado o la velocidad media del flujo. Con los dispositivos actuales, es posible estimar las tensiones de corte, las fuerzas de arrastre, la estructura de la capa límite o describir movimientos organizados o estructuras coherentes en estudios realizados en campo y laboratorio. Estos nuevos parámetros deben incorporarse en los estudios realizados en los ecosistemas acuáticos para poder seguir avanzando en el conocimiento de los procesos y dinámicas de estos sistemas (Statzner *et al.*, 1988).

Esta nueva situación plantea un reto a la comunidad científica: cómo procesar y sacar el máximo provecho a la mayor cantidad y calidad de información ofrecida por las modernas técnicas experimentales. Muchos autores han estudiado el flujo en los ecosistemas acuáticos y sus efectos sobre los organismos empleando las ecuaciones de Navier-Stokes para describir el movimiento del fluido, y las ecuaciones de advección-difusión para el transporte de sustancias pasivas promediadas en el tiempo (aplicando la descomposición de Reynolds). Sin embargo, en muchas ocasiones, estas ecuaciones no son prácticas porque el contorno presenta muchas irregularidades que favorecen la aparición de flujos altamente tridimensionales y heterogéneos cerca del lecho.

Para resolver este problema, se puede aplicar un nuevo procedimiento de promediado espacial a las ecuaciones de Navier-Stokes y de advección-difusión, denominado metodología del doble promediado o *Double Averaged Methodology* (DAM, Nikora *et al.*, 2007). Las nuevas ecuaciones que surgen de aplicar este procedimiento, contienen nuevos términos como tensiones o flujos de cantidad de movimiento inducidos por las formas (dispersivos), y para el flujo que se produce sobre las rugosidades del lecho, términos de arrastre viscosos y de forma, así como términos de producción asociados a las estelas que se pueden formar, p.ej., aguas abajo de un organismo fijado al lecho o al movimiento de una planta sumergida.

1.2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta Tesis Doctoral se centra en el estudio de los procesos hidrodinámicos que inducen el arrastre de un grupo de berberechos (*Cerastoderma edule*) expuestos a una corriente de agua. Para ello, se ha realizado una extensa campaña de ensayos a escala de laboratorio, empleando moluscos vivos expuestos a diferentes velocidades de flujo bajo dos densidades de individuos por superficie diferentes.

El principal objetivo de la investigación es mejorar el conocimiento de este fenómeno de arrastre que, como se detallará en el texto, tiene implicaciones socioeconómicas en algunas villas costeras gallegas (Molares *et al.*, 2008). En particular, este estudio nace motivado por los problemas de mortalidad de los stocks de berberecho producidos en el banco marisquero de los Lombos do Ulla, situado en la desembocadura del Ulla en la ría de Arousa. Estos episodios de mortalidad están ligados a los cambios de salinidad y a los fenómenos de arrastre de los moluscos producidos tras grandes lluvias y crecidas del río (Parada *et al.*, 2006; Parada *et al.*, 2007; Parada y Molares, 2008).

Para cumplir este objetivo, se han realizado una serie de ensayos en los que se ha determinado con la ayuda de la tecnología *Particle Image Velocimetry* (PIV) el campo de velocidades y las tensiones de arrastre sobre los moluscos. Con ayuda de herramientas estadísticas, como el Análisis de la Varianza (ANOVA), se ha analizado qué factores de los analizados (velocidad del flujo, densidad o grado de reclutamiento, tamaño de los berberechos y estado, vivo o muerto) son significativos en el proceso de movilización de los bivalvos.

Desde un punto de vista hidráulico, el flujo sobre los berberechos es un flujo de tipo rugoso sobre un lecho irregular y heterogéneo espacialmente. Para poder describir los parámetros hidrodinámicos relacionadas con el arrastre, se ha empleado la metodología del doble promediado, de reciente aplicación en el ámbito de la hidráulica (Nikora *et al.*, 2007). La metodología del doble promediado se presenta como una herramienta muy prometedora y versátil para estudiar flujos sobre y a través de contornos irregulares. Esta técnica además se complementa muy bien con el PIV, y permite analizar y extraer conclusiones de la información espacial contenida en los campos vectoriales.

Con ayuda de esta técnica se han determinado, a partir de los registros del PIV, los esfuerzos de Reynolds y las velocidades de corte, pero también se han podido estimar otros parámetros relacionados con esta herramienta como las fluctuaciones espaciales de los términos de velocidad o las tensiones dispersivas de corte. Un aspecto importante que se ha tratado es el de la relación entre la rugosidad del lecho (medida en función del grado de reclutamiento) y las tensiones de corte, y su influencia en el porcentaje de movilización de moluscos. El estudio también ha puesto de manifiesto la importancia de las corrientes secundarias en la estructura de las velocidades y tensiones de Reynolds.

La estructura y contenido de este documento es el siguiente:

- En el *Capítulo 2* se presentan las ecuaciones fundamentales y se realiza una descripción de los flujos turbulentos. En esta revisión del estado del conocimiento, se presenta la metodología del doble promediado y también se realiza una descripción de la estructura vertical del flujo y su relación con la presencia de corrientes secundarias en la sección.

- Los fundamentos de la velocimetría de imagen de partículas así como una descripción del equipo PIV empleado en la realización de la campaña experimental se recogen en el *Capítulo 3*.
- En el *Capítulo 4* se exponen los antecedentes de la investigación realizada, la metodología experimental y los resultados de la misma. Los resultados experimentales se comparan con el estado del arte presentado en el *Capítulo 2*, así como con los estudios de movilización de moluscos recogidos en la descripción de la dinámica de las comunidades bentónicas del *Capítulo 4*.

El análisis de los datos se desarrolla fundamentalmente con las metodologías del doble promediado y del análisis de la varianza. Una descripción de esta técnica estadística se presenta en el *Apéndice 2*. En el *Apéndice 3* se presenta un resumen con los parámetros hidrodinámicos y con las distribuciones verticales de las velocidades y tensiones obtenidas en la campaña experimental.

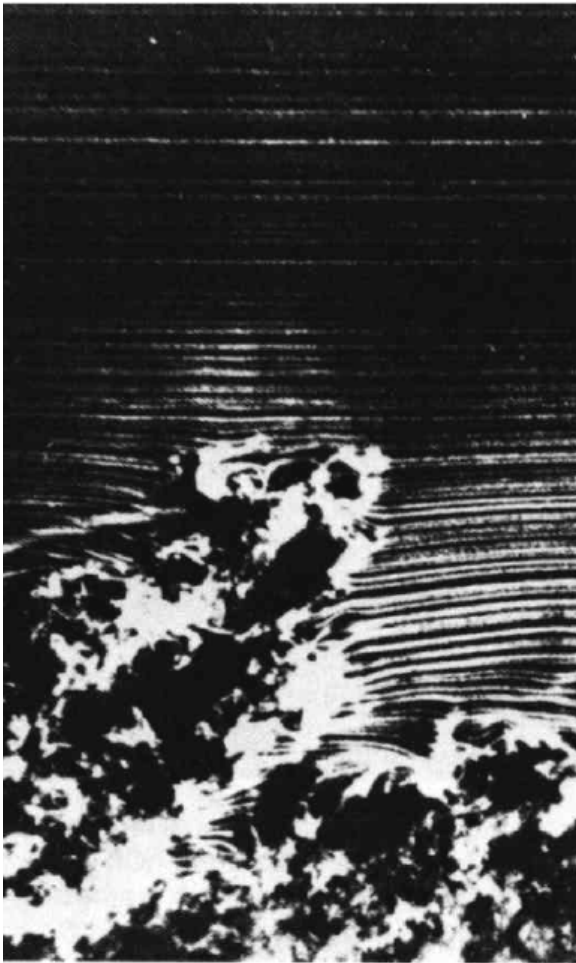
- Las principales conclusiones del estudio así como las líneas de trabajo futuro serán descritas en el *Capítulo 5*. Previamente, este Capítulo también recoge una síntesis y discusión de los principales resultados de la Tesis Doctoral.

1.3. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Boudreau, B. y Jorgensen, B.B. (2001). *The benthic boundary layer*. Oxford, Oxford University Press
- Butman, C.A. (1987). "Larval settlement of soft-sediment invertebrates: the spatial scales of pattern explained by active habitat and the emerging role of hydrodynamical processes." *Oceanographic and Marine Biology. Annual Review* 25: 113-165.
- Hart, D.D. y Finelli, C.M. (1999). "Physical-biological coupling in streams: the pervasive effects of flow on benthic organisms." *Annual Review of Ecology and Systematics* 30: 363-395.
- Molares, J., Parada, J.M., Navarro-Pérez, E. y Fernandez, A. (2008). "Variabilidad interanual de las ventas de los principales recursos marisqueros de Galicia y su relación con las condiciones ambientales." *Revista Galega dos Recursos Mariños* 2(1): 1-42.
- Nikora, V., Green, M.O., Thrush, S.F., Hume, T.M. y Goring, D. (2002). "Structure of the internal boundary layer over a patch of pinnid bivalves (*Atrina zelandica*) in an estuary." *Journal of Marine Research* 60(1): 121-150.
- Nikora, V. (2007). "Hydrodynamics of aquatic ecosystems: spatial-averaging techniques." *Acta Geophysica* 55(1): 3-10.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D. y Walters, R. (2007). "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 873-883.
- Nikora, V. (2009). "Hydrodynamics of Aquatic Ecosystems: An interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics." *River Research and Applications*(in press).
- Parada, J.M., Molares, J., Sánchez-Mata, A., Martínez, G., Darriba, C. y Mariño, J. (2006). "Plan de actuación para la recuperación del banco "Lombos do Ulla": Campañas marisqueras desde 2002 a 2005." *Revista Galega dos Recursos Mariños* 1(1): 1-37.
- Parada, J.M., Molares, J. y Otero, X. (2007). *Episodios de mortalidad en el banco marisquero "Lombos do Ulla" (Ría de Arousa - NO de España) deducidos a partir de datos meteorológicos de los últimos 45 años. XI Congreso Nacional de Acuicultura*. Vigo: 943-946 págs.
- Parada, J.M. y Molares, J. (2008). "Natural mortality of the cockle *Cerastoderma edule* (L.) from the Ría of Arousa (NW Spain) intertidal zone." *Revista de Biología Marina Y Oceanografía* 43(3): 501-511.

- Snelgrove, P.V.R. y Butman, C.A. (1994). "*Animal-Sediment Relationships Revisited: Cause versus effects.*" *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 32: 11-177.
- Statzner, B., Gore, J.A. y Resh, V.H. (1988). "*Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications.*" *Journal of the North American Benthological Society* 7: 307-360.
- Statzner, B. (2008). "*How views about Flow adaptations of Benthic Stream Invertebrates changed over the last century.*" *International Review of Hydrobiology* 93(4-5): 593-605.

ECUACIONES FUNDAMENTALES Y DESCRIPCIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS



En este capítulo se presenta una revisión de la literatura relativa a los principales procesos hidrodinámicos en flujos en lámina libre sobre lechos rugosos. Se presentarán las ecuaciones fundamentales incluyendo una nueva metodología, denominada del doble promediado, que resulta especialmente útil para caracterizar la hidrodinámica de lechos rugosos. En el texto se analizará la estructura vertical de las velocidades, zonificando el flujo en una región libre, otra rugosa y otra subsuperficial. También se analizarán las distribuciones de tensiones de corte y de intensidades turbulentas en el perfil, analizando la influencia de la tridimensionalidad o la variabilidad del flujo en las mismas. En el último apartado se ha realizado una pequeña introducción al estudio de la turbulencia.

Fotografía de Portada:

Desarrollo de una capa límite turbulenta. Imagen realizada con una técnica de visualización de humo para un número de Reynolds basado en la escala de espesor de momento $Re=3500$ (Van Dyke, 1982).

2. ECUACIONES FUNDAMENTALES Y DESCRIPCIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS

2.1. ECUACIONES FUNDAMENTALES

2.1.1. Introducción

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos son las conocidas ecuaciones de Navier¹-Stokes², que junto con la ecuación de continuidad, forman un sistema de cuatro ecuaciones que contemplan la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento o *momentum*.

La ecuación de conservación de la masa se puede expresar como³:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

que para fluidos incompresibles y homogéneos se convierte en:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S) son un juego de tres expresiones, que empleando el convenio de Einstein⁴ se pueden expresar como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.3)$$

donde $i, j = [1, 2, 3]$, x_i representa la coordenada espacial y t la temporal, u_i es la i -ésima componente del vector velocidad, p es la presión, g_i la i -ésima componente de la aceleración gravitatoria y ρ y τ_{ij} , son la densidad del fluido y el tensor de tensiones tangenciales respectivamente.

Otra forma bastante empleada para las ecuaciones dinámicas es (Monin y Yaglom, 1971), donde ν es la viscosidad cinemática del flujo:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.4)$$

¹ Claude Louis Marie Henri Navier: * 1785, Dijon (F); † 1836, París (F)

² Sir George Gabriel Stokes: * 1819, Skreen (IRL); † 1903, Cambridge (UK)

³ En la deducción de las ecuaciones generales se emplearán ejes de coordenadas y velocidades genéricos (x_i, u_i) para poder aplicar el convenio de Einstein. En el desarrollo de casos prácticos se usarán el sistema de coordenadas $\{x, y, z\}$ y las velocidades en coordenadas $\{u, v, w\}$.

⁴ Albert Einstein: * 1879, Ulm (GER); † 1955, Princeton (USA)

En la ecuación (2.3) los términos de la izquierda de la igualdad representan la aceleración local y convectiva del flujo, mientras que los términos de la derecha representan las fuerzas gravitatorias, las de presión y los esfuerzos tangenciales debidos a los efectos viscosos. Estos últimos, se representan habitualmente a partir del tensor de tensiones tangenciales τ_{ij} ,

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) = 2\mu \left(s_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (2.5)$$

que para fluidos incompresibles se reduce a:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (2.6)$$

donde μ es la viscosidad dinámica del agua, δ_{ij} es la función delta de Kronecker y $s_{ij} = 1/2 \cdot (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$.

Si introducimos la ecuación (2.5) en la ecuación (2.3), las ecuaciones de N-S quedan,

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\rho} \tau_{ij} \right) \quad (2.7)$$

En fluidos incompresibles y homogéneos⁵, las 3 ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones dinámicas del movimiento de los fluidos) y la ecuación de continuidad forman un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro variables desconocidas: las tres componentes de la velocidad y la presión. De este modo, conociendo las condiciones iniciales y de contorno se podrían resolver cualquier situación de flujo.

Sin embargo, las ecuaciones de N-S son un sistema de ecuaciones en derivadas parciales de segundo orden con una alta no-linealidad. Esta gran no linealidad está relacionada con un amplio rango de escalas espaciales y temporales que los flujos pueden poseer (Pope, 2000; Cebeci, 2004) y que se analizará con más detalle los apartados 2.1.3 y 2.1.

En esencia, el caso más general del movimiento de los fluidos es el de los flujos turbulentos. Una de las características de este tipo de flujos es que poseen un número de Reynolds⁶ elevado. A medida que el flujo es más turbulento, su número de Reynolds es mayor, se generan más inestabilidades y fluctuaciones en las variables que caracterizan al flujo (velocidades y presiones).

Únicamente existen soluciones analíticas de las ecuaciones de N-S para situaciones donde el flujo es laminar, lo cual restringe el campo de aplicación de estas soluciones a situaciones reales, ya que la inmensa mayoría de los flujos en ingeniería son de naturaleza turbulenta.

⁵ El término homogéneo hace referencia a fluidos sin estratificación térmica o densimétrica (estratificación neutra). Esto es aplicable a fluidos con temperaturas o densidades constantes. Cuando el campo de densidades no es homogéneo, aparecen una serie de fuerzas de flotación que producen el ascenso de las partículas de fluido menos densas y el descenso de las más densas. El desarrollo de las ecuaciones de N-S para flujos estratificados así como el estudio de la interacción entre las fuerzas de flotación y la energía turbulenta se puede consultar p.ej. en el Capítulo 4 de Monin, A.S. y Yaglom, A.M. (1971). *Statistical Fluid Mechanics. Mechanics of Turbulence*. Massachusetts, MIT Press. 784 págs.

⁶ Osborne Reynolds: * 1842, Belfast (UK); † 1912, Watchet (UK)

Para flujos turbulentos no existen soluciones analíticas de las ecuaciones de N-S. Empleando métodos numéricos se pueden resolver las ecuaciones completas de Navier-Stokes, sin embargo, el coste computacional es muy elevado y crece a medida que lo hace el número de Reynolds. En la actualidad, únicamente se pueden resolver geometrías sencillas empleando esta metodología denominada *Direct Numerical Simulation* (DNS). Hasta el momento, en ingeniería hidráulica la aproximación más práctica es la de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas con la descomposición de Reynolds o *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS), donde la turbulencia se tiene en cuenta con algún modelo de turbulencia en vez de resolverse.

2.1.2. Descomposición de Reynolds. Ecuaciones RANS.

No es una exageración asegurar que los dos principales trabajos de Osborne Reynolds de finales del XIX en turbulencia marcaron la dirección a seguir en los estudios de Mecánica de los Fluidos⁷ (Jackson y Launder, 2007).

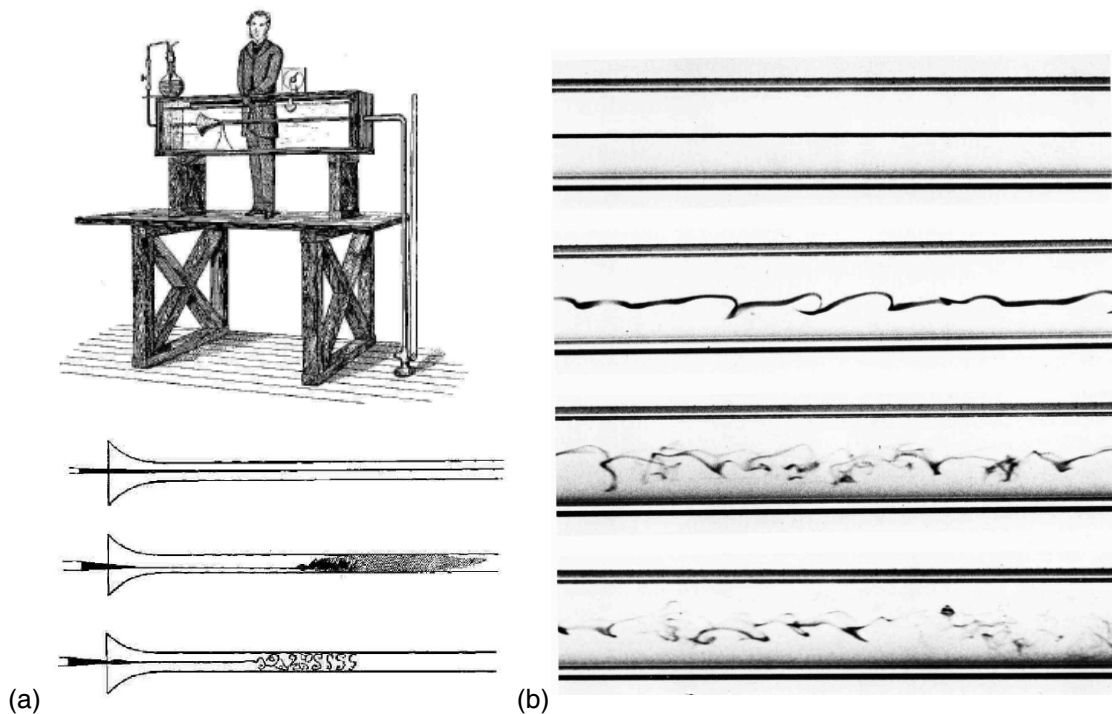


Figura 2.1 (a) Representación de la máquina empleada por Reynolds y de sus observaciones sobre el comportamiento del flujo visualizado en la misma (Reynolds, 1883), y (b) visualización de una reproducción del experimento original de Reynolds (Van Dyke, 1982).

En el primer trabajo de 1883, Reynolds analizó experimentalmente la transición entre flujo laminar y turbulento empleando un dispositivo compuesto por una tubería de cristal en la que inyectó un trazador pudiendo visualizar los distintos tipos de flujo. En este estudio relacionó la

⁷ Otra contribuciones fundamentales fueron las realizadas p.ej. por L. Prandtl en sus trabajos de 1904 y 1925 en los que sentó las bases de la teoría de la capa límite y el modelo de longitud de mezcla que lleva su nombre empleado para resolver las ecuaciones de N-S (Nezu y Nakagawa, 1993).

aparición de remolinos y la desaparición de líneas de corriente rectas con el número adimensional que hoy en día lleva su nombre (Figura 2.1). Sin embargo, la frontera entre régimen laminar y turbulento no sería definida por Reynolds hasta su artículo de 1895⁸.

Será en este trabajo (Reynolds, 1895) donde se propone una nueva versión de las ecuaciones de Navier-Stokes, denominadas ecuaciones de Navier-Stokes promediadas con la descomposición de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier Stokes* o *RANS equations*).

Para la obtención de estas ecuaciones es necesario emplear dos "ingredientes". El primero es la descomposición de las velocidades y presiones instantáneas en sus componentes medios y promediados en el tiempo, la llamada descomposición de Reynolds:

$$\begin{aligned} u_i &= \overline{u_i} + u_i' \\ p &= \overline{p} + p' \end{aligned} \quad (2.8)$$

donde las variables con la barra hacen referencia al valor del promedio temporal (*ensemble averaged*) de la variable y el apóstrofe hace referencia a la parte fluctuante de la variable.

El segundo "ingrediente" son las reglas de promediado de Reynolds (p.ej Monin y Yaglom, 1971):

$$\begin{aligned} \overline{f + g} &= \overline{f} + \overline{g}; \quad \overline{fg} = \overline{f} \overline{g}; \quad \overline{af} = a \overline{f}; \quad \frac{\partial \overline{f}}{\partial s} = \overline{\frac{\partial f}{\partial s}}; \quad \frac{\partial \overline{f}}{\partial s} = \overline{\frac{\partial f}{\partial s}} \\ f' &= f - \overline{f}; \quad \overline{f'} = \overline{f - \overline{f}} = 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Estas reglas se aplican a las ecuaciones (2.2) y (2.3) obteniéndose así las ecuaciones RANS:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (2.10)$$

$$\underbrace{\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t}}_{ac.local} + \underbrace{u_j \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}}_{ac.convectiva} = \underbrace{g_i}_{fuerzas\ gravit.} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i}}_{fuerzas\ presión} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j}}_{fuerzas\ turbulencia} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right)}_{fuerza\ tang.\ viscosa} \quad (2.11)$$

Si se compara el juego de ecuaciones dinámicas RANS con el juego de ecuaciones dinámicas de N-S (2.3) se observa que aparece un nuevo término. Los términos $\overline{u_i' u_j'}$ aparecen como resultado de aplicar la descomposición de Reynolds al término no lineal de la ecuación de N-S y se denominan tensiones de Reynolds. $\overline{u_i' u_j'}$ es un tensor de tensiones cuya traza vale el doble de la energía cinética turbulenta k_E o k^9 ,

⁸ Reynolds (1895) determinó la frontera entre flujo laminar (*direct*) y turbulento (*sinuous*) para valores del parámetro adimensional $K = \rho \frac{DU_m}{\nu}$ superiores a 1900 – 2000.

⁹ Se empleará k_E preferentemente para denominar a la intensidad cinética turbulenta (*TKE*) para diferenciarla del número de onda $k = 2\pi / L$

$$-\overline{u'_i u'_j} = - \begin{vmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{vmatrix} \quad (2.12)$$

$$k_E = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (2.13)$$

Otra forma habitual de expresar las ecuaciones dinámicas RANS es la siguiente:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau_{ij}} - \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.14)$$

donde

$$\overline{\tau_{ij}} = \mu \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.15)$$

Las tensiones de Reynolds son 6 nuevas incógnitas que se deben calcular para resolver las ecuaciones RANS. Dado que el número de ecuaciones no ha incrementado (4) y sí el número de incógnitas (3 velocidades + 1 presión + 6 tensiones de Reynolds), es necesario encontrar 6 nuevas ecuaciones para cerrar la resolución del problema de flujo. Esta situación se conoce en la literatura como el *Turbulence Closure Problem* (el problema de cierre) y representa la idea clave a la que se ha asociado todo el desarrollo de los modelos de turbulencia para las ecuaciones RANS.

2.1.3. Otras formas reducidas de las ecuaciones de Navier-Stokes

Como ya se ha comentado, sólo existen soluciones analíticas de las ecuaciones de N-S para situaciones donde el flujo es laminar. Para buscar soluciones a las ecuaciones completas de Navier-Stokes en flujos turbulentos hay que recurrir a la hidráulica computacional, conocida comúnmente como *Computer Fluid Dynamics* (CFD).

La solución más directa consiste en resolver las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes. Esta técnica conocida como DNS (*Direct Numerical Simulation*) cuenta con el inconveniente de que debe resolver todas las escalas espaciales y temporales que posee el flujo. Para que esto ocurra, es necesario que la malla espacial tenga una resolución inferior a la de la menor escala de longitudes del flujo, y que el paso de tiempo sea lo suficientemente pequeño para resolver los movimientos de mayor frecuencia. Hay que tener en cuenta que las menores escalas de movimiento (las microescalas de Kolgomorov¹⁰) suelen ser varios órdenes de magnitud inferiores a las escalas de movimiento del flujo, especialmente para valores elevados del número de Reynolds. Además, como la resolución directa se realiza siempre en mallas tridimensionales, el tamaño de la misma crece enormemente. Cea (2005) señala que para modelizar un flujo convencional mediante DNS en un escenario común de ingeniería hidráulica la malla del modelo podría tener del orden de 10^{12} a 10^{16} puntos.

¹⁰ Andrey Nikolaevich Kolgomorov: * 1903, Tambov (RUS); † 1987, Moscú (USSR)

Por este motivo es habitual trabajar con formas reducidas de las ecuaciones de Navier-Stokes. La estrategia empleada para obtener estas ecuaciones consiste en trabajar con versiones promediadas de las mismas, ya sea trabajando con promedios espaciales, temporales o ambos.

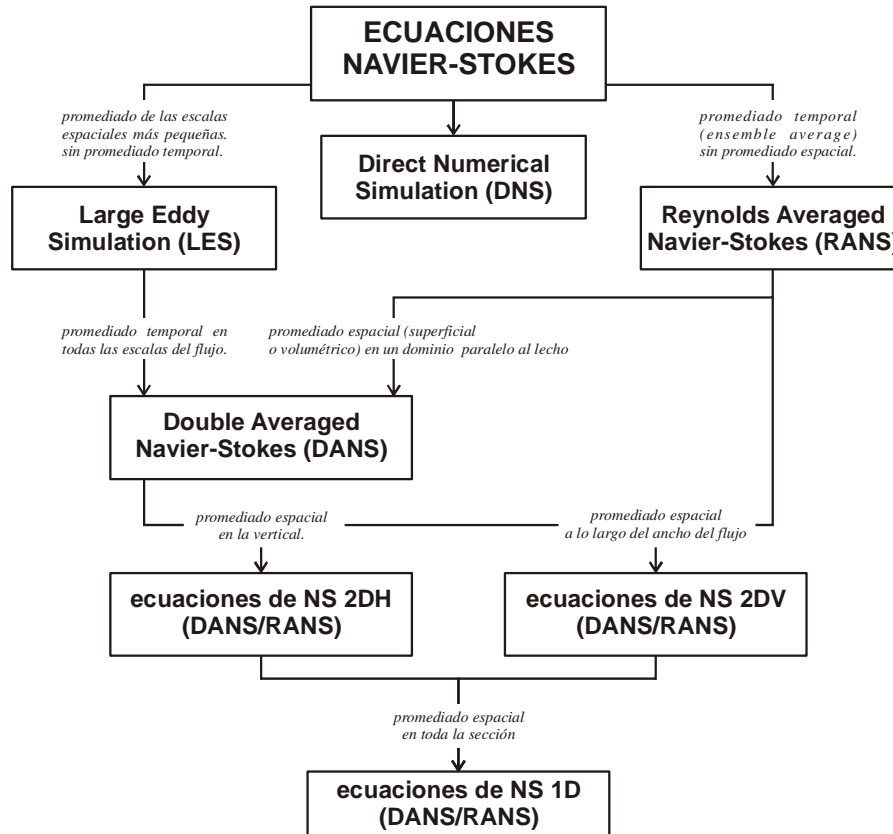


Figura 2.2. Formas reducidas de las ecuaciones de N-S obtenidas a partir del promediado de las variables en el tiempo o en el espacio (adaptado de Nikora, 2008b).

En la Figura 2.2 se presenta un esquema con las formas reducidas de las ecuaciones fundamentales. La característica común de estas aproximaciones es que en vez de abordar el problema completo, obteniendo la solución por tanto de todas las escalas temporales y espaciales, éste se resuelve de alguna manera introduciendo algún tipo de simplificación.

La primera alternativa a la resolución completa de las ecuaciones de N-S consiste en resolver las fluctuaciones del flujo de mayor escala y modelizar la influencia de las menores escalas a través de algún modelo de turbulencia. Esta aproximación se conoce como *Large Eddy Simulation* (LES) o simulación de grandes vórtices.

En la simulación LES se promedian las ecuaciones de N-S en el volumen de cada elemento de la malla. Las escalas de flujo inferiores a este volumen (denominadas *subgrid scales*, SGS) se modelizan. Como en el caso de las DNS, las simulaciones LES son tridimensionales y en condiciones de flujo no permanente, pero cuentan con la ventaja de reducir el coste computacional frente a la resolución directa.

Computacionalmente, el problema de la LES está en la región del flujo cercana a las paredes del contorno (*wall region*), ya que las estructuras se hacen más pequeñas y es necesario refinar la malla para resolverlas. Una solución común consiste en resolver las ecuaciones

RANS cerca de los contornos (en las regiones internas del flujo) y lejos de los mismos emplear la solución LES. Esta aproximación se conoce como *Detached Eddy Simulations* (DES).

La segunda alternativa, ya esbozada en el apartado 2.1.2, consiste en promediar las ecuaciones de Navier-Stokes empleando la descomposición de Reynolds. Las ecuaciones RANS son sin lugar a dudas las más empleadas en la simulación de flujos en el campo de la Ingeniería Hidráulica y Ambiental aplicada. Aunque poseen ciertas limitaciones en los flujos en los que existen fenómenos de separación o transición, permiten obtener un buen nivel de compromiso entre precisión y tiempo de cálculo.

En el campo de los CFD, el principal inconveniente de esta aproximación consiste en el modelo de turbulencia que se debe emplear para poder resolver las ecuaciones RANS. Existen numerosos modelos de turbulencia, algunos semiempíricos o desarrollados para condiciones de flujo muy específicas. Sin embargo, ninguno es universalmente aceptado como válido. El estudio y descripción de estos modelos se escapa del ámbito de esta tesis. Una revisión de los modelos más empleados en el campo de la hidráulica se recoge por ejemplo en Rodi (1980), Davison (2003) o en Cea (2005).

Una forma de mejorar el ámbito de aplicación de los modelos RANS a flujos con separación consiste en simular las fluctuaciones de mayor escala y sus interacciones no-lineales. Este tipo de modelos, conocidos como *Unsteady RANS* (URANS), permiten obtener soluciones para flujos no permanentes incluso con condiciones de contorno fijas. Este tipo de esquema está a medio camino entre las ecuaciones RANS y los modelos LES. Sin embargo, en la actualidad, la comunidad científica no comprende completamente el significado de los resultados arrojados por estos esquemas de resolución, lo que hace las aproximaciones DES/LES sean más comunes (Cea, 2005).

En la Figura 2.3 se presenta una comparación de las diferentes aproximaciones de resolución de las ecuaciones de N-S mencionadas anteriormente para el problema del flujo que pasa a través de un cilindro.

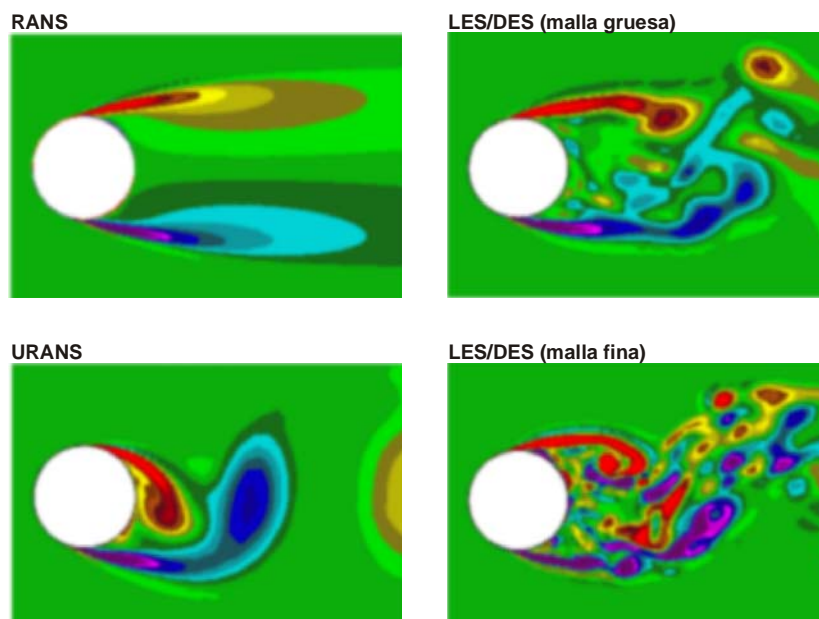


Figura 2.3. Simulación del flujo a través de un cilindro con varias aproximaciones. En la figura se representan las vorticidades (Spalart, 2004).

En la figura anterior se puede apreciar como la aplicación del esquema RANS no permite analizar la frecuencia de la formación de vórtices que conforman la calle de Kármán^{11,12}.

Antes de continuar con el análisis de más formas promediadas de las ecuaciones de N-S se presenta en la Tabla 2.1 un resumen comparativo de las diferentes estrategias computacionales presentadas en este texto¹³, el orden de magnitud de las mallas y los pasos de tiempo necesarios para resolver un problema tipo que Spalart (2000) define como el análisis del flujo sobre un automóvil o un avión. En la última columna de la tabla se define un horizonte temporal aproximado para el cual se dispondrá de ordenadores de suficiente potencia para poder resolver este flujo tipo.

Tabla 2.1. Resumen de las diferentes estrategias empleadas en la hidráulica computacional (Spalart, 2000).

TIPO	RÉGIMEN NO PERMANENTE	MODELIZACIÓN DE LA TURBULENCIA	TAMAÑO DE MALLA	PASOS DE TIEMPO	AÑO DE APLICACIÓN
3DRANS	No	Sí	10^7	10^3	1990
3DURANS	Sí	Sí	10^7	$10^{3.5}$	1995
DES	Sí	Sí	10^8	10^4	2000
LES	Sí	Sólo SGS	$10^{11.5}$	$10^{6.7}$	2045
DNS	Sí	No	10^{16}	$10^{7.7}$	2080

A la vista de la información contenida en la Tabla 2.1, parece que todavía quedan unos cuantos años para que la hidráulica computacional pueda resolver las ecuaciones completas de N-S, por lo que mientras tanto parece que habrá trabajo para la hidráulica experimental.

Retomando el esquema de la Figura 2.2, y promediando las ecuaciones RANS en el calado o a lo largo del ancho de la sección del flujo, se llega a los modelos RANS bidimensionales. Los modelos bidimensionales pueden separarse en lo que se conoce como modelos 2D en la

¹¹ Theodore Von Kármán: * 1881, Budapest (HUN); † 1963, Aachen (GER)

¹² Una calle de Kármán es una estructura de vórtices que se forman, en un rango limitado de números de Reynolds, por el fenómeno de separación no permanente del flujo detrás de un obstáculo interpuesto en el flujo.

¹³ En este trabajo únicamente se ha esbozado el enfoque Euleriano del problema. Debido al incremento de la potencia de computación en los últimos años se están proliferando los códigos Lagrangianos sin malla (de partículas) para la resolución de problemas de ingeniería hidráulica y ambiental. Este enfoque se denomina *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH).

A nivel europeo se puede señalar el trabajo del grupo multidisciplinar SPHERIC, perteneciente a la European Research Community On Flow, Turbulence and Combustion – ERCOFTAC – (http://wiki.manchester.ac.uk/spheric/index.php/Main_Page). A nivel nacional destacan los trabajos realizados por el Grupo de Investigación de Física de la Atmósfera y del Océano de la Universidad de Vigo o por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación en Obras Públicas) del Ministerio de Fomento.

Una revisión reciente del estado del conocimiento de este campo de trabajo se encuentra en la tesis doctoral de Crespo, A.J.C. (2008). *Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics*. Grupo de Investigación de Física de la Atmósfera y del Océano. Vigo, University of Vigo. PhD Dissertation: 157 págs.

vertical (2DV), que son usados cuando el flujo es uniforme en una dirección horizontal, pero con variaciones significativas en relación a la altura. Los modelos 2D promediados en el calado (2DH) se usan en situaciones donde no hay variaciones en la vertical y la densidad del fluido es constante. En Peña (2002) se presenta una revisión de los principales modelos comerciales de este tipo en aplicaciones en ingeniería hidráulica.

En la parte inferior de la Figura 2.2 se encuentra la aproximación unidimensional de las ecuaciones de N-S en los que se promedian espacialmente las variables que definen el flujo en las dimensiones vertical y transversal (en la sección).

Se puede decir que hasta este punto, se ha realizado una descripción convencional de las ecuaciones de Navier-Stokes y sus métodos de resolución a través de diferentes simplificaciones de las mismas. Lo cierto es que hasta que las técnicas numéricas más completas (LES o DNS) sean asequibles computacionalmente, las soluciones ofrecidas por las ecuaciones RANS son, y seguirán siendo, las más habituales en aplicaciones prácticas o investigaciones aplicadas.

Además de la turbulencia, otra característica común a la mayoría de los flujos naturales de canales abiertos (escorrentía superficial, aplicaciones de ingeniería fluvial y/o marítima) y de flujos geofísicos es que son flujos sobre lechos rugosos, o hidráulicamente rugosos. Aunque durante los últimos 20 o 30 años se han realizado notables y numerosas investigaciones sobre este tipo de flujos, el conocimiento de parámetros como las leyes de velocidad o las características de la turbulencia aún es, todavía, ciertamente limitado (Nezu y Nakagawa, 1993; Nikora *et al.*, 2007a).

Uno de los problemas que se debe solucionar antes de analizar las leyes de variación de velocidades y demás variables descriptoras de la turbulencia es la definición de la rugosidad y posición del lecho. Respecto a la rugosidad del lecho¹⁴, en flujos hidráulicamente lisos, Nikuradse¹⁵ empleó en sus experimentos de flujos en tuberías el concepto de rugosidad equivalente k_s , como el diámetro, la altura, de los granos de arena que pegó a las paredes de las mismas para analizar la pérdida de carga en tuberías rugosas (Nikuradse, 1933).

Este concepto se ha extendido para otro tipo de lechos no conformados por arenas densamente pegadas a una superficie lisa a través de la interpolación de la ley logarítmica de velocidades en la región del flujo cercana al fondo (ver apartado 2.3.2).

El segundo problema consiste en definir la posición del lecho. De nuevo, en flujos hidráulicamente lisos la definición de la posición del fondo es trivial, ya que no existe interacción entre el fondo (la rugosidad) y el perfil de velocidades. En esta situación de flujo el espesor de la subcapa viscosa o capa límite laminar¹⁶ es mayor que la posición de las crestas del lecho (ver Figura 2.4).

¹⁴ Por simplicidad en muchos casos se hablará de flujos rugosos o lisos en referencia a flujos sobre lechos hidráulicamente rugosos o lisos respectivamente.

¹⁵ Johann Nikuradse: * 1894, Samtredia (Georgia, RUS); † 1979, Munich (GER)

¹⁶ Los términos capa límite laminar y subcapa viscosa se han empleado indistintamente ya que históricamente se ha asumido que el flujo en esta región era laminar. Sin embargo, los datos experimentales han demostrado que aunque el perfil medio de velocidades es lineal, como en el caso del régimen laminar, el flujo presenta bastantes fluctuaciones, características de un flujo turbulento. Por lo

En lechos rugosos artificiales (arena densa o esferas pegadas a una superficie lisa) parece existir un consenso entorno a que la posición del fondo se encuentra por debajo del plano formado por las crestas del lecho una distancia entre 0.15 y 0.3 veces el valor de la rugosidad equivalente (Nezu y Nakagawa, 1993). Sin embargo, en lechos granulares irregulares, como los que se pueden encontrar en un cauce aluvial natural, está definición ya no es tan clara debido a la propia aleatoriedad del fondo (Nikora *et al.*, 2002b).

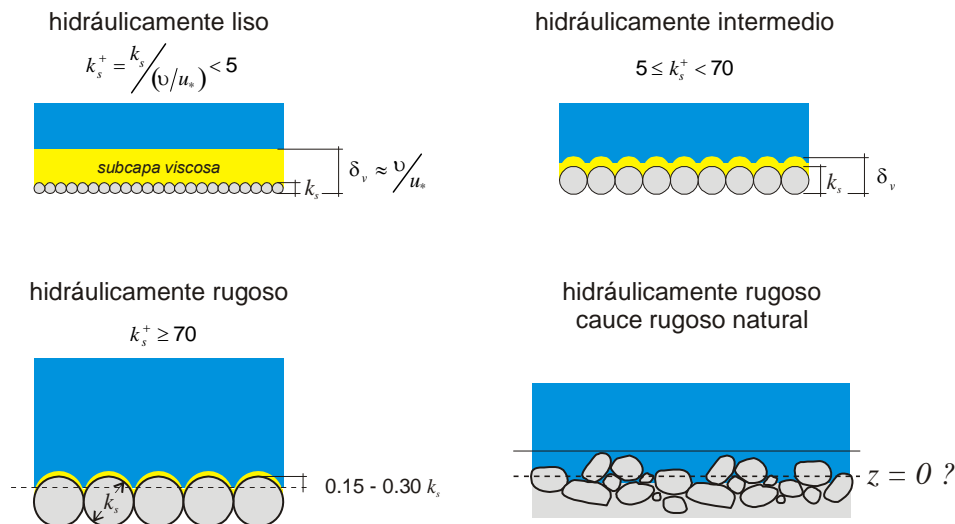


Figura 2.4. Flujo hidráulicamente liso, intermedio y rugoso (sobre lecho regular e irregular).

Aunque en el apartado 2.1 se analizará con detalle el perfil de velocidades (y la determinación de la posición del fondo en flujos hidráulicamente rugosos), en la Figura 2.4 se han representado las fronteras entre los regímenes liso, intermedio y rugoso:

$$\left. \begin{array}{l} \text{lecho hidráulicamente liso: } k_s^+ = k_s u_* / \nu > 5 \\ \text{lecho hidráulicamente intermedio: } 5 \leq k_s^+ < 70 \\ \text{lecho hidráulicamente rugoso: } k_s^+ \geq 70 \end{array} \right\} \quad (2.16)$$

Esta frontera se determina en función de k_s^+ , que representa la relación entre las escalas de longitudes k_s o longitud equivalente de Nikuradse, que es una longitud característica de la rugosidad, y ν / u_* , que es proporcional a la longitud característica de la subcapa viscosa. Este número adimensional es una versión del número de Reynolds, que en estudios de transporte de sedimentos se denomina número de Reynolds granular Re_* y fue empleado ya por Shields¹⁷ en la construcción del famoso ábaco empleado para analizar el transporte de fondo que lleva su nombre (Shields, 1936)

Retomando el problema del análisis de los flujos turbulentos sobre lechos granulares, y al igual que en flujos hidráulicamente lisos, la herramienta más empleada para su análisis son las ecuaciones RANS.

tanto el término capa límite laminar debe considerarse erróneo. Monin, A.S. y Yaglom, A.M. (1971). *Statistical Fluid Mechanics. Mechanics of Turbulence*. Massachusetts, MIT Press. 784 págs.

¹⁷ Albert F. Shields: * 1908, Cleveland (US); † 1974, New York (US)

Sin embargo, en contornos irregulares que pueden cambiar por procesos de transporte de sedimentos, en flujos con bajas condiciones de sumergencia relativa, definida p.ej. por Manes *et al.* (2007) como el ratio entre el calado y la rugosidad del lecho, o en lechos muy heterogéneos espacialmente, es muy difícil determinar la posición o la propia rugosidad del lecho. Además, este tipo de flujos son altamente tridimensionales y heterogéneos cerca del fondo.

El principal inconveniente de las ecuaciones RANS para el análisis de este tipo de escenarios es que no se puede asociar explícitamente a una distribución espacial de la geometría, rugosidad o algunos parámetros hidrodinámicos del flujo (Nikora *et al.*, 2007a). Así, algunas definiciones como la de flujo uniforme, flujo bidimensional o las tensiones tangenciales sobre el fondo no se pueden definir en condiciones de flujo con baja sumergencia (ver Figura 2.5).

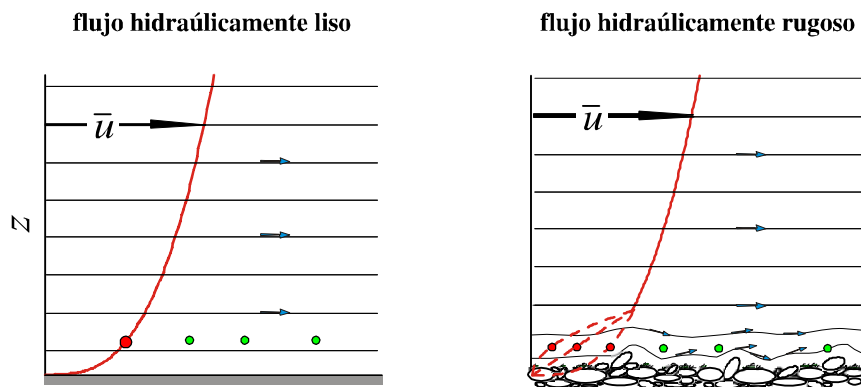


Figura 2.5. Ejemplo de perfil de velocidades sobre fondo liso y rugoso. En el perfil rugoso se representa la indeterminación del perfil de velocidades promediado en el tiempo para diferentes posiciones en la dirección de la corriente (adaptado de Nikora, 2008b)

Para estas situaciones es especialmente recomendable emplear la metodología del doble promediado o *Double Average Methodology* (DAM)¹⁸ que consiste en analizar las variables y desarrollar ecuaciones de movimiento del fluido promediadas tanto en el tiempo como en el espacio. Para esto último se emplean planos o volúmenes paralelos a la posición media del fondo.

En la Figura 2.2 se puede apreciar cómo aplicando la DAM se pueden desarrollar unas nuevas ecuaciones de N-S, denominadas en la literatura anglosajona *Double Averaged Navier Stokes* o DANS. Esta metodología también puede aplicarse a las ecuaciones de advección-difusión para elementos no reactivos (contaminantes) o para el transporte de sedimentos.

En el siguiente apartado (2.2) se establecerán las bases de esta metodología y se expondrán estas ecuaciones DANS.

¹⁸ Esta metodología se está desarrollando y aplicando con profusión en trabajos experimentales y numéricos en flujos hidráulicamente rugosos como se puede observar en el número especial del Acta Geophysica de Septiembre de 2008. Nikora, V. y Rowinski, P.M. (2008). "Rough-bed flows in geophysical, environmental, and engineering systems: Double-Averaging Approach and its applications." Acta Geophysica 56(3): 529-533.

2.2. METODOLOGÍA DEL DOBLE PROMEDIADO

La metodología del doble promediado, DAM en adelante, se empleó inicialmente en problemas de flujo multifásico (p.ej. Whitaker, 1999) y en hidráulica de medios porosos (p.ej. Pedras y de Lemos, 2001; de Lemos, 2008). Originalmente fue aplicada únicamente a las variables instantáneas, es decir, sin realizar un pre o post-promediado temporal, como el empleado para desarrollar las ecuaciones RANS.

En el ámbito de la hidráulica de lechos rugosos (hidráulicamente rugosos), las primeras aplicaciones de esta metodología se encuentran en estudios de corrientes atmosféricas sobre y a través de vegetación terrestre como bosques o matorrales (Wilson y Shaw, 1977; Rapach y Shaw, 1982; Raupach *et al.*, 1991; Finnigan, 2000). En estos trabajos pioneros el promediado espacial se empleó para suavizar el valor de las variables hidrodinámicas promediadas temporalmente (Nikora *et al.*, 2007a). En la actualidad, y al igual que sucede en las aplicaciones de flujo de canales abiertos, la metodología DAM se emplea para identificar y analizar nuevos términos dispersivos (o de arrastre) y viscosos en las tensiones tangenciales sobre y a través de la vegetación (Finnigan y Shaw, 2008).

En hidráulica fluvial, la idea del promediado espacial fue empleada inicialmente por Smith y McLean en 1977, que analizaron perfiles de velocidad promediados a lo largo de líneas equiespaciadas de un lecho ondulado (citados en Nikora y Rowinski, 2008). En la actualidad, las aplicaciones en ingeniería hidráulica siguen la tendencia marcada en los trabajos de flujos atmosféricos donde el promediado se aplica en coordenadas cartesianas.

En hidráulica de canales abiertos las bases conceptuales de esta metodología así como algunos ejemplos de aplicación se pueden revisar en una serie de dos artículos publicados en el *Journal of Hydraulic Engineering – ASCE* (Nikora *et al.*, 2007a; Nikora *et al.*, 2007b).

A continuación se presenta una lista no exhaustiva sobre los principales temas y trabajos¹⁹ en los que se ha aplicado la DAM en el ámbito de la ingeniería hidráulica y ambiental:

- Estudio de flujos sobre vegetación acuática y la relación de ésta con la rugosidad del lecho, la aparición de esfuerzos tangenciales y la modificación de los flujos de cantidad de movimiento (Lopez y Garcia, 1998; Nepf y Ghisalberti, 2008; Poggi y Katul, 2008; Riggeti, 2008).
- El análisis de flujos sobre lechos naturales de grava. En esta categoría se pueden citar algunos trabajos realizados por el grupo del profesor Vladimir Nikora (p.ej. Nikora *et al.*, 2001; Cameron *et al.*, 2008), la tesis de Martin Detert (2008), dirigida por el profesor Gerhard H. Jirka, y otros artículos del *Science Citation Index* (Aberle *et al.*, 2008; Cooper y Tait, 2008; Mignot *et al.*, 2008, 2009).
- Otro grupo de trabajos están relacionados con el flujo sobre lechos de arena lisos o con formas de fondo (Giménez-Curto y Corniero-Lera, 1996; McLean *et al.*, 1999; Coleman *et al.*, 2008; McLean *et al.*, 2008; Radice y Ballio, 2008).
- El cuarto grupo de estudios están relacionados con el flujo de momentum y el análisis de las tensiones de corte sobre y a través de lechos constituidos por gravas y rugosidades

¹⁹ Algunos trabajos podrían incluirse en varias categorías

artificiales como traviesas o dunas fijas (Coleman *et al.*, 2007a; Coleman *et al.*, 2007b; Manes *et al.*, 2007; Pokrajac *et al.*, 2007).

- Por último, se pueden encontrar también algunos trabajos que emplean la técnica DAM para analizar resultados numéricos (Coceal *et al.*, 2008; Stoesser y Nikora, 2008) o incluso códigos numéricos que incorporan las ecuaciones DANS como base para el modelo matemático (Walters y Plew, 2008).

Por tanto, se puede comprobar como el empleo de la metodología DAM en ingeniería hidráulica no para de crecer y está siendo usada por numerosos grupos de trabajo e investigadores. Si esta tendencia continua así, esta herramienta podrá convertirse en un estándar para el análisis, realización e interpretación de ensayos tanto en hidráulica computacional como experimental, especialmente en aquellos escenarios donde la superficie sobre la que circula el flujo es espacialmente heterogénea e interesa conocer la interacción del flujo con estos contornos rugosos.

2.2.1. Aspectos previos

Como sucedía con las ecuaciones RANS (ver 2.1.2) para poder desarrollar las expresiones de las ecuaciones de N-S doblemente promediadas, DANS en adelante, es necesario aplicar una serie de herramientas. En este caso, los ingredientes necesarios serán los operadores o reglas de promediado y la descomposición de las variables hidrodinámicas en sus partes medias e instantáneas, con una versión revisada de la descomposición de Reynolds. El procedimiento a seguir será aplicar la descomposición DAM a las ecuaciones de N-S y aplicar los operadores de promediado a estas ecuaciones.

Llegados a este punto, se puede optar por realizar un promediado espacial a las ecuaciones RANS, que ya están promediadas en el tiempo, o aplicar primero un promediado espacial para posteriormente efectuar el promediado temporal. La primera alternativa, denominada *time-space averaging*, parece la más apropiada para describir flujos hidráulicos en lámina libre ya que es consistente con el desarrollo del conocimiento en esta área, y se podrán aprovechar así todas las nociones sobre turbulencia adquiridas durante más de un siglo de trabajos (Nikora, 2008a).

Sin embargo, parece existir cierto debate en la comunidad científica sobre cuál procedimiento de promediado (tiempo-espacio o espacio-tiempo) es más idóneo, ya que aunque deben ser conmutativos, en el desarrollo de las expresiones de los esfuerzos tangenciales aparecen una serie de términos que no tienen una explicación física demasiado clara y que pueden tener cierta implicación en la obtención de modelos de turbulencia para hidráulica computacional. Una discusión sobre estas consideraciones se puede encontrar en Nikora *et al.* (2007a) y en Pokrajac *et al.* (2008)

En este texto se desarrollarán las ecuaciones promediadas primero en el tiempo y posteriormente en el espacio, citando en caso necesario los resultados obtenidos empleando el análisis espacio-tiempo.

2.2.2. Teoremas y procedimiento de promediado

En primer lugar se definen los operadores para realizar la media espacial (volumétrica) de una variable hidrodinámica como:

$$\left. \begin{aligned} \langle \theta \rangle(x, y, z, t) &= \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \theta dV \\ \langle \theta \rangle_s(x, y, z, t) &= \frac{1}{V_0} \int_{V_f} \theta dV \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

donde θ es una variable del flujo (escalar, vectorial o una componente tensorial) definida en el flujo pero no en el espacio ocupado por los elementos del fondo, los paréntesis angulares $\langle \rangle$ indican que la variable está promediada espacialmente en una región de volumen total V_0 en la que el fluido ocupa un volumen V_f .

Los dos operadores $\langle \bullet \rangle$ y $\langle \bullet \rangle_s$ se conocen como *intrinsic spatial average* y *superficial spatial average*, respectivamente (Nikora *et al.*, 2007a). Estos dos operadores se relacionan a través de la siguiente expresión:

$$\langle \theta \rangle_s = \phi_s \langle \theta \rangle \quad (2.18)$$

donde ϕ_s se debe interpretar como una función de rugosidad de fondo o como una función de la porosidad (en el apartado 2.3.2.2 se presentará más información sobre la forma de definir la función de rugosidad de fondo):

$$\phi_s = \frac{V_f}{V_0} \quad \text{con } 0 \leq \phi_{\min} \leq \phi \leq 1 \quad (2.19)$$

En aplicaciones hidráulicas es más conveniente usar el operador intrínseco (promediado sobre el volumen de fluido V_f), por lo que será el que se empleará en los desarrollos de las ecuaciones DANS. Por encima de la máxima elevación del lecho, no existen diferencias entre $\langle \theta \rangle$ y $\langle \theta \rangle_s$ porque todo el volumen está relleno de fluido.

Los operadores de la ecuación (2.17) se han definido para realizar el promediado en un volumen de fluido paralelo la posición del fondo (ver en la Figura 2.6 o Figura 2.13 el sistema de referencia). De manera análoga se podrían definir operadores para realizar el promediado superficial sobre planos paralelos al fondo. Sin embargo, en este desarrollo se emplearán los operadores volumétricos por los siguientes motivos (Nikora *et al.*, 2007a):

- 1) El registro de las variables hidrodinámicas siempre se realiza en un volumen finito de fluido. Así, empleando técnicas de velocimetría doppler acústica o láser (ADV o ADVP y LDA habitualmente, ver Capítulo 3) las medidas se realizan siempre sobre un volumen de control de varios mm^3 . En el caso de la tecnología Particle Image Velocimetry, incluso con equipos PIV 2D o 2D-3C²⁰, las medidas se realizan en pequeños volúmenes de interrogación que tienen el espesor del plano láser.
- 2) Las operaciones matemáticas son más sencillas y elegantes; y, lo más importante,
- 3) Las ecuaciones promediadas en volúmenes se pueden aplicar igualmente a planos, haciendo rebanadas paralelas al fondo de un espesor reducido. De manera análoga, este

²⁰ El acrónimo PIV 2D-3C, o SPIV (PIV estereoscópico), hace referencia a equipos que miden en un único plano las 3 componentes de la velocidad. Cómo se describe con más detalle en el Capítulo 3, en la actualidad existen equipos PIV que realizan medidas 3D en volúmenes de pocos cm de espesor.

procedimiento se podrá aplicar a pequeños paralelepípedos paralelos al fondo, como se representa en la Figura 2.6.

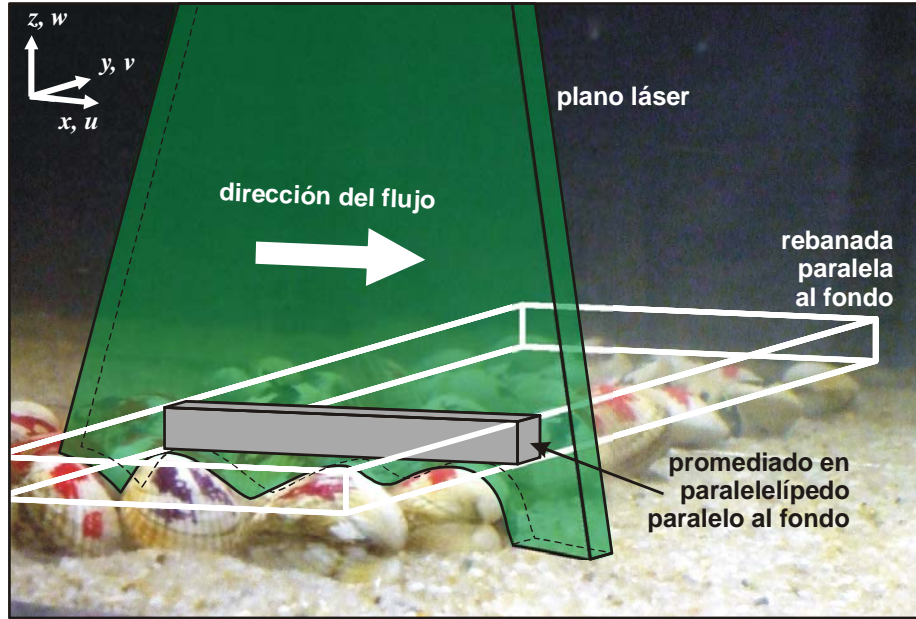


Figura 2.6. Esquema del volumen de promediado en los ensayos realizados de arrastre de berberechos con el equipo PIV.

En la región de flujo situada sobre las crestas (máximas elevaciones) del fondo, el promediado de las ecuaciones de N-S no es complejo ya que se pueden emplear las reglas de Reynolds ya expuestas en las ecuaciones (2.9). Sin embargo, a la hora de promediar las ecuaciones de Navier-Stokes en las zonas situadas por debajo de las crestas del fondo, ya sea siguiendo el orden espacio-tiempo o tiempo-espacio, es necesario usar nuevos teoremas para obtener las ecuaciones DANS.

En Nikora *et al.* (2007a) se presentan los teoremas integrales para ambas metodologías. Si se realiza el promediado primero en el tiempo (obteniendo así las ecuaciones RANS -2.1.2-) y luego en el espacio, los teoremas integrales a aplicar son:

$$\left\langle \frac{\partial \bar{\theta}^s}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial \langle \bar{\theta}^s \rangle_s}{\partial t} + \frac{1}{V_0} \overline{\int \int_{S_{int}} \theta \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS^s}, \text{ y}$$

$$\left\langle \frac{\partial \bar{\theta}^s}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{\partial \langle \bar{\theta}^s \rangle_s}{\partial x_i} - \frac{1}{V_0} \overline{\int \int_{S_{int}} \theta n_i dS^s} \quad (2.20)$$

empleando las variables superficiales, mientras que si se emplean variables intrínsecas:

$$\left\langle \phi_t \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{\phi_s} \frac{\partial \phi_s \langle \phi_t \bar{\theta} \rangle}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \overline{\int \int_{S_{int}} \theta \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS^s}, \text{ y}$$

$$\left\langle \phi_t \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{\phi_s} \frac{\partial \phi_s \langle \phi_t \bar{\theta} \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{V_f} \overline{\int \int_{S_{int}} \theta n_i dS^s} \quad (2.21)$$

En la definición de estos teoremas integrales se pueden observar como aparece una porosidad o función de rugosidad temporal ϕ_t , análoga a la función de rugosidad espacial ϕ_s , y que permite contabilizar la variabilidad temporal del lecho. Esta función se define como $\phi_t = T_f / T_0$, donde T_f representan el tiempo total del intervalo de promediado en el cual un punto está ocupado por fluido y T_0 es el tiempo total del intervalo en el que se realiza el promediado. De modo análogo a las variables promediadas en el espacio $\langle \theta \rangle$ y $\langle \theta \rangle_s$, $\bar{\theta}$ y $\bar{\theta}^s$ se definen como la media temporal intrínseca y superficial. Estas dos medias se realizan de forma similar a las medias espaciales a través de la porosidad temporal:

$$\bar{\theta}^s = \phi_t \bar{\theta} \quad (2.22)$$

El resto de variables que aparecen por primera vez en las ecuaciones (2.20) y (2.21) son el vector unitario normal a la superficie del fondo \mathbf{n} , \mathbf{v} es la magnitud vectorial de la velocidad de movimiento de la superficie del lecho y S_{int} es la superficie de la interfase entre el lecho y el fluido.

Para el caso de geometrías de lecho fijas o que se modifican lentamente (a lo largo del período de tiempo T_0 o el volumen V_0 en los que se realiza el promedio espacial), como por ejemplo en el análisis de formas de fondo en un lecho de arena, los teoremas de las ecuaciones (2.20) y (2.21) se simplifican:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right\rangle &= \frac{1}{\phi_s} \frac{\partial \phi_s \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial t} \\ \left\langle \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \right\rangle &= \frac{1}{\phi_s} \frac{\partial \phi_s \langle \bar{\theta} \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{V_f} \int \int_{S_{int}} \theta n_i dS \end{aligned} \quad (2.23)$$

2.2.3. Ecuaciones DANS

Una vez definidos los teoremas para realizar las medias espaciales de las variables promediadas en el tiempo, el siguiente paso para poder obtener las ecuaciones doblemente promediadas (DANS, en adelante), consiste en definir una versión modificada de la descomposición de Reynolds que contemple las fluctuaciones espaciales.

Para ello, cualquier variable hidrodinámica θ (escalar, vectorial o componente de tensor) se expresará como:

$$\begin{aligned} \theta &= \bar{\theta} + \theta' \\ &= (\langle \bar{\theta} \rangle + \tilde{\theta}) + \theta' \end{aligned} \quad (2.24)$$

es decir, se considera la descomposición de Reynolds $\theta = \bar{\theta} + \theta'$ para las variables instantáneas y la descomposición $\bar{\theta} = \langle \bar{\theta} \rangle + \tilde{\theta}$ para las variables promediadas en el espacio. La barra superior ondulada en $\tilde{\theta}$ señala fluctuación espacial en la variable promediada temporalmente $\bar{\theta}$. Es decir, la diferencia entre la variable doblemente promediada $\langle \bar{\theta} \rangle$ y la variable promediada en el tiempo $\bar{\theta}$. De manera análoga a la descomposición de Reynolds donde $\theta' = \bar{\theta} - \theta$, $\bar{\theta}' = 0$, tenemos que $\tilde{\theta} = \langle \bar{\theta} \rangle - \bar{\theta}$, $\langle \tilde{\theta} \rangle = 0$.

En las ecuaciones presentadas a continuación se ha realizado además la suposición de que la porosidad ϕ , o variabilidad temporal del lecho es independiente, o no presenta correlación, con las variables hidrodinámicas promediadas en el tiempo (p. ej. $\langle \phi_i \theta \rangle = \langle \phi_i \rangle \langle \theta \rangle$). Esta hipótesis, razonable para la mayoría de las aplicaciones, permite simplificar las ecuaciones (2.25) y (2.26) ya que el producto de las porosidades $\phi_s \langle \phi_i \rangle$ se puede sustituir por un único símbolo $\phi = \phi_s \langle \phi_i \rangle$. Además, para lechos fijos se tiene directamente que $\phi_i = 1$ y entonces $\phi = \phi_s$ (Nikora, 2008b).

Entonces, aplicando los teoremas de promediado espacial (ecuaciones (2.20) y (2.21)) a las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento promediadas en el tiempo (ecuaciones RANS (2.10) y (2.11)) se llega a las siguientes expresiones (Nikora, 2008a):

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho \frac{\partial \phi \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t}}_{ac.local} + \underbrace{\langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i}}_{ac.convectiva} &= \underbrace{g_i}_{fuerzas\ gravit.} - \underbrace{\frac{1}{\phi \rho} \frac{\partial \phi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i}}_{fuerzas\ presión} - \underbrace{\frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi \langle \bar{u}_i' u_j' \rangle}{\partial x_j}}_{fuerzas\ turbulencia} - \underbrace{\frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi \langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j}}_{fuerzas\ originadas\ por\ las\ formas\ de\ fondo} \\ &+ \underbrace{\frac{1}{\phi} \frac{\partial}{\partial x_j} \phi \left\langle \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right\rangle}_{fuerza\ tangencial\ viscosa} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{1}{\phi} \frac{1}{V_0} \int \int_{S_{int}} \bar{p} n_i dS^s}_{f_{p_i} \equiv fuerzas\ de\ arrastre\ de\ presión} \\ &- \underbrace{\frac{1}{\phi} \frac{1}{V_0} \int \int_{S_{int}} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) n_j dS^s}_{f_{v_i} \equiv fuerzas\ de\ arrastre\ viscosas} \end{aligned} \quad (2.26)$$

En comparación con las ecuaciones RANS convencionales, se puede observar que en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento doblemente promediada (2.26) aparecen, además de los esfuerzos de Reynolds turbulentos $-\rho \langle \bar{u}_i' u_j' \rangle$ promediados espacialmente, nuevos términos que explícitamente recogen las tensiones dispersivas $\rho \langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle$ o inducidas por forma (*form-induced*). Estos esfuerzos tangenciales están originados por la variabilidad espacial de los campos vectoriales promediados temporalmente. También aparecen las fuerzas

de arrastre por unidad de volumen, $f_{p_i} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{\phi} \frac{1}{V_0} \int \int_{S_{int}} \bar{p} n_i dS^s$ y $f_{v_i} = -\frac{1}{\phi} \frac{1}{V_0} \int \int_{S_{int}} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) n_j dS^s$,

relacionadas con las fuerzas de presión y viscosas respectivamente. Estos esfuerzos únicamente están definidos por debajo del nivel de las crestas del lecho.

La metodología del doble promediado se puede aplicar, siguiendo el procedimiento señalado para las ecuaciones de N-S, a las ecuaciones de advección-difusión para el transporte no reactivo de sustancias o para el transporte de sedimentos (Nikora *et al.*, 2007a). Este procedimiento también se ha usado para describir ecuaciones de segundo orden como las que describen los esfuerzos tangenciales (Coleman *et al.*, 2008; Pokrajac *et al.*, 2008) o el balance de energía cinética turbulenta (Nikora *et al.*, 2007a; Mignot *et al.*, 2008, 2009).

En cualquier caso, en las ecuaciones obtenidas aplicando la metodología DAM, aparecen nuevos términos dispersivos de transporte, generación y disipación de la energía del flujo relacionados con las heterogeneidades espaciales del flujo, con los procesos de formación de estelas (*wakes*) tras los obstáculos del fondo, la interacción del flujo superficial con el sub-superficial en el entorno del lecho y/o con el propio movimiento del lecho, ya sean el movimiento de partículas o de otros elementos, como por ejemplo plantas sumergidas.

En el momento de escribir esta Tesis Doctoral, la definición y comprensión del significado de estos nuevos términos es todavía un reto pendiente para la comunidad científica, aunque ya existen trabajos que comienzan a asentar ciertos conocimientos relacionados, p.ej., con las distribuciones de las tensiones tangenciales sobre lechos rugosos (p.ej. Manes *et al.*, 2007; Aberle *et al.*, 2008; Cooper y Tait, 2008; Pokrajac *et al.*, 2008), el análisis de estructuras coherentes en el flujo (Pokrajac *et al.*, 2007; Detert, 2008) o el balance de energía cinética turbulenta (Mignot *et al.*, 2008, 2009).

2.3. VARIACIONES DE LA VELOCIDAD EN LA VERTICAL

2.3.1. Estructura vertical del flujo turbulento en canales abiertos

La estructura vertical de un flujo en lámina libre está relacionada con los tres²¹ rangos espectrales de las fluctuaciones de la velocidad definidos por Kolmogorov en su famoso trabajo de 1941²²:

- a) El rango de producción, donde el patrón del espectro no sigue una representación específica.
- b) El subrango inercial, donde el espectro sigue la conocida ley de los "-5/3". En este rango no existen efectos viscosos (por eso se denomina inercial).
- c) El rango viscoso, donde el espectro decae mucho más rápido que en el rango inercial debido a la disipación.

Según este esquema, la energía turbulenta es extraída del flujo medio en el subrango de producción, para ser transferida a escalas turbulentas cada vez de menor tamaño, en el subrango inercial. La energía turbulenta se disipa en forma de calor en el subrango viscoso, en las menores escalas de movimiento. Este es el conocido proceso de transformación de la energía en cascada, propuesto inicialmente por Richardson (1922)²³ y cuantificado por Kolmogorov en 1941, en particular, identificando las menores escalas del movimiento que hoy en día llevan su nombre (ver Apartado 2.5.2).

²¹ Cheng en 1953 complementó el modelo de Kolmogorov, realizando una división en el subrango inercial en dos zonas donde $\sim k^{-1}$ y $\sim k^{-5/3}$. En el apartado 2.5.2 y en Nikora (1999) se pueden encontrar más detalles. Nikora, V. (1999). "Origin of the "-1" spectral law in wall-bounded turbulence." *Physical Review Letters* 83(4): 734-736.

²² Una traducción de este trabajo se puede encontrar en Kolmogorov, A. (1991). "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds." *Proceedings of the Royal Society of London A* 434: 9-13.

²³ Lewis Fry Richardson: * 1881, Newcastle upon Tyne (UK); † 1953, Kilmun, Argyll and Bute (UK)

Siguiendo esta estructura, y también de forma similar a la división clásica de la capa límite, la estructura del flujo en canales abiertos se suele dividir en tres regiones (Nezu y Nakagawa, 1993):

- i. La región de la pared (*wall region*), que se corresponde con la región interna del flujo (siguiendo la notación clásica de capa límite). Esta es una zona caracterizada por las escalas de longitud y velocidad ν/u_* y u_* respectivamente. Es habitual que estas escalas se empleen para normalizar las variables del flujo. Así, en U^+ y z^+ , el superíndice '+' señala que las variables u y z se han normalizado respecto a las variables internas u_* y ν/u_* .
- ii. La región de la lámina-libre (*free-surface region*). En esta zona, las variables que controlan la estructura de la turbulencia son las escalas de velocidad máxima de la corriente U_{\max} y el calado del flujo h , como se indica en la Figura 2.7.

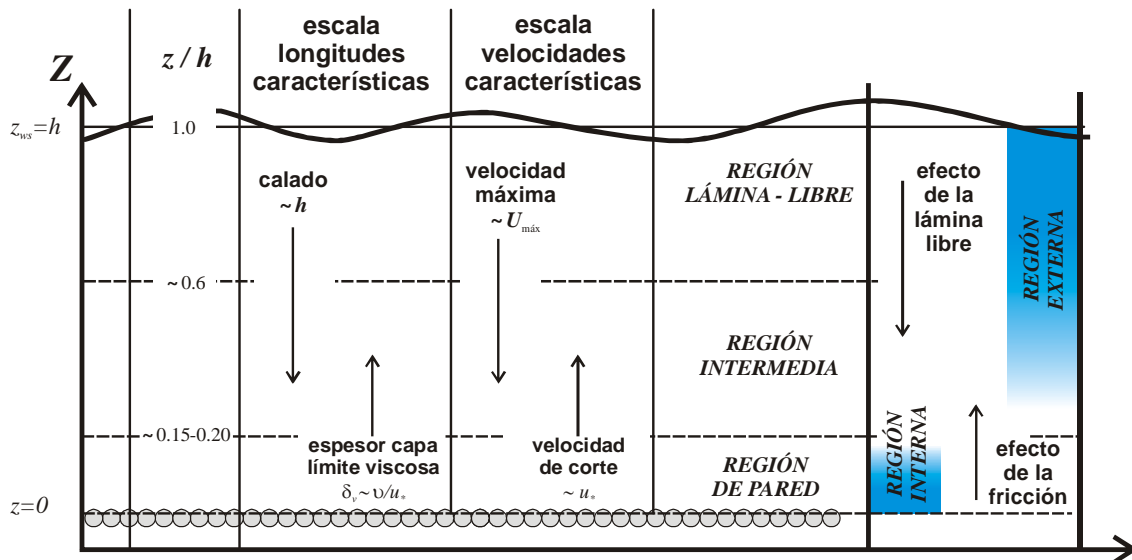


Figura 2.7. División clásica de la estructura vertical del flujo en canales abiertos con lecho hidráulicamente liso (elaboración propia a partir de Nezu y Nakagawa, 1993; López y García, 1999 y Manes et al., 2007).

- iii. La región intermedia, que no está ni dominada por la influencia del lecho ni por la presencia de la lámina libre. Esta región se corresponde, en términos generales, con el subrango inercial del espectro de velocidades. Comprende la zona situada entre 0.15-0.2 z/H a 0.6 z/H y también la zona de la pared donde $z^+ > 50$. En esta región la producción es igual a la disipación $G = \varepsilon$ (Nezu y Nakagawa, 1993).

Al conjunto formado por las regiones intermedia y libre se le denomina región externa (*outer region*), y se caracteriza porque los efectos viscosos son despreciables. La *wall region* a su vez, está dividida en varias capas: la subcapa viscosa, la capa de búfer y la región logarítmica.

De manera similar, en el análisis de capas límites “canónicas” (sin gradiente de presión) generadas sobre placas lisas, el flujo se divide en tres regiones. La región viscosa, la región de solape y la región de la estela o *wake region* (López y García, 1999):

- a. La *región viscosa*, que se corresponde con la parte inferior de la región de pared de los flujos hidráulicos lisos, y está formada por la subcapa viscosa ($1 \leq z^+ \leq 5$) y por la capa de búfer ($5 \leq z^+ \leq 30$).

En la subcapa viscosa las tensiones turbulentas son despreciables en comparación con la transferencia de *momentum* vertical de tipo molecular, y la ley de velocidades es de tipo lineal. En variables internas tenemos:

$$U^+ = z^+ \quad (2.27)$$

En la capa de búfer, las tensiones turbulentas y las tensiones viscosas son importantes. En esta zona, que se encuentra en $5 < z^+ \leq 30$, la ley de velocidades no es lineal debido al efecto de las tensiones turbulentas. Aunque no existe una solución analítica para determinar el perfil de velocidades, se puede deducir una expresión teórica numérica a partir de la definición del gradiente de velocidades en la región viscosa y el modelo de Van Driest para definir la longitud de mezcla de Prandtl²⁴. La ecuación del gradiente de velocidades es, para variables internas (Nezu, 2005):

$$\frac{dU^+}{dz^+} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4l_M^+}} \quad (2.28)$$

donde l_M^+ es la longitud de mezcla de Prandtl en unidades internas que vale $l_M^+ = \kappa z^+$. Fue el propio Von Kármán quién definió el valor de la constante de proporcionalidad κ , que hoy en día lleva su nombre.

La ecuación (2.28) se obtiene a partir de la definición de la tensión tangencial en un flujo 2D uniforme (término de la derecha de la ecuación (2.50)) donde se asume la hipótesis de que la viscosidad cinemática es igual a la viscosidad de remolino o *eddy viscosity*, ν_t . Según la hipótesis de Prandtl (1925), la viscosidad de remolino vale:

$$\nu_t = l_M^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (2.29)$$

Cómo se ha comentado antes, para la determinación de la ley de velocidades en la región de búfer se debe integrar la ecuación (2.28) pero empleando, en vez de la relación de la longitud de mezcla de Prandtl, el modelo propuesto por Van Driest en 1956 (Nezu, 2005):

$$l_M^+ = \kappa z^+ \Gamma(z^+), \quad \text{con} \quad \Gamma(z^+) = 1 - \exp\left(-\frac{z^+}{B_{\nu D}}\right) \quad (2.30)$$

donde $B_{\nu D}$ es un factor de amortiguamiento (*damping function*) que modeliza la importancia de los efectos viscosos cerca del lecho y que según Van Driest vale ≈ 26 .

Una explicación más detallada de este procedimiento para la obtención de la ley de velocidades en la capa de búfer se puede encontrar en Nezu y Nakagawa (1993). Hay que señalar que el mismo fue aplicado y validado para describir el perfil de velocidades en flujos en canales abiertos hidráulicamente lisos por Nezu y Rodi (1986).

²⁴ Ludwig Prandtl: * 1875, Freising (GER); † 1953, Göttingen (GER)

Hay que señalar que en algunos textos la región de búfer se omite y sustituye por la extrapolación del perfil lineal de velocidades de la región de la pared hasta la intersección con el perfil logarítmico de velocidades, que se produce para $z^+ = 11.6 \approx \delta_v$, valor que aparece reflejado en la literatura con asiduidad. Sin embargo, en la investigación de los flujos turbulentos se debe prestar una especial atención a la misma ya que está muy relacionada con los procesos de formación vórtices y otras estructuras coherentes (Nezu, 2005).

- b. La *región de solape* (overlap region), se define como aquella en la que dejan de tener importancia las tensiones viscosas y porque existe un equilibrio local entre la producción de turbulencia y el ratio de disipación.

La región de solape se encuentra entre la zona definida por $z^+ > 30$ y por $z / \delta \leq 0.2$, donde δ es el espesor de la capa límite, que en flujo en canales abiertos es igual al calado del flujo. En esta región las velocidades de la capa límite siguen la conocida distribución logarítmica de velocidades que se obtiene de la integración de ecuación (2.28) asumiendo la hipótesis de la longitud de mezcla de Prandtl ($l_M^+ = \kappa z^+$).

Existen varias formas de expresar esta ley. La siguiente expresión se emplea habitualmente para analizar el perfil vertical en capas límites turbulentas desarrolladas sobre una placa (ver p.ej. Bigillon *et al.*, 2006):

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln z^+ + B - \Delta U^+ \quad (2.31)$$

donde B es una constante de integración que para placas lisas se estima en el entorno de 5 y ΔU^+ , que es una función del número de Reynolds granular k_s^+ , y representa el descenso en la velocidad que se produce cuando el flujo se convierte en rugoso (Raupach *et al.*, 1991).

En ingeniería fluvial, donde los flujos son mayoritariamente rugosos, es habitual no emplear la forma de la ley logarítmica anterior definiendo otras relaciones se utiliza como escala característica de longitudes la relación entre el calado y la rugosidad del grano. En el apartado 2.3.2.1 se ampliarán detalles sobre este y otros aspectos del perfil logarítmico de velocidades.

- c. La *región de la estela* (wake region) comprende el resto de la capa límite y se corresponde con la región de lámina libre en los flujos en canales abiertos. En esta zona el flujo se desvía de la ley logarítmica siguiendo la que se conoce como *velocity defect law*, que se presenta en el apartado 2.3.2.3

Aunque los límites entre las regiones de flujo en las capas límite y en canales abiertos coinciden, éstos están basado en conceptos diferentes (López y García, 1999). Además, los límites entre las diferentes regiones pueden variar ligeramente cómo se puede apreciar en la Tabla 2.2, donde se recoge la definición de las regiones del flujo liso en canales abiertos, propuesta por Pope (2000).

Como ya se ha comentado, esta estructura en capas, está íntimamente relacionada con la distribución de esfuerzos tangenciales y con las leyes de variación de velocidad, como se comprobará en los apartados 2.3 y 2.3.2 a 2.3.4, respectivamente.

Cuando se analiza el flujo en sistemas acuáticos naturales, como ríos o estuarios, se encuentran diferencias entre estos y la forma canónica de las capas límites, y también con el

flujo 2D uniforme en canales abiertos que es el más estudiado en el ámbito de la ingeniería hidráulica²⁵.

Tabla 2.2. Estructura vertical de un flujo hidráulicamente liso en canales abiertos: regiones, capas y características [δ : espesor de la capa límite, $y^+ = y \cdot u_* / \nu$ calado adimensionalizado respecto a la longitud característica de la capa límite viscosa δ_v], (Pope, 2000).

REGIÓN	POSICIÓN	LEY DE VELOCIDADES	CARACTERÍSTICAS
INTERNA	$y / \delta < 0.1$	---	Las características del flujo dependen de u_* y ν / u_* , y son independientes de U_{\max} y h
REGIÓN DE LA PARED	$y^+ < 50$	---	La contribución de la viscosidad (fricción) a las tensiones tangenciales es apreciable
SUBCAPA VISCOSA	$y^+ < 5$	Lineal	Las tensiones de Reynolds (turbulentas) son despreciables en comparación con las viscosas
REGIÓN LOGARÍTMICA O DE SOLAPE	$y^+ > 30, y / \delta < 0.3$	Logarítmica	Es la región donde se ajusta la ley logarítmica de velocidades.
CAPA DE BÚFER	$5 < y^+ < 30$	---	Zona de transición entre la subcapa viscosa y la región logarítmica
EXTERNA	$y^+ > 50; y / \delta > 0.3$	Log-wake	Los efectos viscosos son despreciables. Las características del flujo dependen de U_{\max} y h
CAPA DE SUPERPOSICIÓN	$y^+ > 50$	---	Región de superposición entre las regiones internas y externas (para elevados números de Re).

En primer lugar se puede hablar de la complejidad de la hidrodinámica del flujo en los sistemas naturales donde pueden convivir las estructuras de capa límite con capas de mezcla *-mixing layers-* originadas p.ej. en la incorporación de un afluente a un cauce principal, con flujos estratificados originados por diferencias de salinidades o concentraciones de sedimentos, con estelas originadas p.ej. por la presencia de formas de fondo o de organismos acuáticos, etc. Cómo ya se ha comentado en el Capítulo 1, existe una fuerte interacción la hidrodinámica y los ecosistemas acuáticos (Nikora, 2009).

Además, y aunque nos encontrásemos un escenario donde se pudiese clasificar el flujo como 2D uniforme (o cuasi-uniforme), existen ciertas diferencias entre la forma canónica de las capas límite y un flujo en el media acuático natural. Algunas de estas diferencias se presentan en la Figura 2.8, en particular (Nikora, 2009): (i) las capas límites en cauces fluviales y en estuarios

²⁵ Por citar algún ejemplo se puede indicar que la mayoría de las ecuaciones de transporte de sedimentos, las fórmulas para predecir los efectos de erosión local o los trabajos sobre la estructura y características de los flujos turbulentos en canales abiertos se han obtenido para estas condiciones de flujo (ver apartado 2.4.1 y posteriores).

están a menudo limitadas por el calado, es decir, no se desarrollan por completo²⁶; (ii) habitualmente se encuentran varias capas límite generadas por la fricción con el lecho y con el aire; y (iii) pueden aparecer capas límites superpuestas originadas por zonas con diferente rugosidad como áreas con organismos bentónicos.

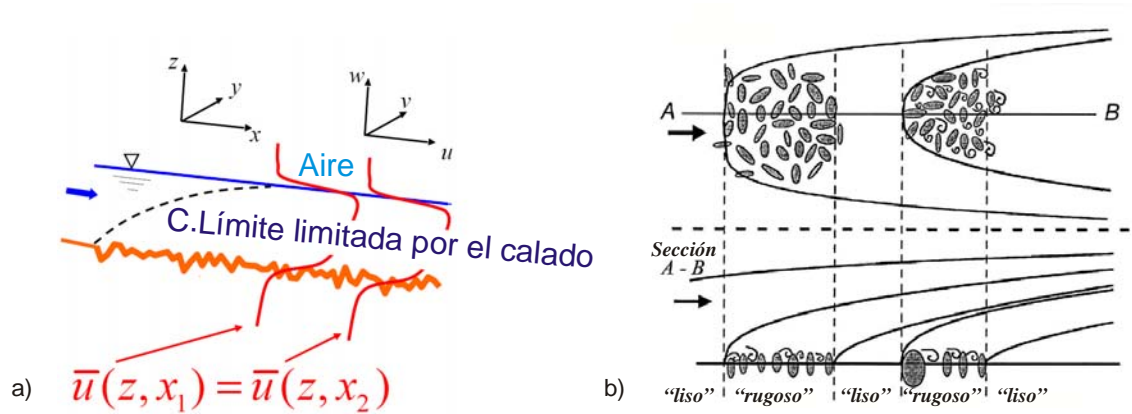


Figura 2.8. (a) Estructura doble de capa límite limitada por el calado en cauces naturales (Nikora y Rowinski, 2008) y (b), esquema de la formación de varias capas límites sobre un lecho de mejillones (Nikora et al., 2002a).

Por último, se puede hablar de la rugosidad del fondo y del ratio entre el espesor de la capa límite (o el calado) y la longitud característica de las rugosidades como otros factores determinantes de la estructura vertical del flujo, y por tanto, de la distribución de velocidades y tensiones tangenciales.

A diferencia de lo que sucede con la descripción de las capas límites sobre superficies lisas, que se han estudiado con profusión en túneles de viento desde hace muchas décadas con ayuda de anemómetros de hilo caliente y desde hace relativamente poco con soluciones DNS para números de Reynolds bajos, el conocimiento de la estructura de las capas límites turbulentas rugosas es mucho más reducido.

Esta falta de conocimiento se puede atribuir a varias razones relacionadas con la dificultad de realizar medidas cerca y en el interior de las rugosidades, la gran variedad de heterogeneidades que se producen en la zona cercana al lecho o la gran variedad de tipos de rugosidades que se pueden presentar (Raupach et al., 1991).

Relacionado con la definición de la rugosidad, uno de los problemas radica en intentar emplear la rugosidad equivalente de Nikuradse como escala característica de la misma. En flujos rugosos, al contrario de lo que sucede en flujos lisos donde la escala interna de longitudes es u_* / ν , no existe una única escala de rugosidades. Esto se debe a la gran variedad de flujos que existen, ya que p.ej. una corriente de aire sobre un bosque no se parece demasiado al flujo que se puede producir sobre un frezadero de gravas.

Por este motivo, se pueden definir varias escalas características como el diámetro del grano, la separación entre elementos en la dirección de la corriente y en la dirección perpendicular a la misma, la altura de las formas de fondo, la longitud y forma de las plantas acuáticas o de los

²⁶ Recordemos que por definición una capa límite canónica es aquella región de flujo donde la velocidad crece desde cero hasta alcanzar la velocidad libre –constante– de la corriente.

árboles en flujos atmosféricos, etc. Se puede ver que existen además rugosidades que se pueden considerar bidimensionales pero otras que deben analizarse como tridimensionales.

En la literatura se recogen algunos intentos para clasificar las rugosidades en varios tipos y así poder abordar su análisis. Una clasificación muy extendida es la propuesta por Perry *et al.* (1969) que clasificaron las rugosidades en función del tipo longitud con la que se escala la función de rugosidad ΔU^+ (o de forma análoga la rugosidad equivalente z_0 , - Raupach *et al.*, 1991). Estos autores realizaron experimentos sobre lecho de arena y sobre un lecho cubierto con pequeñas traviesas transversales de sección cuadrada con diferentes separaciones. Los flujos tipo $-k$ se producen sobre el lecho de arena y cuando la relación entre la altura de la traviesa y su separación es grande (el obstáculo está aislado) y se caracterizan porque es la altura característica del obstáculo o la del grano (k_s si se emplea la notación de Nikuradse, de ahí el nombre tipo $-k$), la que determina ΔU^+ . En los flujos tipo $-d$, es el calado h (en ocasiones denotado por d) el que determina la función de rugosidad del lecho (se produce un flujo rasante y el agua circula sobre las traviesas sin interactuar con las depresiones existentes en el lecho). Existen numerosos estudios sobre los límites en los que se producen este tipo de flujos y sobre la estructura de los mismos. Una revisión de los mismos se puede encontrar en Jiménez (2004) y más recientemente en Coleman *et al.* (2007b)

Para el análisis de otro tipo de rugosidades cómo árboles o vegetación sumergida, simulada en laboratorio con cilindros verticales, se deben emplear otro tipo de escalas de rugosidad (Raupach *et al.*, 1991; López y García, 1999).

Con respecto a los flujos que se producen en medios acuáticos como ríos o estuarios, se puede indicar que éstos se caracterizan por la presencia de un lecho rugoso, ya sea impermeable o no, formado por arenas y gravas con rugosidades de diferentes escalas. Estas rugosidades muchas veces están asociadas a la presencia de organismos vivos, ya sean vegetación acuática u organismos bentónicos. Otra característica de este tipo de flujo es que en muchos casos la sumergencia, la relación entre las escalas características de rugosidades y el calado, es muy reducida.

En estas condiciones, la estructura de de capas expuesta anteriormente se modifica. Es importante señalar que para bajas condiciones de sumergencia la zona logarítmica puede llegar a no desarrollarse. Este hecho tiene fuertes implicaciones en la determinación de la velocidad de fricción a partir del método de Clauser, basado en el ajuste de la ley logarítmica de velocidades (éste y otros métodos para la estimación de u_* se presentarán en el apartado 2.4.5).

Manes *et al.* (2007) señalan que en estas situaciones de muy baja sumergencia es muy difícil encontrar argumentos teóricos que postulen la existencia de una ley logarítmica universal. La principal razón es que las escalas características de las regiones internas y externas son válidas para todo el calado, así que los análisis dimensionales y de semejanza que se emplean en la descripción teórica de las capas límites no son válidos. Algunos autores señalan que para valores de sumergencia $H_m / \Delta < 10$ la teoría de la capa límite falla (Katul *et al.*, 2002), mientras que en la última revisión sistemática de las capas límites turbulentas recogida en el *Annual Review of Fluid Mechanics* (Jiménez, 2004), se recomienda que la hipótesis de semejanza sólo se puede aplicar para relaciones $H_m / \Delta > 40$

A continuación, se presenta la revisión de la estructura vertical del flujo propuesta por Nikora *et al.* (2001, 2007b). En función de la sumergencia se pueden definir cuatro tipos de flujos

hidráulicamente rugosos que aparecen esquematizados en la Figura 2.9. En esta zonificación se ha despreciado la influencia de la subcapa límite viscosa formada sobre la superficie de los elementos del lecho (como la presentada en la Figura 2.4).

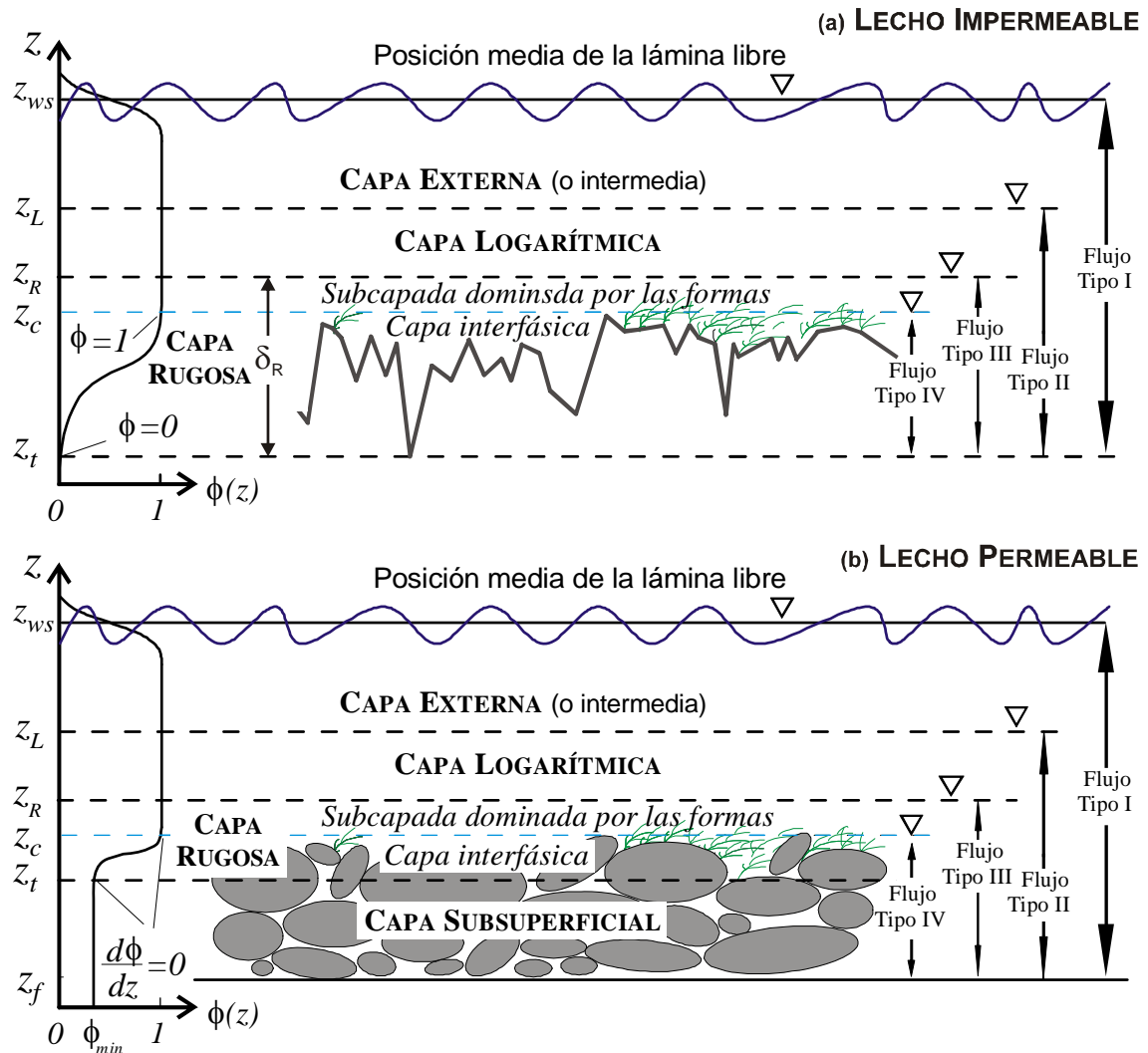


Figura 2.9. División de la estructura de flujos hidráulicamente rugosos siguiendo la metodología del doble promediado: (a) lecho impermeable y (b) lecho permeable Nikora et al. (2007b).

Los flujos de *Tipo I* se producen en situaciones de gran sumergencia relativa H_m / Δ donde H_m es el calado máximo (definido como la diferencia entre la posición del lecho de mayor profundidad z_t y la superficie del agua z_{ws}), y la rugosidad del lecho Δ ²⁷ (ver Figura 2.9). Este tipo de flujo contiene la estructura de capas más densa, diferenciándose hasta 6 capas: (i) la

²⁷ En algunas ocasiones la longitud característica de la rugosidad de lecho Δ se emplea como sinónimo de la rugosidad equivalente de Nikuradse k_s . Esta rugosidad no debe confundirse con la rugosidad característica z_0 obtenida como la distancia entre el plano $z = d$ y el plano donde la ley logarítmica de velocidades es nula (ver Figura 2.10). Para flujo bidimensional uniforme rugoso se puede aplicar la relación $k_s = z_0 / 30$ (ver ecuación (2.34)).

capa cercana a la superficie, donde la estructura del flujo está determinada por la amortiguación de la turbulencia y varios tipos de inestabilidades hidráulicas; (ii) la capa externa o intermedia, donde los efectos viscosos y los efectos dinámicos inducidos por la forma del lecho, la presencia de organismos y/o la superficie libre son despreciables; (iii) la región logarítmica, que se diferencia de la anterior porque tiene diferentes escalas de velocidades y longitudes características; (iv) la capa dominada por las formas o capa dispersiva que se sitúa bajo la región logarítmica y sobre las crestas del lecho, en esta capa las propiedades promediadas en el tiempo se ven afectadas espacialmente por la presencia de lecho; (v) la capa interfásica, que ocupa la región situada en las crestas y los senos del lecho y es una región donde el flujo de *momentum* desaparece por efectos de forma de arrastre o presión y por efectos de forma de fricción o viscosos (los términos f_{p_i} y f_{v_i} de la ecuación DANS (2.26)); y (vi) la capa subsuperficial, que aparece únicamente en lechos permeables.

Las tres primeras capas son la zona de flujo libre, sobre la que se amplía información en el apartado 2.3.2. La capa dispersiva y la interfásica forman la capa rugosa, recogida en el apartado 2.3.3. Por último, en el apartado 2.3.4 se amplía la información sobre la capa subsuperficial.

Los flujos de Tipo II se producen en situaciones con sumergencia relativa media y presentan capa subsuperficial (en lechos permeables), capa rugosa, y una zona superior logarítmica que no tiene por qué ajustarse exactamente a la ley logarítmica universal porque el ratio H_m / Δ no es suficiente grande para que ésta se desarrolle. En los flujos de Tipo III, la sumergencia relativa es muy baja y la capa rugosa se extiende hasta la superficie, mientras que en los de Tipo IV, el flujo se produce sobre un lecho parcialmente inundado, sin llegar a superar en ningún momento las crestas del fondo. A medida que la sumergencia del flujo se reduce, los esfuerzos tangenciales están dominados por las componentes originadas por el fondo, y no por las tensiones de Reynolds, llegando incluso a ser estas últimas despreciables en flujos con muy baja sumergencia (Giménez-Curto y Corniero-Lera, 2003).

Hay que señalar que es muy difícil asignar intervalos de sumergencia relativa a cada uno de los Tipos de flujo porque, como ya se ha comentado, la forma y espaciado de las rugosidades influye en la estructura del flujo. Por este motivo, un flujo con una baja sumergencia, digamos $H_m / \Delta = 10$, puede presentar una estructura de Tipo I si la forma del lecho es similar a la de las líneas de corriente, p.ej. no presenta protuberancias aisladas que favorezcan la aparición de estelas.

A continuación se presentan las características de las diferentes regiones en los flujos hidráulicamente rugosos, así como la distribución de velocidades en las mismas. Las siguientes ecuaciones consideran flujo 2D doblemente promediado, aunque también son válidas para flujos 3D con corrientes secundarias de Prandtl de segundo orden²⁸. En el caso de la región externa, existen ciertas diferencias que se comentarán en el apartado 2.3.2 y 2.4.2.

²⁸ Las corrientes secundarias de Prandtl de segundo orden, a diferencia de las corrientes de Prandtl de primer orden –asociadas al flujo en curva–, están generadas por la anisotropía y no-homogeneidad de la turbulencia (Nezu y Nakagawa, 2003). En el apartado 2.4.2 se analizará la formación y caracterización de este tipo corrientes secundarias.

2.3.2. Zona de flujo libre

Esta zona está formada por las capas externa y logarítmica. En esta región la contribución de las fuerzas viscosas y de forma a las tensiones tangenciales son despreciables. Tradicionalmente, la escala característica de longitud es el calado total h o H (medido desde el nivel de referencia $z=0$ para el origen Tipo 1 definido en el apartado 2.3.2.2). Sin embargo, en flujos con corrientes secundarias (p.ej. en canales estrechos), se emplean otras escalas como el calado en el que se produce la velocidad máxima δ_n (Detert, 2008) o el calado δ' a partir del cuál la relación entre la intensidad turbulenta de la componente principal de la velocidad $\overline{u'^2}$ o intensidad turbulenta (apartado 2.5.3), y la velocidad máxima al cuadrado es constante: $u'^2(\delta')/U_{\max}^2 \sim cte$ (Roussinova *et al.*, 2008).

La escala característica de velocidades en esta región es la velocidad máxima del flujo U_{\max} , aunque en la caracterización de las leyes de velocidades también se emplea la velocidad de corte u_* , que se puede considerar una velocidad característica para todas las zonas del flujo.

La velocidad de corte es un parámetro de vital importancia en la caracterización del flujo que se emplea para analizar la universalidad de las leyes de velocidades y otros momentos de orden superior (como intensidades turbulentas, kurtosis, etc. ver Tabla 2.3). Sin embargo, en la literatura no existe un consenso generalizado sobre la determinación de esta escala de velocidades. Cómo se explicará con detalle en el epígrafe 2.4.5, la velocidad de corte no es un parámetro que se pueda medir de manera directa (es habitual emplear métodos indirectos a partir del ajuste de leyes de velocidades o extrapolaciones del perfil de tensiones tangenciales). En caso de flujos hidráulicamente rugosos, donde los esfuerzos tangenciales no son homogéneos y la determinación de la posición del fondo no es directa, las incertidumbres asociadas a su medida y al método empleado para realizarla, son todavía mayores (Pokrajac *et al.*, 2006).

2.3.2.1. Zona logarítmica

Siguiendo el concepto de longitud de mezcla de Prandtl, el perfil vertical de velocidades en la región logarítmica (que abarca desde la capa rugosa hasta un calado aproximado de 0.15–0.20 z/H_m) se puede describir con la conocida ley logarítmica:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln z^+ + B \quad (2.32)$$

nuevamente, en la ecuación anterior el superíndice '+' señala que las variables u y z se han normalizado respecto a las variables internas u_* y v/u_* . Se supone que la constante de Von Kármán κ y la constante aditiva B son universales, sin embargo no existe mucho consenso sobre qué valor deben tomar estos parámetros. Cómo se señalaba anteriormente (ver ecuación (2.31)), en esta expresión de la ley logarítmica se ha omitido el término ΔU^+

En flujos lámina libre con gran sumergencia parece que el aceptado de κ es aproximadamente 0.41 (Nezu y Nakagawa, 1993) mientras que numerosas referencias de mecánica de fluidos clásica que lo sitúa en 0.40, valor derivado de los experimentos realizados por Nikuradse en

tuberías (Streeter y Wylie, 1980). Recientemente, el valor de κ ha sido cuestionado y los trabajos de la literatura lo sitúan entre 0.38 y 0.45 (George, 2007)²⁹.

Analizando el valor de la constante B recogida en la literatura uno se encuentra con menos consenso. El valor de B es función del número de Reynolds granular. Así, los valores tradicionales para flujos hidráulicamente lisos sitúan a B entre 4.9 y 5.1, aunque estimaciones recientes amplían el abanico hasta valores que oscilan entre 4 y 10 (George, 2007). Para flujos hidráulicamente rugosos, los valores habituales de B están en el rango 8.5 ± 0.2 (Song, 1994). Estos valores son válidos para flujo bidimensional uniforme. Cómo se verá en el epígrafe sobre la determinación de las tensiones tangenciales (2.3), la estructura del flujo, y por tanto las leyes de velocidades, se verá afectada por la presencia de corrientes secundarias y la existencia de régimen no uniforme y variable.

Evidentemente, desde un punto de vista de la función representada en la ecuación (2.32), los valores de B y κ están interrelacionados. Sin embargo, los trabajos parecen centrarse en estimar con mayor precisión el valor de la constante de Von Kármán, restándole importancia a la universalidad del valor de B .

En este trabajo se adoptará como valores de referencia $\kappa \sim 0.41$ y de $B=8.5$, con objeto de poder comparar los resultados obtenidos con los recogidos en otros trabajos similares, que emplean estos valores. En estudios de flujos hidráulicamente rugosos es habitual trabajar con una versión un poco diferente de la ecuación (2.32), que explicita la posición del plano de referencia $z = d$:

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z-d}{k_s} + B, \text{ o de forma equivalente } \frac{\langle \bar{u} \rangle}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (2.33)$$

donde z_0 es la longitud hidrodinámica característica del lecho (Nikora *et al.*, 2001; Nikora, 2007). En la expresión anterior se hace ya referencia a las variables doblemente promediadas, en el espacio y en el tiempo.

Cómo ya se ha comentado, el valor de d suele situarse entre $0.15 - 0.3 d_{50}$ (Nezu y Nakagawa, 1993). Respecto a la rugosidad equivalente de Nikuradse, los trabajos encontrados para lechos de arena y grava dan valores para k_s de entre 1 y 3 veces el diámetro medio del sedimento (Bigillon *et al.*, 2006; García, 2008; Rodríguez y García, 2008). No existe un consenso claro sobre qué valor emplear ya que el rango de variación es bastante importante especialmente para arenas gruesas y gravas, como se puede ver p.ej. en el capítulo 6 de Julien (1994) donde se pueden encontrar más valores y referencias.

Por último, las dos expresiones recogidas en (2.33) se pueden relacionar a través de la siguiente expresión cuando el lecho es muy rugoso y no existe subcapa límite viscosa $k_s / \delta_v \gg 1$, como sucede en la mayoría de los ríos aluviales (García, 2008):

$$z_0 = 30/k_s \Rightarrow \langle U^+ \rangle = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z-d}{z_0} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{30(z-d)}{k_s} \quad (2.34)$$

²⁹ En este trabajo desarrollado por W. George se determina el valor de κ a partir de los resultados de DNS de flujos en tuberías ($\kappa \sim 0.43$) y a partir de los resultados experimentales en túnel de viento ($\kappa \sim 0.38$) para el caso del desarrollo de una capa límite sobre una placa. Este autor defiende que el valor mayormente empleado en la literatura ($\kappa \sim 0.41$) es un compromiso entre ambos tipos de flujo.

Para flujos de Tipo II (con un sumergencia intermedia) la ecuación anterior se puede emplear para describir el flujo en esta región de flujo, aunque en este tipo de escenarios se requiere cierto análisis para asegurar la validez de dicha expresión (Nikora, 2007).

En este tipo de flujos se ha constatado que el valor de la constante de von Kármán tiende a 0.41 a medida que la sumergencia crece, pero para valores muy bajos de sumergencia (digamos $H_m / \Delta < 3$), el valor de κ puede alcanzar valores incluso superiores a la unidad (Bayazit, 1976; Pokrajac *et al.*, 2006).

2.3.2.2. Determinación del plano de referencia $z=0$

La ecuación (2.32) y las ecuaciones (2.33) y (2.34), ambas válidas para la zona logarítmica, contienen explícitamente o implícitamente el valor de la cota d que se corresponde con el origen del perfil logarítmico de velocidades. Ya se ha comentado que la determinación de este plano de referencia no es una tarea trivial en flujos hidráulicamente rugosos sobre lechos irregulares, como los aluviales. En lechos lisos o incluso en lechos rugosos regulares (como los constituidos por arenas de tamaño unimodal o por esferas artificiales) este plano se ubica por debajo de la parte superior del lecho a una distancia de entre 0.15 a 0.30, habitualmente 0.2, veces el diámetro característico de los elementos que conforman el lecho (ver Figura 2.4).

Para los lechos rugosos irregulares, se pueden reconocer al menos tres tipos de orígenes "hidrodinámicos" (Nikora *et al.*, 2002b):

- El *origen de tipo 1*, que se corresponde con el nivel de referencia empleado para determinar los calados y las tensiones tangenciales. Empleando la metodología del doble promediado la posición de este plano se encuentra entre los puntos de mayor y menor elevación del lecho, en particular en la posición media del lecho (Nikora *et al.*, 2001).

Ya se ha comentado en el apartado 2.2.2 (pág 2.13) que la función de rugosidad de lecho ϕ_s se debe interpretar como una función de porosidad. Por encima de los elementos que conforman el fondo, el valor de esta función es unitario. Cuando el lecho es impermeable, o cuasi-impermeable³⁰, el valor de ϕ_s es cero por debajo de los senos del lecho. Si el lecho es permeable³¹, y el flujo intersticial es significativo, el valor de la función de rugosidad no llega a cero, sino que alcanza un valor mínimo ϕ_{min} como se refleja en la Figura 2.9.

En cualquier caso, entre los valores máximo y mínimo, la función de rugosidad se define como la función de probabilidad acumulada (función de distribución de probabilidad) de las elevaciones o cotas del lecho. De este modo, para lechos impermeables se puede determinar la posición del plano $z=0$ de forma inmediata como $\phi(z) = 0.5$.

³⁰ Este es el caso de superficies granulares con partículas suficientemente pequeñas para que el flujo en la zona intersticial sea despreciable. Un ejemplo típico de este tipo de superficies son los lechos cohesivos o lechos aluviales arenosos con formas de fondo (p.ej. dunas) donde el tamaño del grano D es mucho menor que la longitud característica de la rugosidad de fondo Δ : $D / \Delta \ll 1$.

³¹ Un ejemplo típico de lecho permeable lo conformaría un fondo de grava unimodal, sin partículas intersticiales que lo colmaten.

- El origen de tipo 2, que se corresponde con el origen de la ley logarítmica de velocidades, que como se puede apreciar en la Figura 2.10, no coincide con el plano donde la velocidad es nula.

El origen de tipo 3, que se puede definir para la capa de flujo rugosa en las distribuciones de velocidades promediadas espacialmente. Este origen puede determinarse como la posición de los senos (parte inferior) del lecho o la posición superior de la capa rugosa, que nunca puede estar por debajo de las crestas del lecho, pero sí por encima (Nikora *et al.*, 2002b)

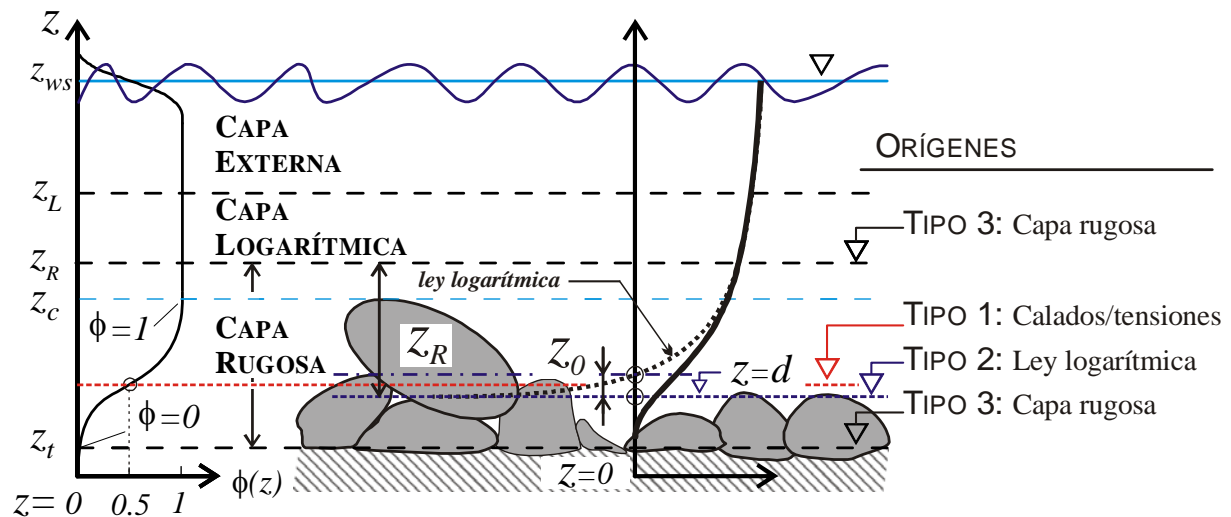


Figura 2.10. Definición de los diferentes orígenes del lecho: esquema del lecho y función de forma del fondo y perfil de velocidades. A la derecha se presenta la definición geométrica de los diferentes orígenes.

Estos tres orígenes no tienen necesariamente por qué coincidir, como habitualmente se asume en la literatura. En la Figura 2.10 se presenta un esquema con la definición de los mismos.

La justificación de los orígenes de tipo 1 y 3 es bastante sencilla y atiende a parámetros geométricos así como a consideraciones de balances de masa y cantidad de movimiento (Nikora *et al.*, 2001). La posición del origen de tipo 2, en lechos irregulares, no se conoce a priori y por tanto, debe ser inferida.

El procedimiento habitual consiste en ajustar de alguna manera, p.ej. mediante mínimos cuadrados, las variables u_s , d , z_0 de la ecuación (2.33) evaluando la bondad del ajuste a partir de algún estadístico, como el coeficiente de correlación R^2 . Este método no tiene ninguna base física, y además, su aplicación puede llevar a estimaciones incorrectas de estos parámetros (ver p.ej. Dancey y Diplas, 2008).

En la práctica, el plano de desplazamiento cero (origen de tipo 2), se encuentra entre las crestas y los senos del lecho, y a medida que el flujo es más energético y la densidad de los elementos del lecho es menor, se desplaza hacia abajo. El valor de z_0 indica la posición a la que el perfil de velocidades logarítmico es nulo, y depende de la rugosidad del lecho (Nikora *et al.*, 2001).

Nikora *et al.* (2002b) analizaron varias metodologías para estimar el valor del plano de desplazamiento nulo ($z=d$). En este trabajo se sugiere que este plano se corresponde con el cual los remolinos o movimientos del flujo de mayor escala "notan" la presencia del fondo. Para

ilustrar este fenómeno los autores realizan una brillante analogía automovilística representada en la Figura 2.11. Primero uno debe imaginar que las ruedas de un coche son los remolinos que ruedan sobre la superficie de la carretera, en este caso el lecho.

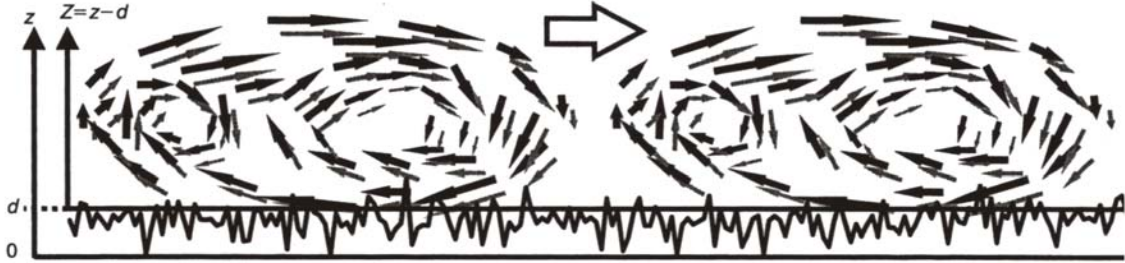


Figura 2.11. Esquema del movimiento de los remolinos con escala del calado del flujo sobre el plano de desplazamiento nulo (Nikora et al., 2002b).

Cuando uno rueda a gran velocidad en un día de lluvia sobre un asfalto liso es probable que se produzca *aquaplaning*. Siguiendo el símil, este sería el caso de los vórtices "rodando" sobre la subcapa límite viscosa en un flujo hidráulicamente liso. El otro extremo sería la conducción sobre una pista de cubierta de grava. En este caso, el neumático rodaría parcialmente "sumergido" en la carretera, y si buscásemos el plano de rodadura, éste se encontraría en algún lugar entre las crestas y los senos de la pista.

Para determinar los parámetros de la ecuación (2.33), Nikora et al. (2002b) proponen emplear la siguiente relación para estimar los valores de u_* y d (integrando esta ecuación se llega a la ley logarítmica de velocidades expresada anteriormente):

$$\frac{d\langle\bar{u}\rangle}{dz} = \frac{u_*}{\kappa(z-d)} \Rightarrow \left(\frac{d\langle\bar{u}\rangle}{dz}\right)^{-1} = \frac{\kappa}{u_*}z - \frac{\kappa}{u_*}d \quad (2.35)$$

Así, identificado términos entre (2.35) y la ecuación de una recta $y(z) = a \cdot z - b$ se tiene que $a = \kappa/u_*$, $b = (\kappa/u_*)d$ y $d = b/a$. La ecuación anterior se obtiene al aplicar el modelo de mezcla de Prandtl para una distancia $z - d$ genérica $l = \kappa(z - d)$ en la ecuación a la definición de velocidad de fricción:

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_*^* \approx l \frac{\partial\langle\bar{u}\rangle}{\partial z} = \kappa(z-d) \frac{\partial\langle\bar{u}\rangle}{\partial z} \quad (2.36)$$

Es importante que para aplicar este método correctamente se dispongan de un gran número de medidas en la región logarítmica del flujo. También es conveniente aplicar algún tipo de filtro y/o interpolación de la función $d\langle\bar{u}\rangle/dz$, para reducir la incertidumbre en la estimación de estos parámetros.

En estudios de corrientes de aires sobre vegetación arbustiva o bosques es habitual determinar d con la aproximación de la absorción de momento. Según esta aproximación, el centroide – punto de aplicación- de la fuerza de arrastre coincide con la posición del plano de desplazamiento nulo (Raupach et al., 1991).

2.3.2.3. Zona externa

Los datos experimentales han demostrado que la aproximación de la longitud de mezcla de Prandtl (la ley logarítmica de velocidades) sólo es válida en la región logarítmica del flujo, por debajo de calados inferiores a $0.2 \cdot h$. Por este motivo, la ecuación (2.32) debe ser modificada para que funcione en la zona externa.

Independientemente del tipo de flujo (liso o rugoso), la corrección que se emplea fue propuesta por Coles (1956), quien propuso la adición de una función de estela (*wake function*) a la ley logarítmica de velocidades:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln z^+ + B + w(z/h) \quad (2.37)$$

donde h es el calado (denotado anteriormente como H_m) y $w(z/h)$ es la función de estela. Aunque existen numerosas variantes de la función de estela y de las leyes de velocidades para la región externa (ver p.ej. Raupach *et al.*, 1991), la más empleada es y sigue siendo la enunciada por Coles:

$$w(z/h) = \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2\left(\frac{\pi z}{2h}\right) \quad (2.38)$$

De las ecuaciones (2.37) y (2.38) se deriva la *velocity defect law* o *log-wake law*:

$$u^+ - U_{\max}^+ = -\frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{h}\right) + \frac{2\Pi}{\kappa} \cos^2\left(\frac{\pi z}{2h}\right) \quad (2.39)$$

donde Π es el parámetro de estela de Coles y se puede interpretar como una medida de la desviación de las velocidades respecto a ley logarítmica. Coles fijó el valor de Π en 0.55, tras sus trabajos en capas límites desarrolladas en sobre placas lisas y para números de Reynolds elevados.

Sin embargo, para flujo en canales abiertos, los valores registrados en la literatura para este parámetro son positivos o negativos y dependen, entre otros factores, del número de Reynolds (sigue una relación directa), del tipo de flujo (liso o rugoso) o del tipo de régimen (uniforme, acelerado o decelerado), (ver entre otros Nezu y Nakagawa, 1993; Wang *et al.*, 2001; Termini y Greco, 2006; Roussinova *et al.*, 2008).

En canales abiertos con flujo 2D uniforme Nezu y Rodi (1986) encontraron valores para Π entre 0 y 0.22, Coleman (1981) definió el valor medio de Π en 0.19, mientras que Cardoso *et al.* (1989) o Kironoto y Graf (1994) dan valores entre -0.77 y +0.02 o entre -0.08 y + 0.15 para lechos lisos y de gravas respectivamente.

Por tanto, en la literatura queda demostrado experimentalmente que existen diferencias entre el comportamiento del flujo en la región externa de los flujos tipo capa límite turbulenta (ya sea liso o rugoso) y el flujo en canales abiertos. Estas diferencias se deben atribuir a dos circunstancias: la existencia de la superficie del agua y la presencia de las paredes laterales del canal, ya que ambas condiciones confinan el flujo.

Los laterales, y en particular relaciones de aspecto B/H bajas, favorecen la aparición de corrientes secundarias. Por efecto de estas corrientes secundarias, la velocidad máxima no se produce en la lámina libre (es el efecto conocido como *dip phenomenon*). Como se discutirá con detalle en el apartado 2.4.2, este fenómeno no es significativo cuando las medidas se

realizan en el centro del canal y las relaciones de aspectos son altas. Nezu y Nakagawa (1993) señalan que este ratio se sitúa en $B/H > 5$, aunque otros autores dan valores un poco inferiores ($B/H > 3.5$, según Song, 1994). En otros trabajos se señala que existe una zona de transición entre canales estrechos, $B/H < 5$, con corrientes secundarias, y canales anchos, $B/H > 10$, sin corrientes secundarias originadas por la fricción con las paredes (Rodríguez y García, 2008).

La presencia de la lámina libre evita la formación de una región de velocidad constante, como en un flujo de capa límite, y además amortigua³² las fluctuaciones en la dirección vertical w' , modificando las características de la turbulencia en la región más próxima a la superficie.

Como ya se ha comentado al principio de este epígrafe, cuando aparecen corrientes secundarias, algunos autores proponen emplear el calado en el que se produce la máxima velocidad δ_h o el calado δ' a partir del cual la intensidad turbulenta u'^2 es constante. De este modo, la ecuación (2.39) se puede reescribir, empleando la metodología del doble promediado, como:

$$\begin{aligned} \frac{\langle \bar{u} \rangle - \langle \bar{U}_{\max} \rangle}{u_*} &= -\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{h} \right) + \frac{2\Pi}{\kappa} \cos^2 \left(\frac{\pi z}{2h} \right), & o \\ \frac{\langle \bar{u} \rangle - \langle \bar{U}_{\max} \rangle}{u_*} &= -\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{\delta_h} \right) + \frac{2\Pi}{\kappa} \cos^2 \left(\frac{\pi z}{2\delta_h} \right), & o \\ \frac{\langle \bar{u} \rangle - \langle \bar{U}_{\max} \rangle}{u_*} &= -\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{\delta'} \right) + \frac{2\Pi}{\kappa} \cos^2 \left(\frac{\pi z}{2\delta'} \right) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Para terminar, un simple vistazo a esta ecuación nos señala que las escalas características de velocidad y longitud en la región externa son U_{\max} y el calado (h, δ_h, δ') .

2.3.3. Zona rugosa

La zona rugosa está conformada por la subcapa dominada por las irregularidades del lecho (*form induced sublayer*) y la subcapa interfásica (*interfacial sublayer*). Las escalas que dominan esta zona son la velocidad de corte u_* y un juego de escalas espaciales que caracterizan el lecho: k_s , d , el diámetro del grano, la forma del grano, los espacios intersticiales,...

La capa dominada por las formas se ubica desde la parte superior del lecho hasta una distancia a la que las estelas formadas por la separación de flujo que se produce sobre el mismo dejan de influir en los esfuerzos tangenciales. Se puede decir que esta zona termina cuando se alcanza el máximo en las tensiones de Reynolds (Nikora *et al.*, 2002b; Pokrajac *et al.*, 2008). Un orden de magnitud de la posición superior para flujos hidráulicamente rugosos fue establecida por Rapauch *et al.* (1991) en 4Δ .

La subcapa interfásica se encuentra entre la parte superior e inferior del lecho $\phi_{\min} \leq \phi(z) < 1$. Para los flujos sobre lechos rugosos, como arenas o gravas, Nikora (2007) indica que la ley de velocidades en esta capa puede ser lineal o exponencial. Existe otra alternativa más, que es

³² en este sentido, no funciona como el lecho, completamente rígido, que las suprime totalmente

una ley de velocidades constante, pero que se suele aplicar a flujos con elementos rugosos verticales donde la turbulencia es dominada por la separación de flujo y las estelas que se producen tras estos elementos. El caso típico son cilindros verticales o vegetación total o parcialmente sumergida en el flujo (Nikora *et al.*, 2007b).

La ley exponencial se puede aplicar cuando el flujo de momento descendente domina sobre las fuerzas gravitatorias (Nikora *et al.*, 2001):

$$\langle \bar{u} \rangle(z) = \langle \bar{u} \rangle(z_c) \exp[\beta(z - z_c)] \quad (2.41)$$

donde $\langle \bar{u} \rangle(z_c)$ es la velocidad doblemente promediada a la altura de la parte superior del lecho z_c y β es un parámetro de ajuste.

El modelo lineal funciona bien para lechos donde la función de fondo ϕ es monótona decreciente y la fuerza de arrastre crece a medida que nos acercamos a la parte inferior de lecho. Este es el caso de lechos de arena o gravas “impermeables” (Detert, 2008).

Este modelo se describe matemáticamente como (Nikora *et al.*, 2001):

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle(z) - \langle \bar{u} \rangle(z_c)}{u_*} = \frac{(z - z_c)}{l_c} \quad (2.42)$$

donde l_c es la longitud de corte³³ que caracteriza el flujo en la capa interfásica:

$$l_c = \frac{\langle \bar{u} \rangle(z_c)}{\left(\frac{d\langle \bar{u} \rangle}{dz} \right)_{z_c}} = \delta \left(\frac{u_*}{\langle \bar{u} \rangle_{z_c}} \right) \quad (2.43)$$

y δ sería el espesor de la capa interfásica.

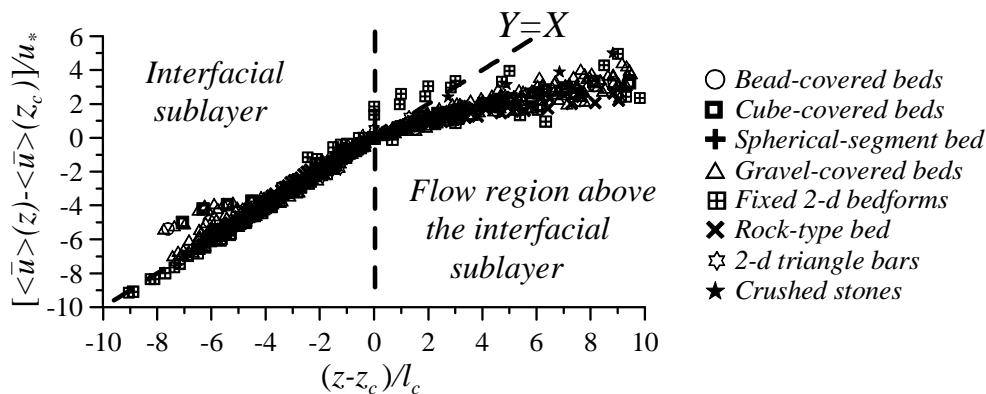


Figura 2.12. Distribución vertical de la velocidad para varios tipos de flujo y rugosidades en coordenadas $[\langle \bar{u} \rangle(z) - \langle \bar{u} \rangle(z_c)]/u_* = f[(z - z_c)/l_c]$ (los datos se describen en Nikora *et al.*, 2004). Las desviaciones de los datos respecto a la recta $Y=X$ son consistentes con la ley exponencial (2.41).

³³ También denominado espesor de la vorticidad (Nikora y Rowinski, 2008).

En principio, las ecuaciones (2.41) y (2.42) podrían aplicarse a flujos que tengan desde poca a muy gran sumergencia (Tipos I, II y III). Este hecho se manifiesta en la Figura 2.12. En flujos en ríos o en escenarios reales es habitual encontrar flujos más complejos en la capa interfásica, que se deben describir con la ayuda de los tres modelos anteriormente citados (Nikora *et al.*, 2001).

En la capa dominada por las formas no se conoce con exactitud cuál es el perfil de velocidades en los Flujos Tipo I y II. Existen algunos trabajos en túnel de viento que señalan que en esta capa el perfil se ajusta a ley logarítmica de velocidades, aunque otros sostienen que no es de este tipo (Nikora *et al.*, 2007b).

Nikora *et al.* (2004) sugieren que en algunos flujos rugosos, como lechos de sedimentos, la capa dominada por las formas es una zona de transición entre la capa logarítmica y la interfásica. De este modo, se puede eliminar la capa dominada por las formas y, por tanto, la capa interfásica alcanza hasta la altura de la zona con un perfil de velocidades logarítmico, abarcando todo el espesor de la capa rugosa δ_R . Valores típicos son $\delta_R = (0.5 - 2)\Delta$. Para estos flujos sobre lechos *impermeables*, la ecuación (2.42) se puede simplificar como (Nikora *et al.*, 2001):

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle(z)}{u_*} = C \frac{z_R}{\delta_R} \quad (2.44)$$

donde z_R es la coordenada vertical del espesor de la capa rugosa (Figura 2.9), tomando como origen de referencias el plano de desplazamiento nulo de ley logarítmica (ver Figura 2.10). El valor de la constante C , determinado de un número reducido de experimentos, es $C \approx (5.3 - 5.6)$ para lechos de grava y $C \approx 8.5$ para lechos de arena uniforme.

La expresión anterior también puede incluir una constante para tener en cuenta el flujo que se infiltra si estamos en lechos permeables (Detert, 2008):

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle(z)}{u_*} = C \frac{z_R}{\delta_R} + C_\phi \quad (2.45)$$

Para concluir, se puede señalar que para el caso de flujos hidráulicamente lisos se puede asimilar el concepto de subcapa límite viscosa al de la capa interfásica, mientras que el papel de la capa dominada por las formas se puede asimilar al de la capa de búfer (ver Tabla 2.2).

2.3.4. Capa subsuperficial

La capa subsuperficial existe únicamente en aquellos flujos que transcurren sobre lechos permeables, y se identifica cuando se alcanza un valor mínimo no nulo para la función de rugosidad de fondo (ver Figura 2.9). La velocidad del flujo en esta capa es prácticamente constante. Las escalas características son la velocidad de corte y el diámetro del poro d_f , relacionado con la permeabilidad del medio k_f a través de la siguiente expresión (Breugem, 2004):

$$(d_f)^2 = K = \frac{\nu k}{g} \quad (2.46)$$

donde K es la permeabilidad intrínseca del medio.

Aunque se han realizado un número importante de estudios experimentales y numéricos para analizar el intercambio de flujo entre medios porosos y en lámina libre, la mayoría son para flujos laminares y muy pocos son específicos para flujo sobre lechos de grava (Detert, 2008).

En los trabajos desarrollados en esta tesis, la influencia de este tipo de flujo es nula ya que los lechos analizados se pueden considerar impermeables con los movimientos intersticiales son despreciables. Por este motivo no se describirá con detalle este tipo de flujos. Una revisión de los aspectos teóricos se puede encontrar por ejemplo en Breugem (2004) o en Pokrajac y Manes, (2008). Como orden de magnitud de la velocidad del flujo subsuperficial en lechos de grava se puede señalar la siguiente relación obtenida por Detert *et al.* (2007) en unos ensayos de flujo sobre grava en la que se realizaron medidas con un sistema tridimensional de seguimiento de partículas (3D PTV):

$$\frac{\langle u \rangle}{u_*} < 0.25 - 1 \quad (2.47)$$

2.4. TENSIONES TANGENCIALES EN FLUJOS EN LÁMINA LIBRE

En los flujos turbulentos en lámina libre, la transferencia de *momentum* está directamente relacionada con las fuerzas de arrastre y de fricción generadas en el perímetro mojado. Como se verá a continuación, esta interacción también determina la forma del perfil de velocidades.

Por este motivo, para conocer la estructura de este tipo de flujos es necesario tener un conocimiento del comportamiento del flujo de cantidad de movimiento. Para ello, se analizarán a continuación la distribución de las diferentes componentes de las tensiones en flujos bi- y tridimensionales así como flujos uniformes y variados. Este análisis se realizará desde la perspectiva tradicional de la descomposición de Reynolds, aunque también se hará hincapié en introducir los nuevos términos que aparecen cuando se aplica la metodología del doble promediado.

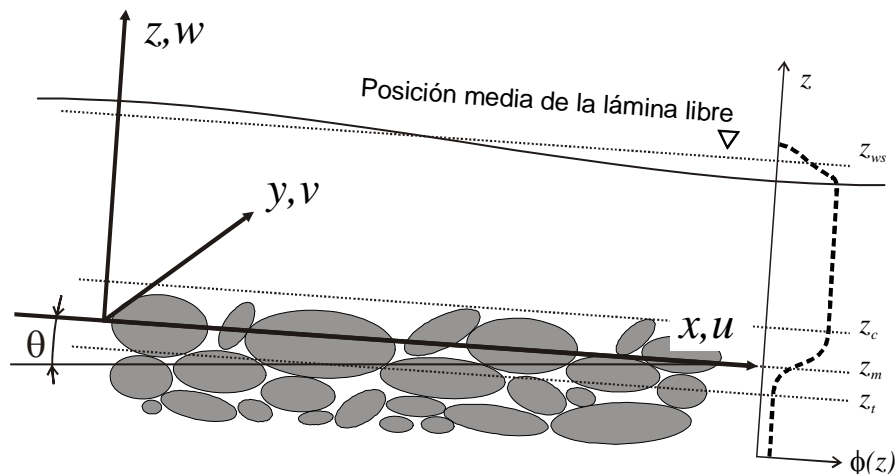


Figura 2.13. Definición del sistema de referencia para espacio y velocidades empleado en este capítulo y en los posteriores.

Para este análisis se mantendrá el sistema de referencias del apartado anterior, que se esquematiza en la Figura 2.13. La dirección de la corriente es paralela al eje x , mientras que los calados crecen con el eje z . La dirección y es perpendicular al plano xz , situado en el centro del flujo (p.ej. canal o cauce de un río), y su sentido está definido por la regla de la mano derecha.

La posición del plano de referencia $z=0$ se ha discutido en el apartado 2.3.2.2 y resumiendo se puede decir que depende del tipo de flujo y parámetro que se pretenda analizar. Salvo que se haga una indicación contraria, la posición $z=0$ vendrá dada por la cota z_m , definida geoméricamente como la posición media entre los senos y las crestas del lecho. El origen de referencias $x=0$ se situará en un punto de interés como p.ej. el centro de la sección de medida o su extremo aguas arriba. Este es el sistema que se empleará en los capítulos posteriores de esta Tesis Doctoral.

2.4.1. Flujo 2D uniforme

En primer lugar se presentará el escenario de flujo bidimensional para régimen permanente y uniforme que se produce en un canal recto y ancho, en la zona central del mismo (lejos del efecto de corte que provocan las paredes laterales sobre el flujo.). En esta situación, que es la más sencilla y más estudiada en la literatura, el flujo es independiente de la dimensión lateral y del mismo ($v = 0$), y en lechos homogéneos espacialmente, que son los que se analizan en el marco de las ecuaciones de N-S, también de la posición longitudinal x . Por este motivo, los términos $\partial(\dots)/\partial x = 0$. Además, como estamos en régimen permanente tenemos que $\partial(\dots)/\partial t = 0$.

En este escenario, las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento (o dinámicas) del juego de ecuaciones de RANS –ecuación (2.14)– se reducen a las ecuaciones sobre los ejes x y z (ver p.ej. Aberle *et al.*, 2008):

$$0 = gS_b + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\tau_{xz}} - \overline{u'w'}) = \rho gS_b + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \right) \quad (2.48)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial z} \quad (2.49)$$

donde S_b es la pendiente del lecho, definida como $S_b = dz/dx = \tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta$.

Si se integran ambas ecuaciones en el eje z , y se toman como condiciones de contorno que en la superficie ($z = H$) las tensiones tangenciales media y las de Reynolds, así como el término de presiones son nulos se llega a:

$$\rho g(H - z)S_b = \nu \frac{\partial}{\partial z} (\overline{u}(z)) - \rho \overline{u'w'}(z) \quad (2.50)$$

$$\overline{p} = \rho g(H - z) \quad (2.51)$$

La ecuación (2.51) indica que la distribución de presiones en régimen uniforme y permanente es hidrostática. La expresión (2.50) señala que la tensión tangencial media a una altura cualquiera sobre un elemento de fluido es igual al término de presiones. Dado que estamos en un flujo 2D donde no hay efectos de fricción con las paredes laterales del canal³⁴, la tensión tangencial sobre el lecho τ_0 es constante sobre la dimensión lateral del flujo y :

³⁴ Esta consideración es equivalente a señalar que el $R_H \approx h$, hipótesis muy empleada en la derivación de magnitudes y leyes en hidráulica de canales abiertos e ingeniería fluvial.

$$\tau_0 \equiv \overline{\tau_{xz}}(z=0) = \rho g H S_b \quad (2.52)$$

La ecuación (2.52) no es más que un balance de fuerzas entre la fuerza gravitatoria que posee la masa de fluido en una vertical y la reacción, el rozamiento, que se produce en el contacto fluido-lecho.

Otro aspecto fundamental de la ecuación (2.50) es que señala que las tensiones tangenciales siguen una distribución lineal con el calado. Cómo las contribuciones del término viscoso de las tensiones se reducen notablemente a partir del calado correspondiente al espesor de la subcapa límite viscosa ($z^+ > 10$) -Figura 2.14- y se puede despreciar a partir de $z^+ \approx 30$, se tiene:

$$\overline{\tau_{xz}} = \nu \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} - \overline{\rho u' w'} \approx -\overline{\rho u' w'} = \rho g H S_b \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (2.53)$$

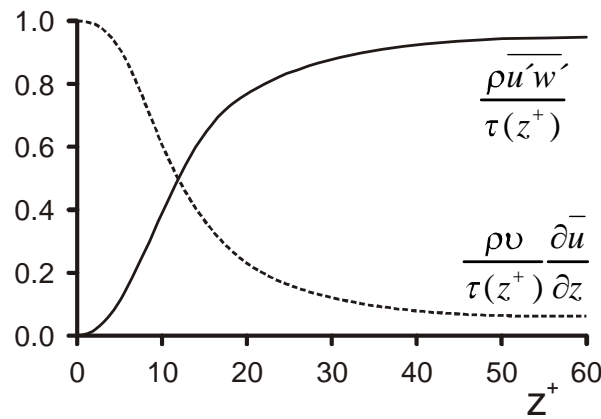


Figura 2.14. Contribución a la tensión tangencial total de los términos viscosos y de Reynolds. Datos de DNS de un flujo en capa límite desarrollado sobre una placa lisa para un $Re=13750$ (Kim et al., 1987; extraído de Pope, 2000)

Además, y por definición, la velocidad de corte u_* es aquella velocidad representativa de la transferencia de cantidad de movimiento en la interfase del fluido con el contorno sobre el que fluye ($\tau_0 \equiv \rho u_*^2$). Aplicando esta definición e introduciendo (2.52) en (2.53) se llega a la conocida relación lineal entre las tensiones de Reynolds con la tensión tangencial sobre el lecho.

$$\tau \approx -\overline{\rho u' w'} = \rho g H S_b \left(1 - \frac{z}{H}\right) = \rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) = \tau_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (2.54)$$

Debido a que la determinación experimental directa de las tensiones tangenciales es difícil, se ha aprovechado la relación de linealidad de las tensiones de Reynolds en la región de flujo alejada de los contornos para extrapolar la ley de la ecuación (2.54) hasta el fondo, y así obtener la tensión tangencial total que actúa sobre el perímetro mojado (§2.4.5).

Desde la perspectiva del doble promediado, las ecuaciones de partida del análisis de las tensiones tangenciales son ahora las ecuaciones de N-S doblemente promediadas o

ecuaciones DANS recogidas en (2.26). Para la situación de flujo 2D uniforme y permanente la ecuación dinámica en la dirección del eje x se puede escribir como (Manes *et al.*, 2007)³⁵:

$$\phi \rho g S_b = f_x - \frac{\partial \phi \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2.55)$$

donde por simplicidad se han expresado las tensiones tangenciales totales medias sin la barra superior y que en el marco del doble promediado son:

$$\tau_{xz} = \rho \left[\frac{\nu}{\phi} \left\langle \frac{\partial \phi \langle \bar{u} \rangle}{\partial z} \right\rangle - \langle \bar{u}'w' \rangle - \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle \right] \quad (2.56)$$

y el término f_x es igual a la suma de las fuerzas de arrastre por unidad de volumen relacionadas con las fuerzas de presión f_p y f_v con las fuerzas viscosas (ver ecuación (2.26)). Como se ha comentado, estos esfuerzos aparecen únicamente por debajo del nivel de las crestas del lecho, ya que actúan como sumideros del flujo de cantidad de movimiento.

Entonces, por encima del nivel de las crestas del lecho (z_c) tenemos que $f_x = 0$ y $\phi = 1$. Además, lo suficientemente alejado de este nivel de referencia, fuera de la región rugosa del flujo ($z > z_R$, Figura 2.9), las perturbaciones espaciales son nulas y la tensión de forma $-\rho \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle \approx 0$, por lo que la ecuación de la tensión tangencial total (2.56) es equivalente a la ecuación de la tensión tangencial total derivada de las ecuaciones RANS (ec. (2.53)).

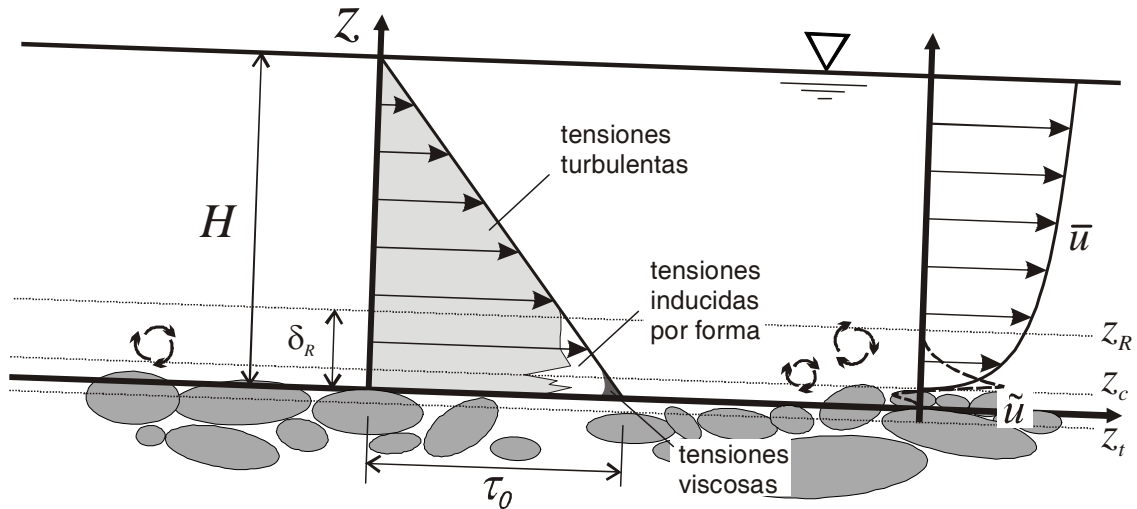


Figura 2.15. Distribución vertical de las tensiones y velocidades en un flujo 2D uniforme y permanente (elaboración propia a partir de Detert, 2008).

Sin embargo, en la región cercana al lecho y por debajo de las crestas del mismo, las tensiones de forma contribuyen de forma muy significativa a las tensiones totales (Figura 2.15). Por este motivo, la distribución de tensiones de forma $-\rho \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$ se suele emplear para definir el límite

³⁵ La versión general de la ecuación que define la tensión tangencial sobre el lecho se puede encontrar en Nikora *et al.* (2007a), ecuaciones (24) y (25).

superior de la capa rugosa z_R , y con éste el espesor de esta capa $\delta_R = z_R - z_f$. Además, se ha demostrado analítica (Giménez-Curto y Corniero-Lera, 1996) y experimentalmente (p.ej. Nikora *et al.*, 2001; Aberle *et al.*, 2008; Detert, 2008) que a medida que el flujo tiene mayor sumergencia relativa la importancia de las tensiones de forma se incrementa.

Otra forma de definir el espesor de la capa rugosa es a partir de la varianza de la perturbación espacial de las velocidades $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$, que es otra medida de la heterogeneidad espacial del flujo (Nikora *et al.*, 2004; Aberle *et al.*, 2008). Esta varianza es el análogo del marco DAM a la intensidad turbulenta de la velocidad en la dirección de la corriente. En el apartado 2.5.3 se podrá encontrar una definición de éste y otros parámetros empleados para caracterizar la turbulencia (sobre la que se hablará en el apartado 2.4, pág. 2.73).

2.4.2. Flujo 3D uniforme en canales rectos

2.4.2.1. Influencia de las corrientes secundarias

En las consideraciones del apartado anterior no teníamos en consideración la dimensión lateral del flujo y , ya que no habíamos considerado la influencia de la presencia de las paredes del canal. Sin embargo, cómo se comentará a continuación, las paredes juegan un papel importante en la estructura del flujo, o al menos, cerca de las mismas.

Para tener en cuenta la presencia de las paredes a la hora de definir la tensión tangencial sobre el contorno por el que circula el flujo (lecho y paredes) debemos sustituir en la ecuación (2.52) el calado H por el radio hidráulico de la sección ($R_H = A / P_m$). Así, la tensión tangencial sobre el contorno τ_0 será la media espacial de la tensión sobre el perímetro mojado:

$$\tau_0 = \langle \overline{\tau_0} \rangle_{P_m} = \rho g R_H S_b \tag{2.57}$$

De este modo, la tensión tangencial sobre el contorno $\overline{\tau_0}$ será la suma de la tensión tangencial sobre el lecho $\overline{\tau_b} \equiv \langle \overline{\tau_0} \rangle_b$ y la tensión tangencial sobre las paredes $\overline{\tau_w} \equiv \langle \overline{\tau_0} \rangle_w$.

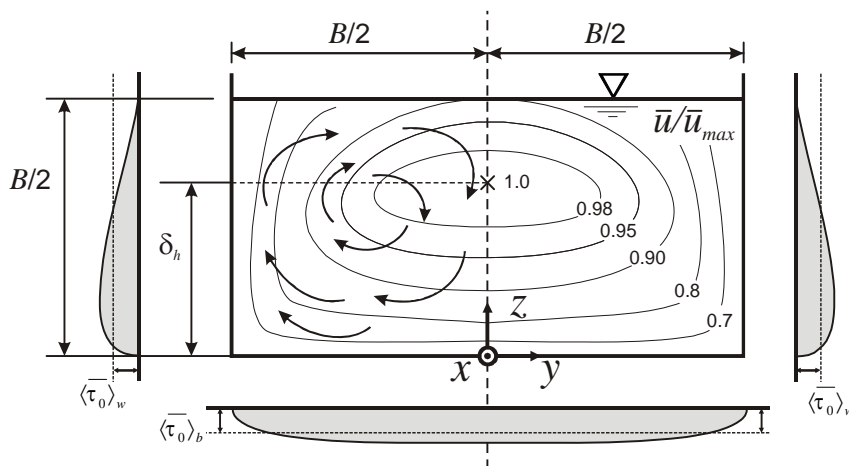


Figura 2.16. Distribución ideal de las tensiones tangenciales sobre el contorno y sus corrientes secundarias asociadas en un canal recto estrecho ($B/H=2$) con flujo uniforme 3D (adaptado de Detert, 2008)

En la Figura 2.16 se presenta la distribución ideal de tensiones para un flujo en un canal recto de relación de aspecto $B / H = 2$. Se puede apreciar como en las paredes del canal, la distribución de esfuerzos no es función simétrica respecto al plano $z = H/2$. Esto provoca que exista un movimiento de agua hacia arriba y, posteriormente, hacia el centro. Como el nivel de agua no puede ascender, por el principio de conservación de la masa, desde la parte superior central se forma una corriente que desplaza al agua en el plano xy hacia las esquinas de la sección. A consecuencia de este proceso, la posición de la velocidad máxima δ_h desciende (produciéndose el fenómeno conocido como *velocity dip*).

El descenso de la velocidad está asociado entonces a la aparición de las corrientes secundarias, y aunque hace más de cien años que los investigadores conocen su existencia, es un proceso que no se entiende demasiado bien y que ni los modelos de turbulencia más avanzados pueden resolver correctamente (Nezu y Nakagawa, 1993).

Cuando aparecen corrientes secundarias, se habla de que el flujo tiene vorticidad en la dirección de la corriente. Por tanto, para analizar las corrientes secundarias se puede partir del análisis de la componente longitudinal de la vorticidad que para flujos en régimen uniforme queda (Bradshaw, 1987; Nezu, 2005):

$$\underbrace{\overline{u \frac{\partial \Omega_x}{\partial x}} + \overline{v \frac{\partial \Omega_x}{\partial y}} + \overline{w \frac{\partial \Omega_x}{\partial z}}}_{\text{término advectivo}} = \underbrace{\Omega_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \Omega_y \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \Omega_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}}_{A_1} + \underbrace{\left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)}_{A_2} \overline{(-v'w')} + \underbrace{\frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v'^2} - \overline{w'^2})}_{A_3} + \underbrace{\nu \nabla^2 \Omega_x}_{\text{término difusivo}} \quad (2.58)$$

donde $\bar{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ es el vector de vorticidad media definido cómo:

$$\left. \begin{aligned} \Omega_x &= \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \\ \Omega_y &= \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \\ \Omega_z &= \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

La ecuación (2.58) es válida para cualquier tipo de flujo en régimen uniforme. La versión general para régimen no uniforme y variable se puede encontrar en Nezu (2005). En esta ecuación, el término A_1 describe la posible amplificación de Ω_x por el fenómeno de “*estiramiento*” de vórtices, mientras que los términos A_2 y A_3 están relacionados con las tensiones de Reynolds y sólo son relevantes en flujos turbulentos.

Las corrientes secundarias se pueden clasificar en función del término A_1 que es equivalente a la fuerza centrífuga en coordenadas curvilíneas (Nezu, 2005). Así, las corrientes secundarias de Prandtl de Primer Orden, están originadas por la presencia de fuerzas centrífugas, asociadas por ejemplo al flujo en curva (ver apartado 2.4.4). Este tipo de corrientes se pueden producir tanto en régimen laminar como en régimen turbulento.

En régimen uniforme en canales rectos el término A_1 desaparece porque el primer sumando es nulo y $\Omega_y \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \approx -\Omega_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ (Bradshaw, 1987). Por este motivo, las corrientes secundarias sólo se pueden formar por contribuciones de los términos A_2 y A_3 . Esta es la razón de que estas corrientes secundarias, de Prandtl de Segundo Orden, también se denominen corrientes inducidas por las tensiones de Reynolds ya que no pueden producirse en régimen laminar. En canales abiertos el módulo de las corrientes secundarias de segundo orden se puede acotar en el 5% de la velocidad media del flujo (Detert, 2008).

Cómo la ecuación (2.58) no puede resolverse analíticamente, es necesario emplear algún modelo de turbulencia para hacerlo. En Nezu y Nakagawa (1993) se señalan algunos procedimientos para resolver esta ecuación para el caso de flujo uniforme en canales rectos. Para el caso de canales infinitamente anchos una solución bastante empleada para caracterizar las leyes de variación de las velocidades v y w a lo largo de la dimensión y y del canal es la propuesta por Ikeda en 1981 (ver p.ej. en Nezu y Nakagawa, 1993; Rodríguez y García, 2008).

La solución de Ikeda representa de forma ideal la aparición de las células de recirculación que se pueden observar en canales aluviales anchos y que están relacionadas con la formación de dunas en la dirección de la corriente, cómo se puede apreciar en la Figura 2.17.

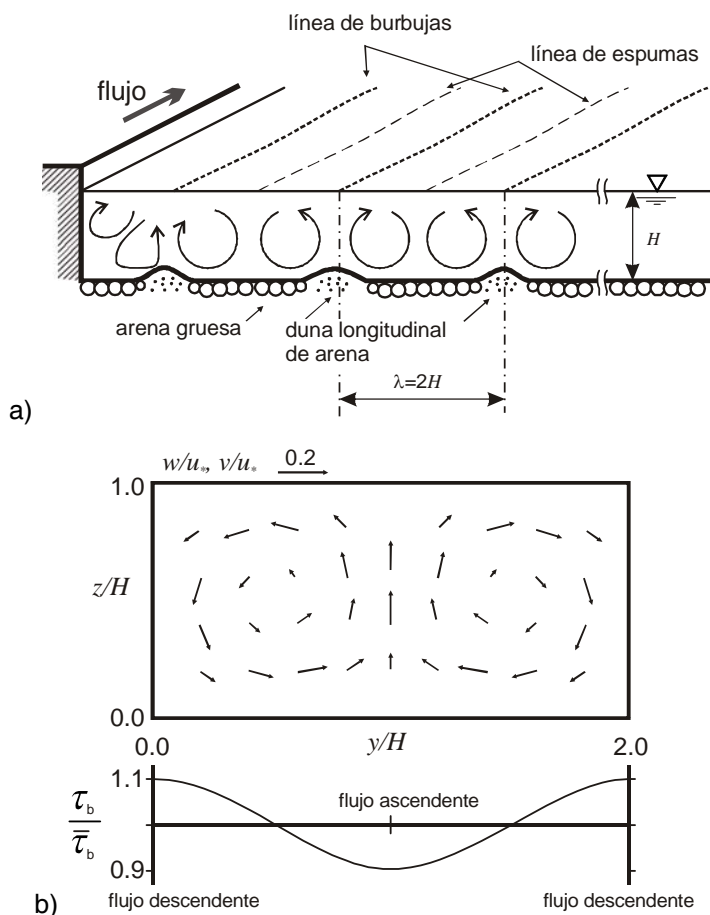


Figura 2.17. (a) Esquema de flujo y patrones de las corrientes secundarias y dunas longitudinales en un río ancho (Nezu, 2005) y (b) representación de las corrientes secundarias y la variación de la tensión tangencial de fondo con la expresión de Ikeda (1981) (ver en Nezu y Nakagawa, 1993)

Es importante señalar la correlación existente entre las tensiones tangenciales sobre el lecho y la velocidad vertical del flujo. A lo largo de la sección transversal, el comportamiento ideal de ambos parámetros es sinusoidal. En las zonas de flujo ascendente se produce una reducción de la tensión tangencial, mientras que en las zonas de mayor tensión tangencial sobre el fondo el flujo es descendente. Este modelo reproduce bien la variación cíclica de la carga de sedimentos en suspensión en la sección transversal y la forma ondulada del lecho de los grandes ríos.

Por lo tanto, el mecanismo físico de aparición y variación cíclica de las corrientes se puede demostrar a partir de la anisotropía de las fluctuaciones turbulentas y de las tensiones tangenciales en la dirección perpendicular al flujo (ecuación (2.58)). Las desviaciones encontradas entre las soluciones analíticas de la distribución de las velocidades v y w y los datos experimentales deben atribuirse a factores como la geometría del cauce, heterogeneidades en las rugosidades del lecho y otros efectos de contorno. Estos y otros aspectos se discuten con mayor profundidad en Rodríguez y García (2008).

2.4.2.2. Distribución de tensiones y velocidades

Cómo se ha demostrado, en flujo en canales abiertos, incluso aunque estos sean rectos, el comportamiento tridimensional del mismo en forma de corrientes secundarias es esencial para entender la distribución de las tensiones tangenciales.

Una descripción analítica de las tensiones primarias de Reynolds $-\overline{\rho u'w'}$, para canales rectos en régimen uniforme fue propuesta por Nezu y Nakagawa (1993). En el marco de las ecuaciones RANS (no promediadas en el espacio) y despreciando el efecto de las tensiones viscosas a cierta distancia del lecho se tiene:

$$\frac{\overline{\tau_b}}{\rho} = \frac{\overline{\tau_{xz}}}{\rho} \approx -\overline{u'w'}(z) = \overbrace{gS_b(H-z)}^G - \underbrace{\int_z^H \overline{w \frac{\partial u}{\partial z}} dz}_{SC_1} - \underbrace{\int_z^H \overline{v \frac{\partial u}{\partial y}} dz}_{SC_2} - \underbrace{\int_z^H \overline{\frac{\partial u'v'}{\partial y}} dz}_{SC_{uv'}} \quad (2.60)$$

términos originados por las corrientes secundarias

La ecuación (2.60) señala que las tensiones de Reynolds se desvían de la relación lineal proporcionada por (2.53) debido a la presencia de las corrientes secundarias. Además, y cómo los términos adicionales no pueden despreciarse, una estimación de las tensiones sobre el fondo a partir de la extrapolación lineal de $-\overline{\rho u'w'}$ no sería correcta ya que ahora la tensión sobre el fondo tiene más componentes que el término gravitatorio.

En la Figura 2.18 se presenta la distribución de tensiones $-\overline{\rho u'w'}$ para un canal recto rectangular liso de relación $B/H = 2$ (Nezu y Nakagawa, 1993). Se puede apreciar cómo las tensiones de Reynolds siguen siendo aproximadamente lineales, aunque por encima de la posición de la velocidad máxima toman valores negativos. Este hecho está relacionado con el fenómeno de descenso de la velocidad, ya que para la velocidad máxima se tiene que $\overline{\partial u} / \partial z = 0$, y entonces el término SC_1 de la ecuación (2.60) es nulo. En la figura se han representado también los términos G , SC_1 , SC_2 y $S_{uv'}$ de la ecuación (2.60) para la distribuciones de tensiones situada a medio camino entre la pared del canal y su plano central.

Se puede observar cómo el valor absoluto del término SC_1 es mucho mayor que el valor absoluto del término SC_2 cuando estamos en la región inferior del flujo ($z/H < 0.5$). Cuando se

analiza la región superior esta circunstancia se invierte. El primer término está relacionado con las velocidades verticales y el segundo con las velocidades en la dirección y . Por tanto, y para flujos 2D con corrientes secundarias, se puede concluir que las velocidades en la dirección vertical contribuyen de un modo muy importante a las tensiones de Reynolds cerca del lecho mientras que el flujo horizontal contribuye a las tensiones en la región externa. Como SC_2 es negativo y $SC_1 \approx 0$ para $\delta_H=0$, las tensiones de Reynolds por encima de este calado son negativas (Nezu y Nakagawa, 1993).

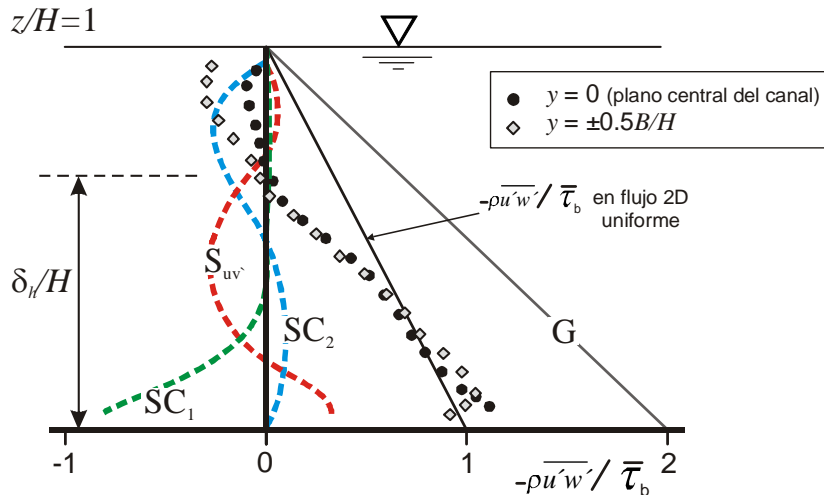


Figura 2.18. Distribución experimental de $-\rho \overline{u'w'}$ en un canal rectangular liso estrecho ($B/H=2$) con paredes y lecho de la misma rugosidad. Se han representado los términos de la ecuación (2.60) para la distribución de tensiones situada en el plano $y = \pm 0.5 B/H$ (datos de Nezu y Nakagawa, 1993).

En la Figura 2.18 también se presenta la contribución del término gravitatorio G y la ley de variación para un flujo 2D uniforme. Se puede observar como el término gravitatorio en este caso duplica al valor del término gravitatorio para flujo bidimensional $-\rho \overline{u'w'} / \overline{\tau_b}$. Esto se produce porque en la configuración de la figura (un canal con igual rugosidad en el fondo y las paredes y con $B/H = 2$) la tensión tangencial sobre el lecho es la mitad que la tensión tangencial sobre todo el contorno $\overline{\tau_b} \approx \overline{\tau_w} \approx 2\overline{\tau_0}$. En este caso los términos SC_1 , SC_2 y $S_{uv'}$ compensan la diferencia que existe entre los términos gravitatorios para los flujos en 2D y 3D (Nezu y Nakagawa, 1993).

A medida que nos acercamos a las paredes del canal, la influencia de las corrientes secundarias sobre la distribución de tensiones es mayor, como se puede apreciar en la Figura 2.19 donde se presentan los registros obtenidos por Imamoto e Ishigaki (1988, citados en Yang, 2005b) en un canal con una relación $B/H = 5$. En la figura se aprecia como, a medida que nos acercamos a la pared, la tensión tangencial sobre el lecho se reduce.

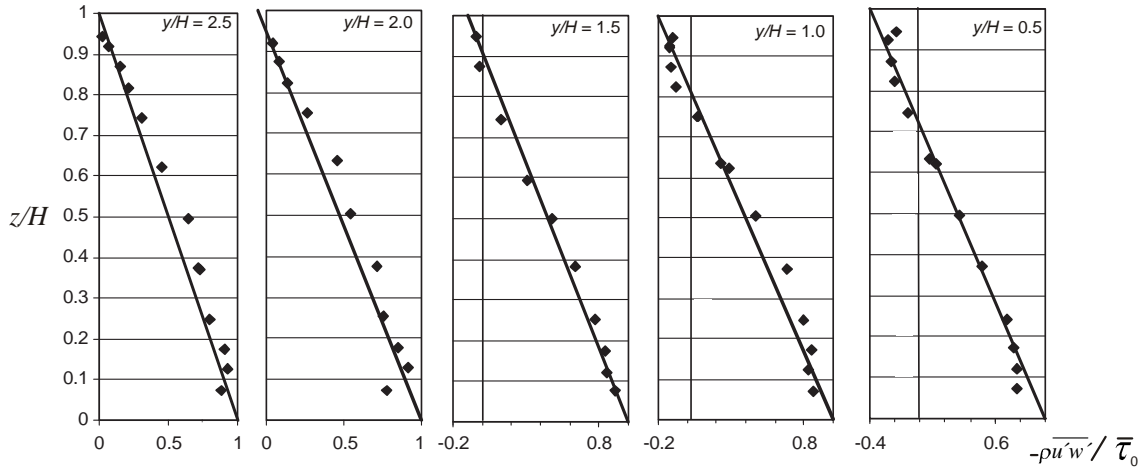


Figura 2.19. Distribución de $-\rho \overline{u'w'}$ en un canal recto con relación de aspecto $B/H=5$.
 Datos de Imamoto e Ishigaki, 1988 (citados en Yang, 2005b)

Cualitativamente, esta distribución de tensiones sobre el lecho concuerda bien con el patrón de variación recogido en la Figura 2.20 (Nezu y Nakagawa, 1993).

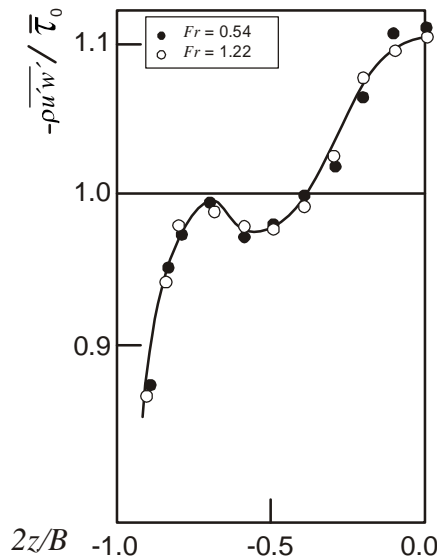


Figura 2.20. Distribución de tensiones tangenciales sobre el lecho en un canal (Nezu y Nakagawa, 1993).

Entonces, y recapitulando, hemos visto que las corrientes secundarias afectan a la distribución de tensiones tangenciales en canales estrechos. Se ha comentado ya en apartados anteriores (2.3.2.3) que el límite para que aparezcan estos efectos se sitúa habitualmente en una relación $B/H = 5$. Para valores inferiores se producen efectos por las corrientes secundarias. Como existe una zona de transición entre el comportamiento 2D y 3D, se suele señalar que para canales con $B/H > 10$ se puede considerar que el flujo es bidimensional en la región comprendida entre $|y/H| < (B/H - 5) / 2$ (Nezu y Nakagawa, 1993), o de manera más general para la relación $|y/B| < 0.25$ (Detert, 2008).

En cualquier caso, estemos en un canal estrecho o ancho, a medida que nos acercamos a las paredes laterales tendremos invariablemente la presencia de corrientes secundarias y efectos sobre la distribución de tensiones y velocidades (Yang y Lee, 2007).

Otros factores que afectan a estos parámetros son la geometría del canal o la relación entre rugosidad de lecho y paredes. Para el plano $y = 0$, la posición donde las velocidades son máximas, y las tensiones de Reynolds $-\rho \overline{u'w'}$ nulas se encuentra habitualmente en el rango $0.5 H < \delta_h < H$ (ver p.ej.Figura 2.19).

No existe ninguna expresión analítica que permita estimar la posición δ_h , aún para los casos de flujo más sencillos. En la literatura se pueden encontrar expresiones empíricas que se pueden emplear para calcular la zona de velocidades máximas para canales rectangulares lisos. Estas fórmulas salen del ajuste de los datos publicados en la literatura. Un ejemplo es la formula de Yang *et al.* (2004) que se basa en el ajuste de los datos de 6 publicaciones y los obtenidos por los propios autores:

$$\frac{\delta_h}{h} = \left(1 + 1.3 \exp\left(\frac{|z| - B/2}{h}\right) \right)^{-1} \quad (2.61)$$

Otra expresión que da resultados similares es la de Wang *et al.* (2001), válida para cualquier profundidad siempre que $0.5B/H < 2.6$:

$$\frac{\delta_h}{h} = 0.44 + 0.212 \frac{B/2 - |z|}{H} + 0.05 \sin\left(\frac{2\pi}{2.6} \frac{B/2 - |z|}{H}\right) \quad (2.62)$$

En la Figura 2.21 se presenta una comparación de estas expresiones y se muestran además los datos de los 9 trabajos empleados por Wang *et al.* (2001) para obtener la expresión (2.62).

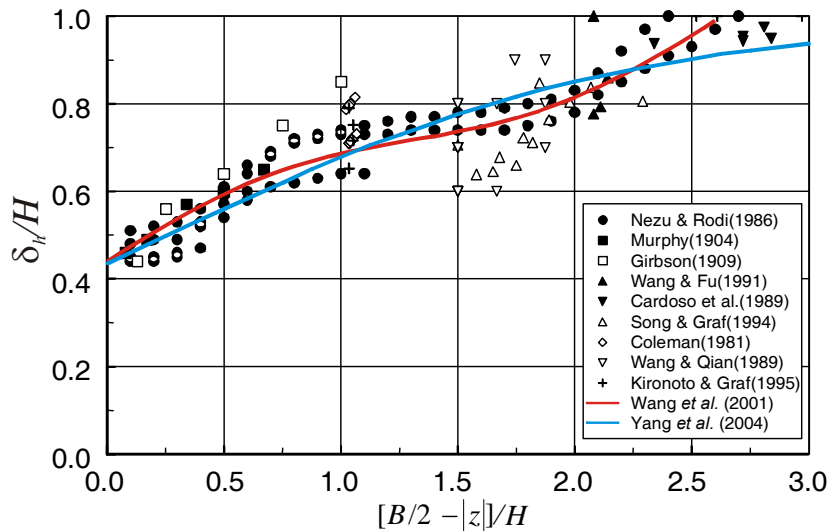


Figura 2.21. Comparación de las ecuaciones (2.61) y (2.62) para obtener la relación δ_h/H junto con los datos experimentales empleados para el ajuste de la segunda ecuación (datos de Wang *et al.*, 2001)

Un aspecto que se ha desarrollado en los últimos años ha sido la búsqueda de alguna expresión analítica, ya sea con base conceptual o de tipo empírica, que describa el perfil de velocidades de la corriente cuando aparecen las corrientes secundarias y el descenso del

punto de la velocidad máxima. Nezu y Nakagawa (1993) señalan que en la zona central del canal, y para calados inferiores a δ_h , el perfil de velocidades sigue la forma de las leyes logarítmica, ecuación (2.32), y de la ley logarítmica corregida con una función de estela de Coles, ecuación (2.37), para las regiones logarítmica y externa respectivamente.

A medida que la dimensión lateral crece, las desviaciones respecto a estas leyes también lo hacen. Cerca de las paredes las velocidades son menores y su distribución se sitúa por debajo de la ley logarítmica. Hay que señalar que estas afirmaciones se realizaron en base a un estudio experimental realizado sobre un canal recto liso con relación $B/H = 2$.

Por encima del valor donde se produce la velocidad máxima no se ha establecido una ley de velocidades que se aplique con asiduidad. Sarma et al. (1983) propusieron empíricamente un perfil parabólico (citados en Nezu y Nakagawa, 1993). Termini y Greco (2006), proponen la siguiente variante empírica de la ley logarítmica, válida para todo el calado:

$$\bar{u} = \bar{U} + \frac{u_*}{\kappa} \sqrt{\frac{\delta_h}{H}} \left[\left(\frac{\delta_h}{H} \right)^2 - \frac{\delta_h}{H} \ln \frac{\delta_h}{H} + \ln \frac{z}{\delta_h} \left(\frac{1 - \text{sign}(z - \delta_h)}{2} - \frac{\delta_h}{H} \frac{1 + \text{sign}(z - \delta_h)}{2} \right) \right] \quad (2.63)$$

donde \bar{U} es la velocidad medida promediada sobre el calado y $\text{sign}(z)$ es una función que toma los siguientes valores:

$$x = \text{sign}(z) = \begin{cases} 1 & \text{si } z > 0 \\ 0 & \text{si } z = 0 \\ -1 & \text{si } z < 0 \end{cases} \quad (2.64)$$

Los autores probaron la ecuación (2.63) con varios tipos de perfiles de velocidad (sobre lechos lisos y rugosos, flujo en curva y flujo no uniforme) y obtuvieron buenos ajustes.

Otra expresión para la determinación de las leyes de velocidades en presencia de corrientes secundarias en régimen uniforme es la propuesta por Yang (2005a). Este autor desarrolló una ecuación dinámica para las tensiones tangenciales en un canal recto con flujo 3D a partir de un análisis de órdenes de magnitud aplicado a las ecuaciones de Reynolds. Aplicando una variante de relación de longitud de mezcla para la zona externa a las ecuaciones dinámicas, y tras realizar una serie de integraciones numéricas tomando los 3 primeros términos del desarrollo en serie de Taylor, obtuvo la siguiente expresión:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} e^{\alpha \xi} \left\{ \ln \frac{z}{z_0} - \alpha \xi + \left(\frac{\alpha \xi}{2} \right)^2 - b_1 e^{-\alpha} \left[\ln(1 - \xi) + \alpha(1 - \xi) + \left(\alpha \frac{(1 - \xi)}{2} \right)^2 - \frac{\alpha^2}{4} + \alpha \right] \right\} \quad (2.65)$$

donde α y b_1 son coeficientes a determinar, z_0 es la rugosidad característica del lecho de la ley logarítmica de velocidades y ξ es igual a la relación δ_h/H .

La ecuación (2.65) se convierte en la ley logarítmica (2.32) si α y b_1 son nulos. En su trabajo, Yang (2005a), realiza un análisis matemático que justifica la aparición del fenómeno del descenso del punto de velocidad máxima en base al análisis de las tensiones $-\rho \overline{u'w'}$, y la interacción entre la contribución de la tensión tangencial sobre el fondo y sobre las paredes de un canal rugoso. También presenta una relación analítica para estimar la posición del punto de velocidad máxima, en función del producto de las velocidades medias a una altura δ_h , del coeficiente b_1 determinado en la ecuación (2.65), y de las velocidades de fricción calculadas a

partir de la tensión tangencial sobre el lecho $u_{*b} = \sqrt{gHS_b}$ y sobre toda la sección $u_{*0} = \sqrt{gR_H S_b}$:

$$\frac{\delta_h}{H} = \frac{(\overline{uw})_{z=\delta_h} + u_{*0}^2 (1+c)}{u_{*0}^2 (1-b_1)}, \quad (2.66)$$

con $c = (u_{*b}^2 - u_{*0}^2) / u_{*0}^2$

Aunque la expresión anterior cuenta con cierta base física, su principal inconveniente es que para determinar δ_h , se debe conocer un coeficiente empírico que varía en función de la forma del perfil de velocidades, y conocer el valor del producto de \overline{uw} a la cota δ_h . Por lo tanto, esta ecuación únicamente se puede emplear para ajustar la posición δ_h en registros experimentales del perfil de velocidad. Es decir, no sirve para predecir dónde se producirán las velocidades máximas.

Este autor señala que la presencia de velocidades verticales es la causante de que $\delta_h < H$. Como se ha visto, estas velocidades están originadas por la presencia de corrientes secundarias pero otros fenómenos como el transporte de sedimentos (ver apartado 2.4.4) o la existencia de fuerzas de flotabilidad originados por gradientes de temperatura o densidad, también pueden propiciar la aparición de velocidades verticales y de este modo, desviaciones del perfil de velocidades horizontales respecto a las leyes universales para flujos 2D.

Cuando se emplean modelos numéricos 1D o 2D promediados en la vertical, conocer la forma del perfil de velocidades y de las tensiones tangenciales sobre el fondo es importante para analizar correctamente el transporte de sedimentos o la dispersión de contaminantes. Por tanto, para este tipo de flujos, es preciso disponer de expresiones que representen este fenómeno. La ecuación propuesta por Termini y Greco (2006), ecuación (2.63), sólo requiere 3 parámetros para determinar el perfil de velocidades y dos de ellos, la velocidad de fricción y la velocidad promediada en la vertical, son proporcionados por el modelo numérico. El principal inconveniente de esta ecuación, y de la propuesta por Yang, (2.65), es que se debe conocer el calado en el que se produce la velocidad máxima, y esto a priori no se conoce. Por lo tanto, para poder utilizarla en un modelo numérico se debe complementar con alguna ecuación empírica cómo las (2.61) o (2.62), pero que están obtenidas a partir de datos experimentales en canales rectos.

Desde un punto de vista práctico, p. ej. para el diseño de encauzamientos o canales de irrigación, también es importante conocer como se reparten los esfuerzos tangenciales entre el lecho y las paredes del canal. Para analizar este problema, se puede realizar una descomposición de la fuerza ejercida por el fluido sobre el contorno por unidad de longitud. Para un canal rectangular se tiene:

$$F_0 = F_b + F_w, \text{ o}$$

$$\overline{\tau_0} P_m = \overline{\tau_b} B + \overline{\tau_w} 2H \quad (2.67)$$

Existen numerosos métodos para obtener la relación la contribución de F_b y F_w a la fuerza total, que puede calcularse directamente en base a la ecuación (2.57). Una revisión de los mismos se puede encontrar en Cheng y Wua (2005).

Un método bastante empleado fue propuesto Knight *et al.* (1984). Estos autores presentaron una ecuación empírica para determinar el ratio F_w / F_0 en función de la rugosidad relativa del lecho, la relación entre k_b y k_w , y la relación de aspecto B/H .

Sorprendentemente, la ecuación de Knight *et al.* señala que el efecto de la rugosidad relativa del lecho tiene un efecto marginal en la relación F_w / F_0 . Sin embargo, en las estimaciones de las tensiones tangenciales sobre un lecho rugoso en canales estrechos se debe contemplar la existencia de la fuerza de fricción con las paredes, aunque éstas sean lisas. Empleando la ecuación propuesta por Knight *et al.*, y para un canal de relación de aspecto $B/H = 5$ y una rugosidad relativa $k_b / k_w = 10^3$, se llegaría a una relación $F_w / F_0 = 0.19$. Sí se desprecia la rugosidad de las paredes se sobreestimaría de la tensión real sobre el lecho, en este caso un 23%, mientras que si se asumiese ambas superficies tienen la misma rugosidad, se subestimaría la tensión sobre el lecho en un 18% (Detert, 2008).

Una expresión con base conceptual para hacer el reparto de las tensiones tangenciales sobre el lecho y las paredes de un canal trapezoidal liso fue propuesta por Yang (2005b). Según este autor, la distribución de tensiones en el lecho y en las paredes se puede calcular empleando un método propuesto por Keulegan (1938) y posteriormente por Einstein (1942, ambos citados en Yang, 2005b) que consiste en dividir el flujo en tres regiones, en las que tiene influencia el fondo y las paredes respectivamente. La división propuesta por Yang se recoge en la Figura 2.22 y es válida para canales rectangulares y trapezoidales.

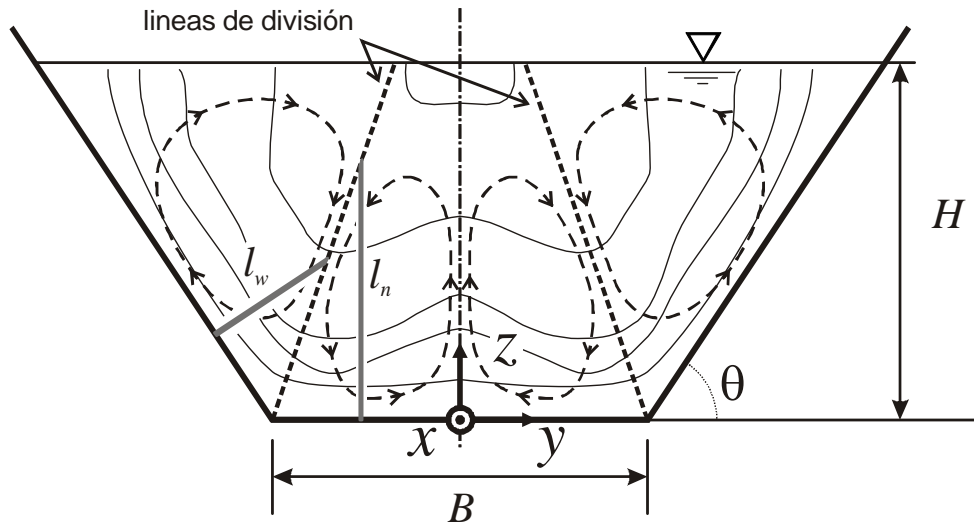


Figura 2.22. Distribución de velocidades, células de circulación secundaria y geometría y líneas de división de las distintas regiones de flujo propuesta por Yang (2005b).

Para calcular la tensión sobre el lecho en función de la distancia al plano central del canal se emplea la siguiente expresión:

$$\tau_b(y) = \rho g S_b l_n(y) \quad (2.68)$$

donde l_n es la distancia entre el fondo y la línea de división de las regiones. La pendiente de línea de división se calcula como:

$$2 \left(\frac{z}{l_w} \right)^3 \left(\sin \theta + \frac{H}{B} \cos \theta \right) - 2 \left(\frac{z}{l_w} \right)^2 \frac{H}{B} - \sin \theta = 0 \quad (2.69)$$

donde l_w es la distancia entre la pared lateral y la línea que divide las regiones del lecho y de la pared. A partir de esta ecuación se pueden determinar las áreas de influencia de cada región A_b y A_w , y así determinar las tensiones promediadas espacialmente sobre el lecho o sobre las paredes laterales como:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\tau}_b &= \rho g S_b \frac{A_b}{P_b} \\ \bar{\tau}_w &= \rho g S_b \frac{A_w}{P_w} \end{aligned} \right\} \quad (2.70)$$

Los valores obtenidos de la ecuación (2.70) se ajustan bien a los datos experimentales empleados por Knigh et al. (1984), así como a la expresión propuesta por estos mismos autores.

2.4.3. Flujo 2D y 3D no uniforme

El desarrollo realizado hasta el momento es válido únicamente para situaciones de régimen uniforme, es decir, cuando $dh^{36} / dx = 0$. En este escenario la ecuación (2.52) que define la tensión tangencial sobre el lecho en flujos 2D uniformes, no es válida.

Sí se extiende la ecuación dinámica se puede llegar a la siguiente ecuación válida para flujos 3D en canales rectos (Detert, 2008):

$$\frac{\tau_0(x)}{\rho} = g S_b R_H - \frac{dh}{dx} \left(g R_H + \beta U^2 \frac{R_H}{h} \right) \quad (2.71)$$

donde β es el parámetro de no uniformidad de momentum y U es la velocidad media de la sección. Para flujo 2D uniforme $dh / dx = 0$, la ecuación (2.71) se convierte en la ecuación (2.52).

El parámetro de no uniformidad de momentum β , o factor de corrección de Boussinesq, tiene en cuenta que en la derivación de las ecuaciones dinámicas el flujo no se comporta de un modo ideal. Es el equivalente en las ecuaciones dinámicas al factor de corrección de corrección de Coriolis (α), que se aplica en el desarrollo de la ecuación de conservación de la energía. Para flujos turbulentos β se define cómo (Fenton, 2005):

$$\beta = \frac{1}{U^2 h} \int_{z_0}^h \left(u^{-2} + u'^2 \right) dh \quad (2.72)$$

Hay que señalar que aunque β se denomine parámetro de no uniformidad de momentum, no es un buen indicador de la no uniformidad de un flujo ya que su valor es ≈ 1 aún para flujos gradualmente variados (Kironoto y Graf, 1995; Yang, 2009). Además, no hay que confundir este parámetro con el gradiente adimensional de presión, empleado p.ej. por Kironoto y Graf (1995) y Song (1994) para determinar la no uniformidad del flujo:

³⁶ Cuando se analice régimen no uniforme o variable, el calado se denotará con h minúscula con objeto de remarcar que éste puede variar espacialmente.

$$\beta = \frac{h}{\tau_o} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \quad (2.73)$$

donde el gradiente longitudinal de presiones está definido por la diferencia entre la pendiente motriz y la pendiente del lecho:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \gamma \left(-S_b + \frac{dh}{dx} \right) \quad (2.74)$$

Sí se introduce (2.74) en (2.73), y como para régimen uniforme $dh/dx = 0$, se tiene:

$$\beta = \frac{h\gamma}{\tau_o} (-S_b) = -\frac{\rho g h S_b}{\rho g h S_b} = -1 \quad (2.75)$$

Repetiendo este procedimiento para un flujo no uniforme, se tiene:

$$\beta = \frac{1}{S_b} \left(-S_b + \frac{dh}{dx} \right) \quad (2.76)$$

Entonces, y como se observa en la Figura 2.23, el gradiente longitudinal de presiones adimensional es menor que -1 para flujos uniformes acelerados y mayor que -1 para el caso de flujos uniformes decelerados.

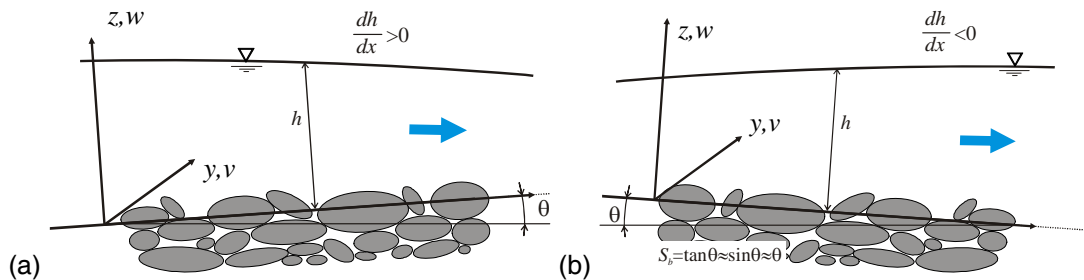


Figura 2.23. Esquema de un flujo no uniforme (a) acelerado y (b) decelerado.

La no uniformidad del flujo afecta a la forma del perfil de velocidades y de las tensiones de Reynolds. A continuación se comentan los principales trabajos encontrados en la literatura que analizan los flujos no uniformes. Si se compara con la producción que existe en flujos 2D uniformes, se verá que el número es prácticamente testimonial.

Cardoso et al. (1991) analizaron la estructura de un flujo gradualmente acelerado en un canal liso. Sobre lecho rugoso se pueden citar los trabajos realizados por Kironoto y Graf (1995) y Song (1994) realizados en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne sobre un lecho de grava con $d_{50}=2.23$ y 1.23 cm respectivamente. En los ensayos de Kironoto y Graf se la relación de aspecto del flujo fue $1.7 \leq B/H \leq 2.9$, por lo que sus resultados están afectados por la presencia de corrientes secundarias. En los ensayos de la tesis doctoral de Song se buscaron relaciones mayores para que el flujo fuese bidimensional. La instrumentación empleada por Song (1994) fue un perfilador de velocidades por efecto doppler (ADVP).

Hay que señalar que los datos recogidos por este investigador han sido empleados por numerosos autores en el proceso de validación de aproximaciones conceptuales que describen las velocidades y las tensiones tangenciales en flujos turbulentos rugosos no uniformes.

Así, Dey y Lambert (2005) presentan una ecuación para determinar las tensiones tangenciales sobre el lecho y la distribución de las tensiones de Reynolds para flujos 2D no uniformes, desarrollada a partir de las ecuaciones de N-S asumiendo que la ley de velocidades es logarítmica. Song y Chiew (2001) realizan un análisis similar pero suponiendo una distribución de velocidades potencial. El resultado propuesto por Song y Chiew es similar al recogido en Song (1994). Otra serie de trabajos muy interesante en flujo 2D no uniforme en canales rectos, que se comentarán en párrafos posteriores, fueron realizados por Yang (Yang *et al.*, 2004; Yang, 2005a; Yang *et al.*, 2006; Yang y Lee, 2007; Yang y Chow, 2008; Yang, 2009).

Como se ha comentado, cuando el flujo no es uniforme se producen modificaciones en la forma y estructura del perfil de velocidades. Así, en flujos acelerados el perfil de velocidades es similar al que se produce en un canal recto y estrecho, con la velocidad máxima por debajo de la lámina libre, mientras que en flujos decelerados el perfil es más cóncavo, parece que el movimiento de la capa superior es más rápido que el de la zona inferior. Es común que en la literatura se hable de perfiles convexos y cóncavos, aunque esta diferenciación es mucho más clara cuando se analiza la forma del perfil de tensiones de Reynolds (Figura 2.25).

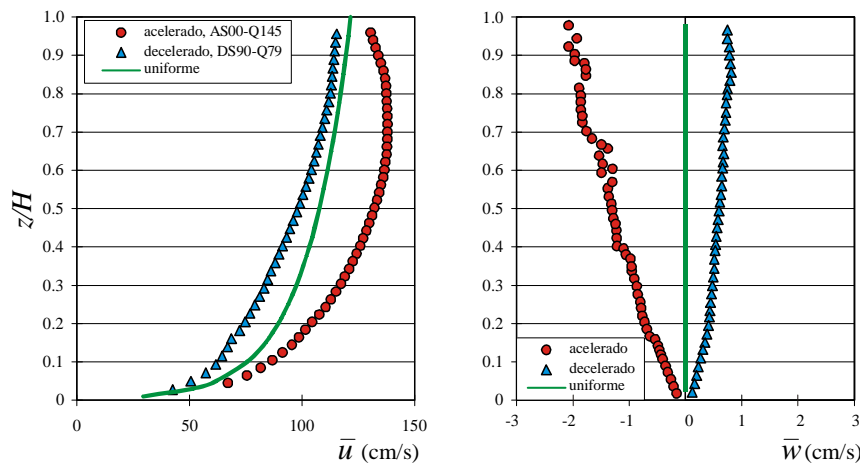


Figura 2.24. Distribución típica de la velocidad media horizontal y vertical sobre lecho rugoso de un flujo no uniforme sin corrientes secundarias y comparación con un caso hipotético de régimen 2D uniforme (adaptado de Yang y Chow, 2008; datos de Song, 1994). La nomenclatura empleada está recogida en los experimentos de Song (1994): AS y DS hace referencia a ensayo de flujo acelerado y decelerado respectivamente, y Q señala el valor del caudal de ensayo.

Los trabajos de Cardoso *et al.* (1991) o Kironoto y Graf (1995) señalan que en la región interna del flujo la ley logarítmica es aplicable hasta $z/H < 0.20$. Este hecho también fue confirmado por Song (1994), que además señala que los valores del parámetro B de la ley logarítmica de velocidades (2.32) son similares, aunque un poco inferiores, al valor obtenido para régimen uniforme: 8.3 ± 0.2 frente a 8.5 ± 0.2 .

En la región externa Kironoto y Graf (1995) señalan que la ley velocidad con la corrección de estela propuesta por Coles, ecuación (2.39), se puede aplicar, y que para flujo turbulento rugoso se pueden aplicar las siguientes relaciones para obtener el coeficiente de Coles Π :

$$\left. \begin{aligned} \Pi &= 0.08\beta && \text{para flujo 3D, } B/H \approx 2 \\ \Pi &= 0.08\beta + 0.23 && \text{para flujo 2D, } B/H > 5 \end{aligned} \right\} \quad (2.77)$$

donde β es el gradiente longitudinal de presiones, ecuación (2.73), y que es una media de la no uniformidad del flujo. Para régimen uniforme β vale 0.15 para flujos 2D y -0.03 para el flujo con la relación de aspecto de 2.2, que fue el ensayo por Kironoto y Graf (1995). Hay que señalar que las relaciones de la ecuación (2.77) se han ajustado sobre datos con mucha dispersión, por lo que pueden considerarse como meramente indicativas.

Yang y Chow (2008) indican que la principal característica de los flujos no uniformes es que la componente vertical de las velocidades no es nula (Figura 2.24). Cuando el flujo es acelerado la velocidad vertical media es negativa mientras que si los flujos son decelerados, la componente vertical es positiva. En flujos uniformes 2D la velocidad vertical es nula, al menos en la región interna. Por último, en un canal recto con flujo uniforme 3D aparecen corrientes secundarias, a las que se asocia una velocidad vertical.

Cómo se verá a continuación, y también en el apartado 2.5.3, cuando la velocidad tiene componente vertical la estructura de la ley de velocidades en la dirección de la corriente, y en general, la estructura de los parámetros que caracterizan la turbulencia, cambia. Y como hemos visto, esto puede producirse por la no uniformidad del flujo, por aparición de corrientes secundarias de Prandtl de primer o segundo orden, por superarse el umbral de movimiento de las partículas del lecho, por gradientes de temperaturas o densidades, etc.

Si analizamos las leyes de variación de las tensiones tangenciales, cómo las presentadas en la Figura 2.25 (a), se observa cómo las tensiones de Reynolds $-\rho \overline{u'w'}$ se desvían respecto a la distribución que se produce en flujo 2D uniforme. También se puede apreciar cómo para el caso de flujo acelerado la distribución es cóncava mientras que para el flujo decelerado es convexa.

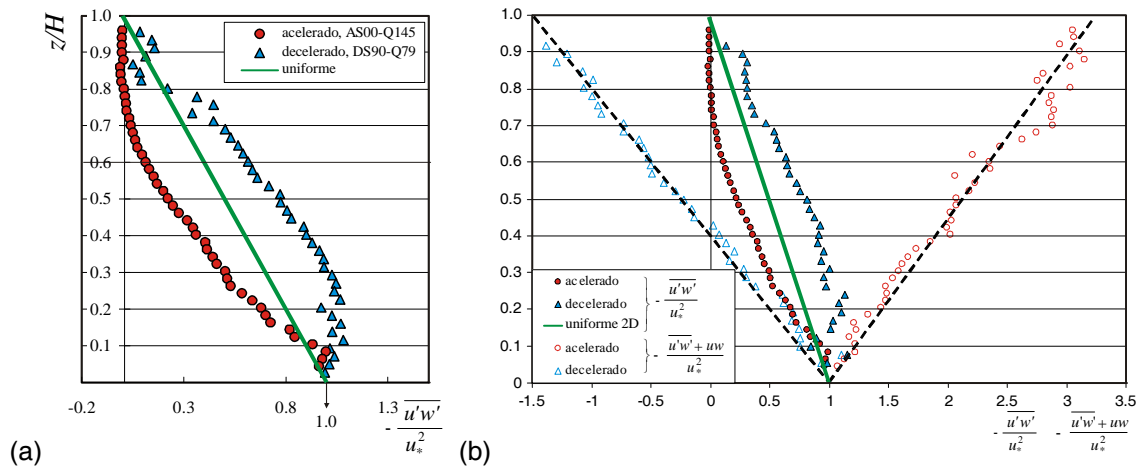


Figura 2.25. (a) Distribución de las tensiones $-\overline{u'w'}/u_*^2$ en flujo no uniforme 2D rugoso (datos de Song, 1994) y (b) distribución de las tensiones $-\overline{u'w'}/u_*^2$ y de $-\overline{u'w'}/u_*^2 - \overline{uw}/u_*^2$ para flujo no uniforme 2D rugoso (Yang et al., 2006; datos de Song, 1994). Se puede observar cómo el término aunque el término de fluctuaciones adimensionalizado con u_*^2 no es lineal, la suma de este término con el producto de las velocidades sí sigue una tendencia lineal.

Sin embargo, si se analiza la Figura 2.25 (b) se puede observar cómo la suma de las tensiones de Reynolds con el producto de las velocidades, $-\overline{\rho u w}$, sí mantiene una relación lineal. Esta

circunstancia fue señalada inicialmente por Yang (2005a) en el primer trabajo de una serie en el que presenta distribuciones de velocidades y tensiones en flujos no uniformes.

Para estudiar el flujo acelerado o decelerado este autor propone en primer lugar una nueva ecuación para describir la variación de las tensiones tangenciales en la vertical. Para ello emplea una forma modificada de las ecuaciones RANS para flujos 2D. Integrando la ecuación dinámica en la dirección z y aplicando una serie de condiciones de contorno llega a la siguiente relación (ver p.ej. en Yang, 2005b; Yang y Lee, 2007):

$$-\frac{\overline{u'w'} + \overline{uw}}{u_*^2} = \left(1 - \frac{z}{h}\right) + b \frac{z}{h} \quad (2.78)$$

La ecuación (2.78) señala que las tensiones de Reynolds no son lineales en flujos 2D no uniformes, pero la suma de éstas con el producto de las velocidades sí lo es, cómo se puede ver en la Figura 2.25. La pendiente de la distribución de tensiones de la ecuación (2.78) será $b - 1$.

Además, también se puede observar cómo en la región más superficial ($\sim z/H > 0.75$) la contribución de las velocidades verticales, en la forma del producto $\overline{u \cdot w}$ es más importante en la expresión de las tensiones que el término de Reynolds.

Una forma de obtener el valor del parámetro b es aplicar la condición de contorno que indica que en la lámina libre el valor de $\overline{u'w'}$ es nulo, por tanto, de (2.78) se tiene:

$$b = -\frac{\overline{u_h w_h}}{u_*^2} \quad (2.79)$$

Esta expresión se puede poner en función de la velocidad horizontal en superficie $\overline{u_h}$ y de la pendiente de la lámina de agua aplicando la siguiente relación, obtenida de la integración de la ecuación de continuidad en la dirección z (Yang, 2005b):

$$\overline{w_h} = \overline{u_h} \frac{dh}{dx} \Rightarrow b = -\left(\frac{\overline{u_h}}{u_*}\right)^2 \frac{dh}{dx} \quad (2.80)$$

En la ecuación anterior se puede determinar b directamente. Se puede ver cómo para flujos acelerados ($dh/dx < 0$) b toma un valor positivo mientras que para flujos decelerados ($dh/dx > 0$) toma un valor negativo. Estos resultados son consistentes con los datos mostrados en la Figura 2.25.

Yang también proporciona una relación para obtener la tensión tangencial sobre el fondo en flujos no uniformes bidimensionales. La siguiente relación (Yang *et al.*, 2006) es similar a la ecuación (2.71) válida para flujos 3D o a otras recogidas en la literatura como la propuesta por Kironoto y Graf (1995):

$$\frac{\tau_0(x)}{\rho} = gS_b h - \frac{dh}{dx} gh - \frac{d}{dx} \int_{z_0}^H u^{-2} dz \quad (2.81)$$

Yang también deriva una serie de expresiones para ajustar el perfil de velocidades en flujos 2D no uniformes acelerados y decelerados. Para flujos acelerados la expresión propuesta ha sido obtenida a partir de la integración numérica (aproximada con 3 términos del desarrollo en serie

de Taylor) de la ecuación que describe la variación de las tensiones tangenciales con el calado (2.78), en el que se ha empleado el siguiente modelo de viscosidad turbulenta:

$$\frac{\nu_T}{u_* h} = \kappa \xi (1 - \xi) \quad (2.82)$$

De este modo, se puede llegar a (ver detalles en Yang *et al.*, 2006):

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{(1 - \xi)^{-\alpha}}{\kappa} \left(\ln \frac{z}{z_0} - \alpha \xi + \alpha \frac{\alpha - 1}{4} \xi^2 + \frac{b}{\alpha} \right) - \frac{b}{\kappa \alpha} \quad (2.83)$$

donde ξ indica la relación z/h y α es un parámetro empleado para obtener la ley de variación de la velocidad vertical, que se puede calcular cómo:

$$\alpha = \frac{1}{\kappa} \frac{\bar{w}_h}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \frac{dh}{dx} \frac{\bar{u}_h}{u_*} \quad (2.84)$$

El parámetro α está relacionado con el parámetro b , ecuación (2.79), mediante:

$$b = -\kappa \alpha \frac{\bar{u}_h}{u_*} \quad (2.85)$$

La principal ventaja del juego de ecuaciones anteriores (2.83)-(2.85) radica en que, además de ajustarse bien a los datos de Song (1994), no es necesario conocer a priori la posición del calado y del valor de la velocidad máxima.

Para flujos decelerados Yang (2009) realiza un desarrollo similar al recogido en las ecuaciones anteriores aunque modificando ligeramente el modelo de viscosidad turbulenta. Estas leyes no se presentarán aquí.

Los trabajos de Yang para flujo no uniforme señalan que las velocidades verticales juegan un papel muy importante en la estructura de la turbulencia. Esta importancia es analizada en Yang *et al.* (2006) a través del análisis de la ecuación de las tensiones tangenciales (2.78), que para régimen uniforme se reduce a ($b=0$ si $dh/dx=0$, ecuación (2.80))

$$-\frac{\overline{u'w'}}{u_*^2} = \left(1 - \frac{z}{h} \right) + \frac{\overline{uw}}{u_*^2} \quad (2.86)$$

En la Figura 2.26 se representa un esquema típico de corrientes secundarias en un canal estrecho. En la zona superior se puede observar cómo las velocidades verticales son descendentes, por lo que \overline{uw} también lo es. A medida que z/h tiende a la superficie libre, el término derecho de la ecuación (2.86) tiende a cero. Esto significa que cerca de la superficie las tensiones de Reynolds y \overline{uw} son similares. Esto implica que las tensiones $-\overline{u'w'}$ serán también negativas, y que la capa de corte nulo (que se corresponde con las máximas velocidades) se produce por debajo de la superficie.

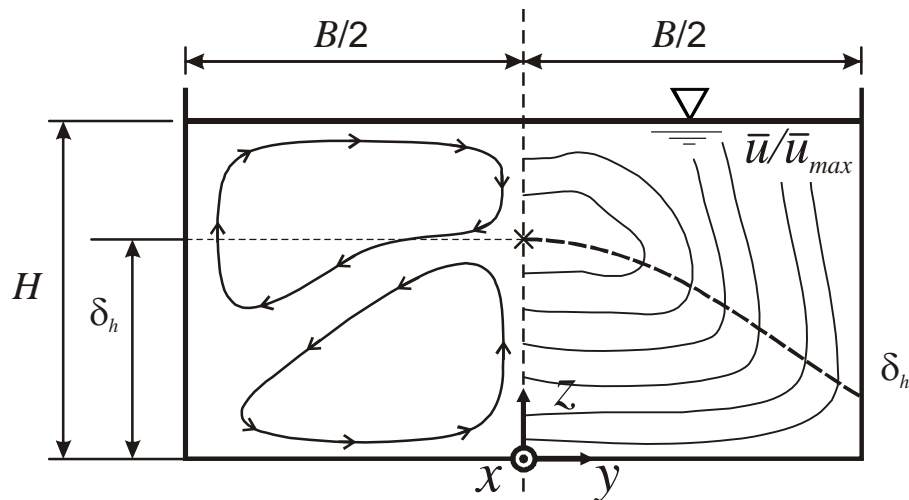


Figura 2.26. Relación entre las corrientes secundarias y el fenómeno de descenso de velocidad en canales estrechos (adaptado de los datos recogidos en Nezu, 2005).

Siguiendo este razonamiento se llega a la conclusión de que en flujos acelerados, donde la componente de la velocidad vertical también es negativa, se produce también el fenómeno de descenso de la velocidad. Además, en este tipo de flujos este fenómeno es más pronunciado porque la velocidad vertical tiene mayor magnitud. Esta explicación es consistente con los datos de Kironoto y Graf (1995) que encontraron que la posición de máxima velocidad para un flujo uniforme 3D en un canal estrecho se producía para $\delta_h/H \approx 0.75$, mientras que para la misma relación de aspecto (≈ 2.2) y flujo no uniforme acelerado era para $\delta_h/H \approx 0.6$.

El razonamiento anterior también nos lleva a la conclusión de que en flujos 2D donde la velocidad vertical sea positiva, cómo en el caso de los no uniformes decelerados, nunca se produce el fenómeno de descenso de velocidad, ver Figura 2.24. Este hecho también está bien documentado en los datos experimentales recogidos en la literatura (Kironoto y Graf, 1995; Song, 1994, Song y Chiew, 2001).

2.4.4. Otros factores que pueden afectar a la distribución de tensiones y velocidades

Antes de pasar a comentar en el siguiente apartado los métodos empleados habitualmente para determinar la velocidad de fricción, y de forma indirecta la tensión de corte sobre el lecho, se hará una pequeña recapitulación con las principales desviaciones que pueden producirse en las leyes de velocidades y tensiones de Reynolds cuando se analizan escenarios diferentes a los del flujo bidimensional uniforme.

En primer lugar se ha señalado en el apartado 2.4.2, que asociado a la presencia de corrientes secundarias de segundo orden de Prandtl en canales estrechos se produce un descenso del punto de mayor velocidad del flujo y una modificación en la distribución de tensiones de corte. Según el análisis presentado por Nezu y Nakagawa (1993) –ver Figura 2.18 y ecuación (2.60)–, las velocidades en la dirección vertical contribuyen de un modo muy importante a las tensiones de Reynolds cerca del lecho mientras que el flujo horizontal contribuye a las tensiones en la región externa.

Este análisis parece contradecir al desarrollado por Yang *et al.* (2006), realizado a partir del análisis de la ecuación (2.80). Según Yang, la contribución de las velocidades verticales

descendentes, asociadas a las células de recirculación superior que se producen en los canales estrechos, son las responsables del fenómeno de descenso de velocidad y también de la modificación de la distribución de tensiones de corte (ver Figura 2.25 y Figura 2.26).

Una inspección detallada de ambos análisis nos lleva a pensar que lo indicado por las dos referencias señaladas es correcto. De hecho, la afirmación de Nezu y Nakagawa (1993) está fundamentada en el análisis de las contribuciones que los términos SC_1 , SC_2 y $S_{uw'}$ a las tensiones de corte para una zona de flujo no situada en el centro del canal.

En la Figura 2.27 se presentan las mismas distribuciones de tensiones que fueron presentadas en la Figura 2.18, aunque en este caso se dibujan únicamente las contribuciones de los términos SC_1 , SC_2 y $S_{uw'}$ de la ecuación (2.60) para el plano central del canal ($y = 0$). Para este plano se puede ver cómo la mayor contribución a las tensiones de corte en la parte superior del fluido se corresponde con el término SC_1 , asociado a las velocidades verticales.

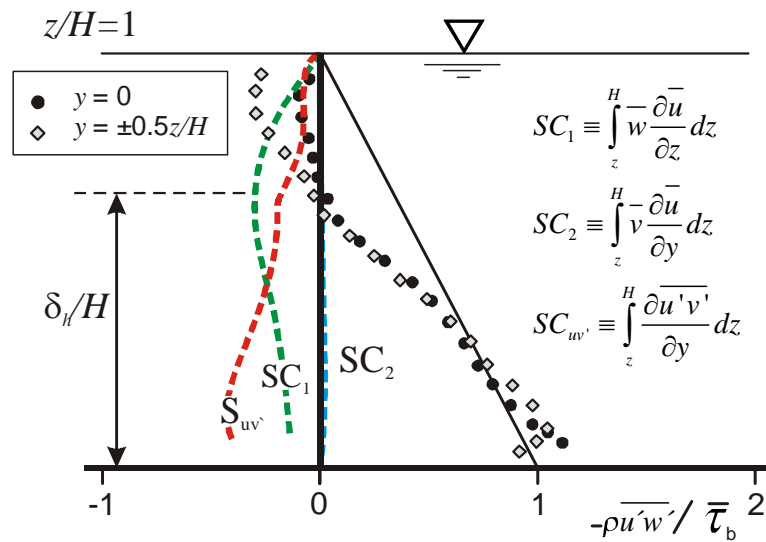


Figura 2.27. Distribución experimental de $-\rho \overline{u'w'}$ en un canal rectangular liso estrecho ($B/H=2$) con paredes y lecho de la misma rugosidad. Se han representado los términos de la ecuación (2.60) para la distribución de tensiones situada en el plano $y = 0$ (datos de Nezu y Nakagawa, 1993).

Por otra parte, el análisis realizado en Yang *et al.* (2006) sólo es válido para la zona central del flujo, ya que parte de ecuaciones bidimensionales, que no tienen en cuenta las células de corrientes secundarias. Cabe recordar que el estudio de Yang era para régimen permanente no uniforme 2D.

Por lo tanto, en las situaciones en la que existan corrientes secundarias y variabilidad del flujo, es decir flujo 3D no uniforme en canales rectos, se produce una interacción entre ambos procesos. No existen en la literatura estudios sistemáticos de este efecto ya que en los trabajos encontrados en la literatura (p.ej. Song, 1994; Kironoto y Graf, 1995 y Song y Chiew, 2001) las medidas se centraron en el centro del canal, y en muchos escenarios (la mayoría) el flujo podría considerarse 2D. De hecho, este era el objetivo buscado por los investigadores.

La interacción entre la velocidad vertical y la estructura de las tensiones también se puede apreciar en otros tipos de flujo. Por ejemplo, en los experimentos de Wang y Cheng (2005)

realizados en un canal ancho con bandas de diferente rugosidad longitudinal, se puede observar la relación entre la velocidad vertical y la forma de las tensiones de Reynolds (ver Figura 2.28).

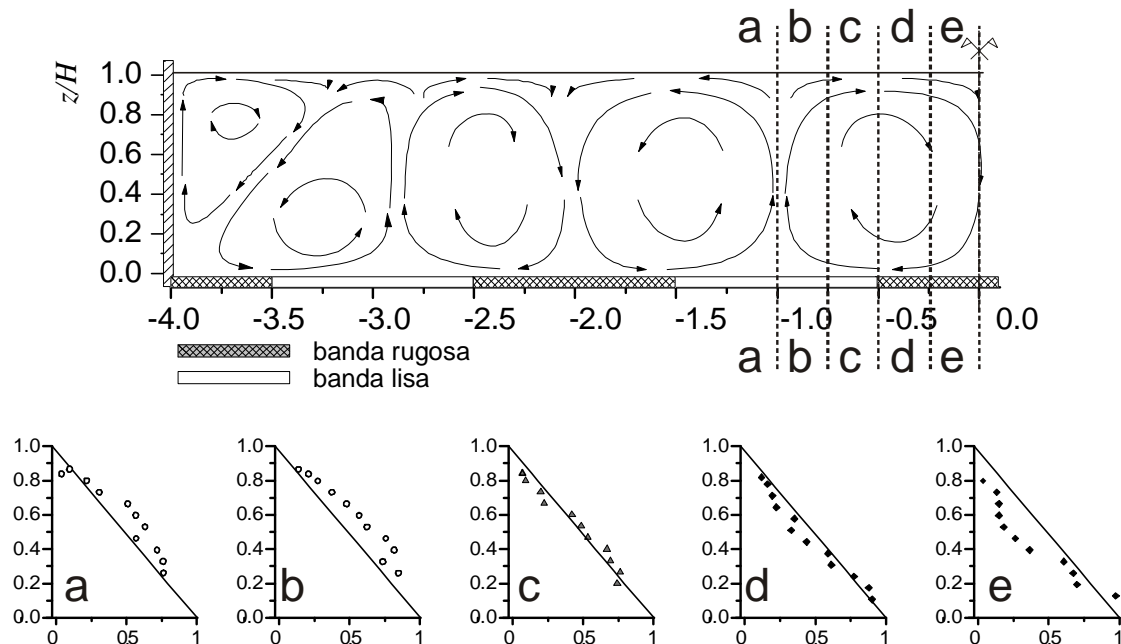


Figura 2.28. Relación entre las corrientes secundarias y la variación de las tensiones de Reynolds en un canal ancho con bandas de diferentes rugosidad (Wang y Cheng, 2005).

Este comportamiento también se pudo observar en los experimentos de Rodríguez y García (2008) que analizaron el patrón de las corrientes secundarias sobre un canal muy rugoso. Debido a la configuración geométrica de estos experimentos, en los que se empleó un velocímetro ADV, la región más cercana a la superficie no se ha podido medir ($z/H > 0.6$) por lo que la interacción no se aprecia tan claramente como en los experimentos de Wang y Cheng (2005).

Flujos en régimen variable

Otro aspecto que modifica la estructura del flujo es su variabilidad temporal. Existen muy pocos estudios sobre fenómenos en régimen no permanente, debido fundamentalmente a la dificultad de sistematizar este tipo de trabajos y a la propia dificultad de realizarlos. Por ejemplo, se requieren metodologías especiales para promediar las variables hidrodinámicas ya que en estas condiciones no se puede realizar una media temporal de todos los registros (Bendat y Piersol, 2000)³⁷.

³⁷ Por ejemplo, para flujos ondulatorios se puede emplear el método de promediado de fase, poco útil cuando se quieren analizar ondas largas (con mucho periodo) como el tránsito de una avenida. Para estos casos se pueden aplicar medias móviles o, mejor aún, métodos basados en la realización de descomposiciones de Fourier. Una completa revisión de las metodologías de tratamiento de datos no estacionarios se puede encontrar en el capítulo 12 de Bendat, J.S. y Piersol, A.G. (2000). *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. 3rd Ed. New York, Wiley & Sons. Desde un punto de vista más práctico se puede también revisar la metodología aplicada por Song (1994).

Esta carencia de estudios en régimen variable se puede extrapolar a otras áreas de trabajo de la ingeniería hidráulica como el transporte de sedimentos o los fenómenos de erosión local.

Song (1994) realizó algunos ensayos en régimen variable acelerado (buscaron pendientes adversas para evitar el transporte de las gravas de lecho). Para estas condiciones parece que la ley logarítmica de velocidades es válida en la región interna del flujo. El valor del coeficiente B encontrado por Song tiene un rango de variación mucho mayor que para los casos de flujo uniforme o variado, $B=8.5\pm 1.3$, siendo los valores ligeramente inferiores a la media durante el ascenso del hidrograma y ligeramente superiores durante la cola del mismo. En la región externa, la ley de Coles (2.37) sigue siendo válida, aunque los valores de Π presentan mucha dispersión y dependen de parámetros como el coeficiente longitudinal de presiones adimensional β -ecuación (2.73)- y de la relación de aspecto B/H .

Respecto a la distribución de tensiones de Reynolds, Song (1994) encontró que todas tenían una marcada forma cóncava, aunque en los momentos de menor variabilidad del flujo ($\partial(\cdot)/\partial t \approx 0$), seguían un patrón lineal. Además, la magnitud de las tensiones en la rama de ascenso del hidrograma es mayor que en la rama de descenso. Por último hay que señalar que Song propone una ley de variación de las tensiones de Reynolds par flujo variable, basada en la integración de las ecuaciones RANS bidimensionales empleando una aproximación potencial de la ley de velocidades. El ajuste de esta ley, que no se presentará aquí, con los valores experimentales es bastante bueno cuando la pendiente del lecho es reducida.

Transporte de sedimentos

Cuando en un lecho aluvial las tensiones de corte superan a las del umbral de movimiento de los sedimentos también se producen efectos sobre la forma del perfil de velocidades y sobre la estructura de las tensiones tangenciales.

Coleman (1981) sugirió que por la presencia de sedimentos en suspensión se produce una modificación del perfil de velocidades que afecta a la zona cercana al lecho y también al coeficiente de estela de Coles. Esta desviación con respecto al perfil teórico para flujos 2D uniformes se acentúa a medida que el caudal sólido se incrementa.

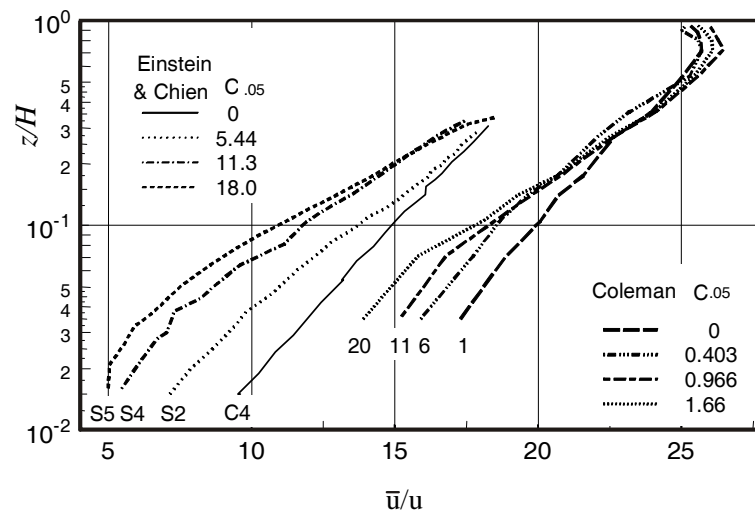


Figura 2.29. Variación de los sedimentos en suspensión con varias concentraciones de sedimentos en suspensión. $C_{0.05}$ (%) representa la concentración volumétrica de sedimentos en suspensión para $z/H=0.05$. El resto de datos y referencias se pueden consultar en Wang et al., (2001).

En la Figura 2.29 se presentan varios perfiles de velocidad para diferentes concentraciones volumétricas de sedimentos medidas a una distancia de $0.05 z/H$ del fondo (Wang *et al.*, 2001). En la gráfica se puede comprobar cómo la presencia de sedimentos reduce las velocidades del flujo de un modo significativo hasta una distancia de $\sim 0.4 z/H$.

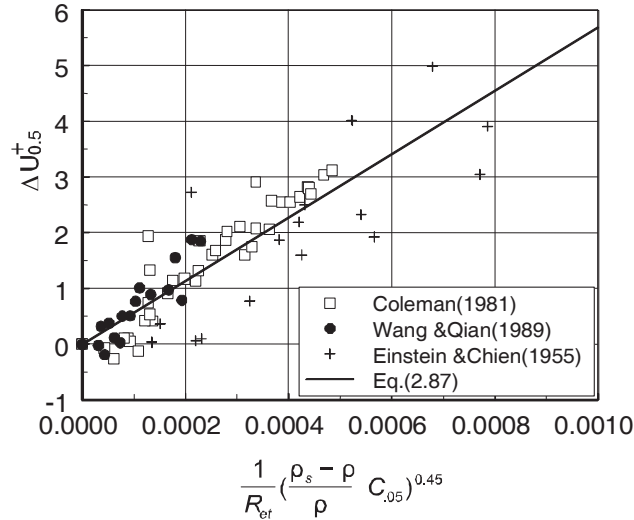


Figura 2.30. Relación entre la diferencia de velocidades en flujos con sedimentos en suspensión y la ecuación (2.87) (datos y referencias de Wang *et al.*, 2001).

El descenso de las velocidades cerca del fondo fue cuantificado por Wang *et al.* (2001) a través de la siguiente expresión, obtenida a partir del ajuste de los datos recogidos en 3 artículos (Figura 2.30):

$$\Delta U_{0.05}^+ = \frac{U_{0.05C} - U_{0.05S}}{u_*} \quad (2.87)$$

donde los subíndices $U_{0.05C}$ y $U_{0.05S}$ representan las velocidades medias a $0.05 z/H$ para las condiciones de aguas claras y con transporte de sedimentos. La expresión anterior se puede poner en función del número de Reynolds $Re_t = R_H u_*/\nu$, de las densidades del sedimento y del agua, y de la concentración medida a $0.05 z/H$:

$$\Delta U_{0.05}^+ = \frac{5700}{Re_t} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} C_{0.05} \right)^{0.5} \quad (2.88)$$

Con respecto a la distribución de tensiones, en la literatura se ha señalado que la intensidad turbulenta $\overline{w'^2}$ está directamente relacionada con la distribución de sedimentos en suspensión. De hecho, Song (pág. 3-21, 1994) demuestra que la forma del perfil de concentraciones y del perfil de intensidades turbulentas en la dirección w es similar.

Geometrías complejas: canales compuestos y flujo en curva

En canales compuestos (p.ej. con cauce y llanura de inundación), la estructura de la turbulencia se corresponde con la de un flujo 3D más complejo que para canales rectos (Nezu, 2005). Existen muchos trabajos en modelo físico, tanto en canales rectos como meandriformes, debido a la importancia de este tipo de flujos que se encuentran en la ingeniería fluvial (ver

entre otros Shiono y Knight, 1991; Tominaga y Nezu, 1991; Shiono y Muto, 1998; Ervine *et al.*, 2000; Patra y Kar, 2000; Nicholas y McLelland, 2004; Rameshwaran y Nadem, 2004; Wormleaton *et al.*, 2004; Wormleaton y Ewunetu, 2006; Knight *et al.*, 2007; Nguyen *et al.*, 2007; Rameshwaran y Shiono, 2007; Shiono *et al.*, 2009a, b).

Durante los últimos 30 años se han realizado numerosos estudios numéricos y experimentales con diferentes niveles de aproximación. Se pueden encontrar en la literatura soluciones analíticas, con base conceptual o empíricas, para analizar la distribución de velocidades o de tensiones tangenciales entre cauce y llanura. Recientemente se ha publicado un monográfico de la IAHR (*International Association for Hydro-Environment Engineering and Research*) en la que se estudia la influencia de la geometría, rugosidad, distribución de sedimentos, condiciones de lecho, etc. en la estructura del flujo (Ikeda y McEwan, 2009).

En este tipo de flujos la transferencia de momento entre la llanura y el cauce principal es la causante de la formación de tensiones de corte en el plano vertical. Estas tensiones, junto con el fuerte gradiente de velocidades verticales que se forman por la anisotropía de la turbulencia en el plano de contacto cauce-llanura –ver Figura 2.31–, son las responsables de la generación de la energía cinética turbulenta.

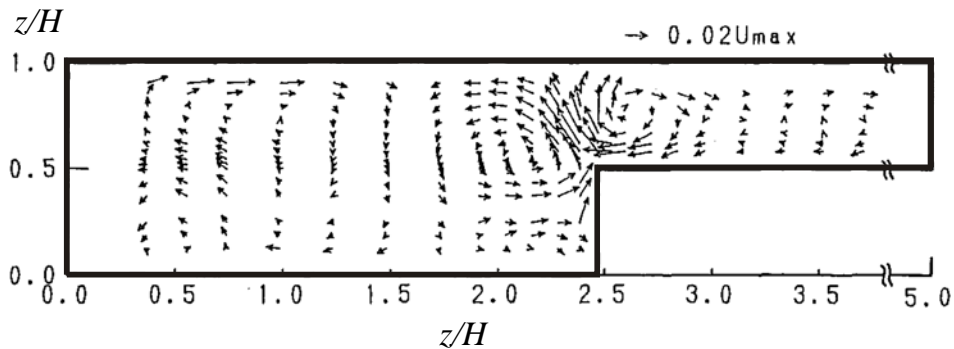


Figura 2.31. Corrientes secundarias en un canal compuesto recto (Tominaga y Nezu, 1991).

Cuando los cauces son curvilíneos, la complejidad del flujo se incrementa debido a la aparición de fuerzas centrífugas y generación de corrientes en curvas. Además, sí el agua circula sobre la llanura y el cauce, se produce una fuerte interacción entre el flujo multidireccional que circula por el cauce y la llanura, especialmente en las zonas donde el agua de la llanura penetra en el cauce y en las zonas donde el cauce se “desborda” (Figura 2.32).

Como se ha comentado, existe mucha literatura relacionada con este tipo de flujos, que por otra parte, se escapan del ámbito de esta tesis doctoral. Sin embargo, la mayor parte de los estudios encontrados en la literatura analizan geometrías simples, como el canal Wallingford, que tiene planta sinusoidal. Debido a la naturaleza de las simplificaciones adoptadas en la modelización numérica y física, muchas veces los resultados no siempre son aplicables directamente a entornos fluviales reales.

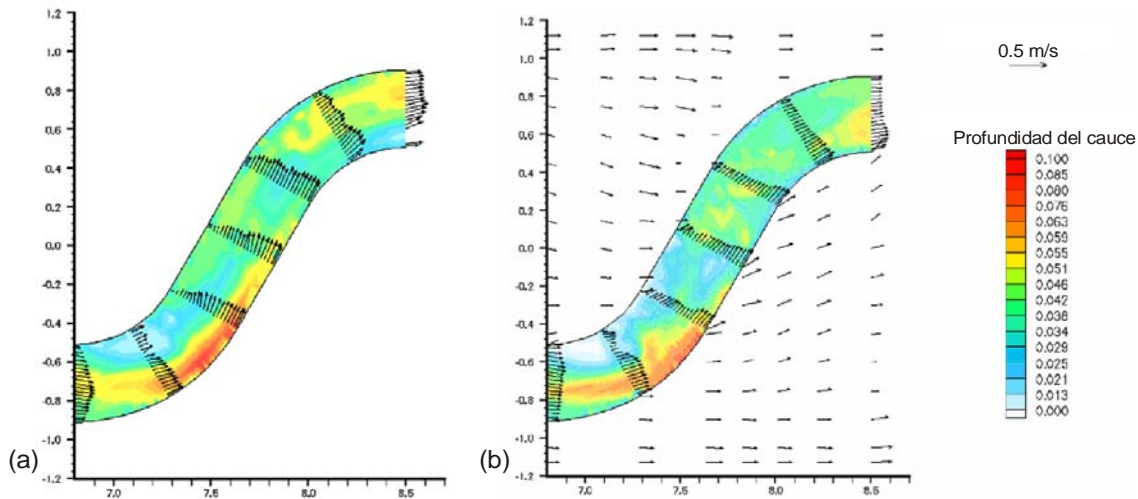


Figura 2.32. Distribución de velocidades promediada sobre el calado en dos ensayos con condiciones de cauce lleno y con un desbordamiento de $0.30H$ realizados en el canal de Wallingford (Shiono *et al.*, 2009a).

Influencia de la rugosidad del lecho. Aproximación DAM

Ya se ha comentado que cuando el lecho es rugoso y/o las condiciones de sumergencia relativa son muy bajas, la estructura de las regiones de flujo se modifica con respecto al caso de flujo 2D uniforme. Asociado a este cambio de la estructura del lecho la forma de las leyes de velocidades y de las distribuciones de las tensiones de corte también lo hace.

En esta situación, y de forma general, la distribución de las tensiones de corte se puede obtener de la integración de la ecuación dinámica doblemente promediada en la dirección z (2.26). Esta integración se define como el sumatorio de las rebanadas, o paralelepípedos, del dominio analizado desde los senos del lecho (en lechos impermeables) hasta la cota de la lámina de agua (Coleman *et al.*, 2007b):

$$gS_o \int_z^{\bar{z}_{ws}} \phi dz = \int_z^{\bar{z}_{ws}} \left[\phi \langle \bar{u}_i \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi \langle \bar{p} \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \phi \langle \bar{u}' u_i' \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial \phi \langle \bar{u} \tilde{u}_i \rangle}{\partial x_i} \right] dz \quad (2.89)$$

$$- \int_z^{\bar{z}_{ws}} \frac{1}{V_0} \int_{S_{int}} \left[\frac{\bar{p}}{\rho} \mathbf{n}_{i=1} - \nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_i} \right] dS dz$$

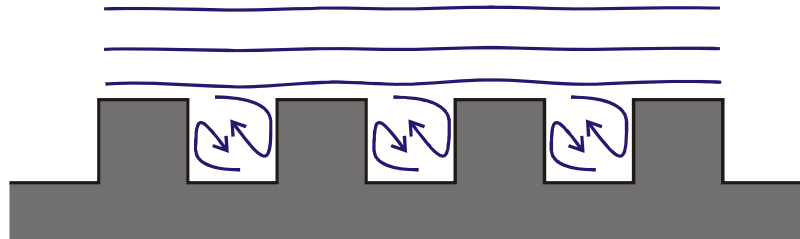
En esta expresión se ha tenido en cuenta la no uniformidad del flujo, la presencia de corrientes secundarias y la existencia de esfuerzos de corte de arrastre de grano y forma (a través de la segunda integral del lado derecho de la ecuación). También hay que señalar que la contribución de los esfuerzos viscosos a las tensiones de corte se ha supuesto despreciable.

Con objeto de comentar la influencia de cada término de la ecuación en el balance del flujo de cantidad de movimiento, en definitiva, su contribución a las leyes de esfuerzos de corte, se presentarán a continuación los principales resultados del trabajo realizado por Coleman *et al.* (2007b).

Estos autores realizaron una serie de experimentos de flujo sobre rugosidades de tipo $-k$ y de tipo $-d$ (ver Figura 2.33), traviesas cuadradas de $\Delta=1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ de sección, analizando la influencia de la separación relativa de las mismas (λ/Δ) para una sumergencia relativa alta

($H/\Delta=10$). En este tipo de flujos, la separación relativa de las rugosidades determina la estructura del mismo. Habitualmente la barrera entre las rugosidades tipo $-d$ y tipo $-k$, flujo rasante o aislado sobre cada obstáculo, se sitúa en $\lambda/\Delta=4-5$ (Jiménez, 2004).

flujo sobre traviesas tipo -d



flujo sobre traviesas tipo -k : $\lambda/\Delta > 4-5$

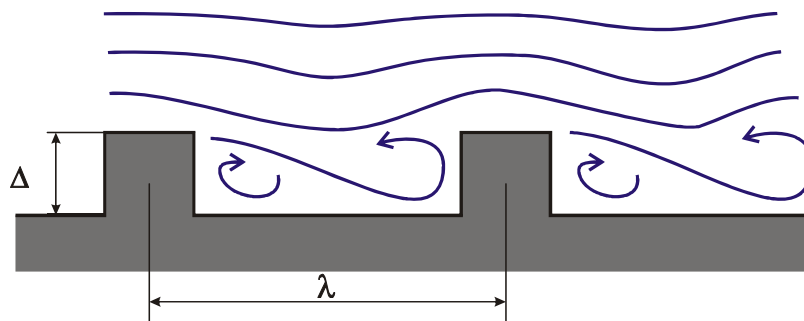


Figura 2.33. Esquema de un flujo sobre traviesas formando rugosidades de tipo $-d$ y tipo $-k$.

Coleman *et al.* (2007b) determinaron los perfiles de velocidades y de tensiones de corte doblemente promediados sobre una longitud de onda de rugosidad con ayuda de un ADV. Para evaluar las fuerzas de arrastre de presión sobre la superficie horizontal de las traviesas emplearon un transductor de presión. Estos autores señalan que no han podido determinar correctamente la no uniformidad del flujo porque miden una longitud de onda de rugosidad. Para poder estimar la influencia de la no uniformidad de un modo correcto se tendría que ampliar el dominio del promediado espacial a 3 o 4 longitudes de onda.

El comportamiento de las tensiones de Reynolds doblemente promediadas $-\rho\overline{u'w'}$ es máximo a la altura de la capa de corte que se forma aguas abajo de la superficie horizontal de las traviesas, siguiendo hasta esta zona una tendencia lineal. A medida que la separación de las traviesas crece, también lo hace la tendencia lineal de las tensiones. Este patrón es similar al encontrado en flujos sobre lechos rugosos de gravas (Aberle *et al.*, 2008; Mignot *et al.*, 2009)

Para rugosidades tipo $-k$, $\lambda/\Delta > 5$, a la altura de la capa de corte la distribución de tensiones de Reynolds presenta un pico abrupto local, que se sale de la tendencia lineal. Estos máximos, asociados a la separación del flujo, también se han encontrado en trabajos sobre lechos de dunas. Hay que señalar que a medida que λ/Δ crece, también lo hacen las tensiones de Reynolds hasta que $\lambda/\Delta \sim 8$. A partir de este espaciamento, se considera que los obstáculos funcionan esencialmente como obstáculos aislados, y las tensiones de Reynolds comienzan a decrecer.

Las tensiones de forma $-\rho\langle\tilde{u}\tilde{w}\rangle$ por encima de la superficie de las traviesas son prácticamente nulas, aunque para las mayores separaciones toman valores ligeramente negativos hasta una distancia de $\sim 3\Delta$ por encima de la traviesa.

Por debajo de $z=\Delta$, las tensiones de forma son positivas, con picos más pronunciados para las condiciones de flujo rasante, que pueden llegar a tener el orden de magnitud que el de las tensiones de Reynolds $-\rho\langle\overline{u'w'}\rangle$. Para las rugosidades de tipo $-k$ el valor de las tensiones inducidas por forma es aproximadamente un $\sim 10\%$ del término $-\rho\langle\overline{u'w'}\rangle$. Este comportamiento sin duda afecta a la distribución de tensiones sobre todo el tramo.

En la Figura 2.34 se presenta el flujo de cantidad de movimiento, que es la distribución de tensiones pero influida por la función de rugosidad de lecho ϕ , para $\lambda/\Delta=2$ y $\lambda/\Delta=16$. En esta figura se presentan las siguientes componentes del flujo de *momentum*, derivadas de la ecuación (2.89) para el caso de flujo en canal recto con flujo no uniforme y con corrientes secundarias:

- Las tensiones de Reynolds, $-\rho\phi\langle\overline{u'w'}\rangle$
- Las tensiones inducidas por forma o dispersivas, $-\rho\phi\langle\tilde{u}\tilde{w}\rangle$
- Las fuerzas de arrastre de presión o de forma, $-\int_z^{z_{ws}} \frac{1}{V_0} \int \int_{S_{int}} \bar{p} [n_{i=1}] dS dz$
- Las fuerzas de arrastre de grano o fricción, $+\int_z^{z_{ws}} \frac{1}{V_0} \int \int_{S_{int}} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) n_j dS dz$.
- El efecto de las corrientes secundarias y no uniformidad del flujo, cuantificado conjuntamente cómo $\int_z^{z_{ws}} \left[\rho\phi\langle\bar{v}\rangle \frac{\partial \langle\bar{u}\rangle}{\partial y} + \rho\phi\langle\bar{w}\rangle \frac{\partial \langle\bar{u}\rangle}{\partial z} + \rho \frac{\partial \phi\langle\overline{u'v'}\rangle}{\partial y} + \rho \frac{\partial \phi\langle\tilde{u}\tilde{v}\rangle}{\partial y} \right]$

En la Figura 2.34 se puede observar cómo la forma del perfil de tensiones es cóncava, por lo que el flujo está acelerado. También se puede ver cómo la suma de todas las componentes de la parte derecha de la ecuación (2.89) da un perfil razonablemente similar al proporcionado por la evaluación del término gravitatorio. Las diferencias entre estos perfiles se atribuyen a errores experimentales en la determinación de las presiones y también a problemas asociados a la alineación de los ejes del equipo ADV. Este problema se ha reportado en otros trabajos encontrados en la literatura (ver p.ej. Nikora y Goring, 1998; Rodríguez y García, 2008)

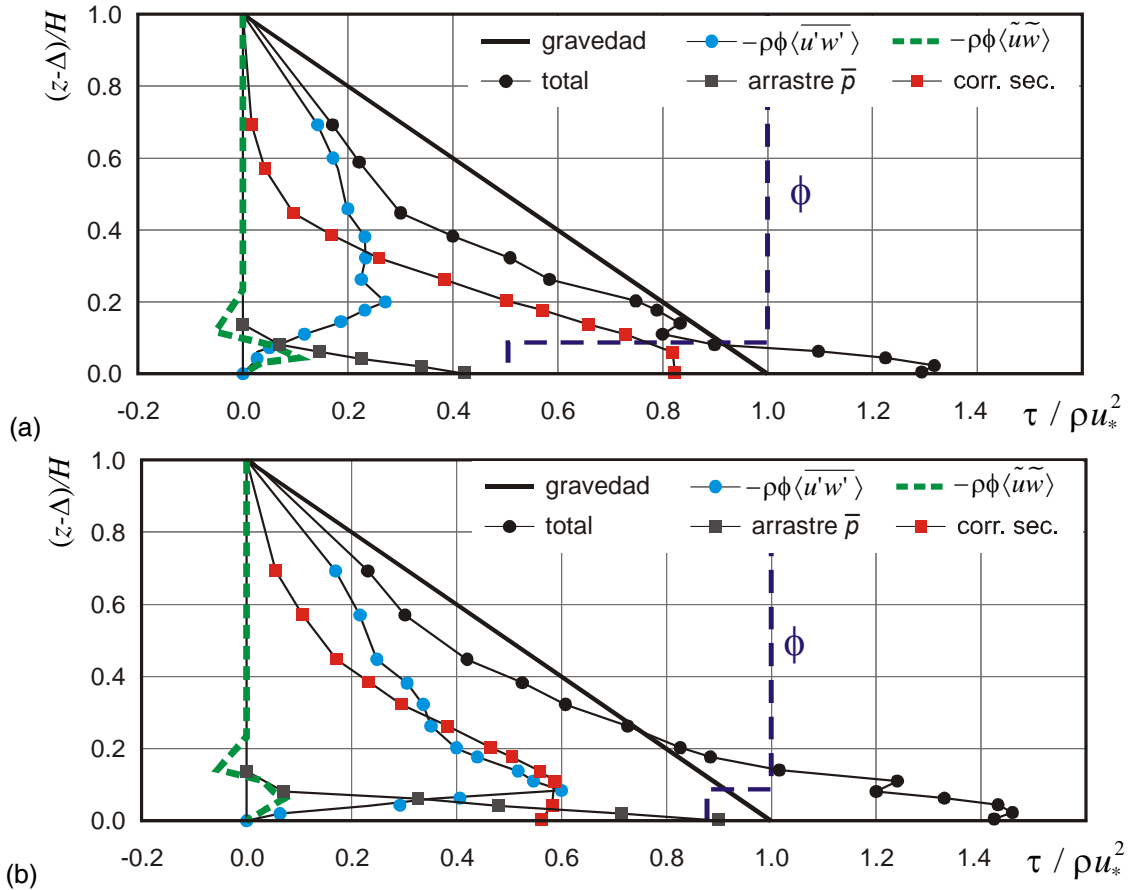


Figura 2.34. Contribución de las tensiones de corte en flujo de tipo $-d$ y $-k$ con presencia de corrientes secundarias: (a) $\lambda/\Delta=2$ y (b) $\lambda/\Delta=16$ (Coleman et al., 2007b).

Quizás lo más interesante del trabajo de Coleman *et al.* (2007b) es que han demostrado la importancia de las corrientes secundarias en la determinación de las tensiones de corte. Si el término asociado a las corrientes secundarias no se hubiese determinado, una extrapolación directa de las tensiones de Reynolds hasta el lecho, o de la suma de las tensiones de Reynolds y forma (Aberle *et al.*, 2007), habría llevado a subestimar de forma considerable la velocidad de corte (especialmente para los flujos rasantes) y las tensiones tangenciales sobre el lecho. La aparición de estas tensiones se puede atribuir a las propias rugosidades que generan un flujo 3D, y también a la relación de aspecto de los ensayos que fue $B/H=3$.

En las Figura 2.34 también se puede comprobar como la contribución de los esfuerzos de arrastre de presión, determinados con ayuda de un transductor piezorresistivo, por debajo de la superficie de la travesía son muy importantes. Para el flujo rasante, del orden del 40% de la tensión total, y para el flujo aislado del orden del 70%, ambos determinados al nivel del fondo. Además, en la figura no se han presentado deliberadamente las tensiones de forma asociadas al grano o a la fricción (*skin friction*) ya que su contribución era mínima. En general, en flujos rugosos, la contribución de este término a los esfuerzos de corte es despreciable (Raupach *et al.* 1991).

Como acabas de ver, y como ya se señaló cuando se obtuvieron las ecuaciones DANS (apartado 2.2.3), las fuerzas de arrastre de presión y fricción son importantes únicamente por debajo de las crestas del lecho. Su determinación experimental es compleja ya que las incertidumbres asociadas a la obtención de las presiones y de los gradientes de velocidades en

esta región son elevadas (Coleman *et al.*, 2007b; Coleman *et al.*, 2008). Sin embargo su influencia en algunos procesos hidrodinámicos es fundamental y así, existe mucha literatura relacionada con su obtención para el análisis de las formas de fondo y el transporte de sedimentos en lechos aluviales³⁸.

Para analizar estos esfuerzos, es habitual realizar una parametrización cuadrática de las fuerzas de arrastre de presión, o de presión y fricción, empleando el coeficiente de arrastre C_D (Coleman *et al.*, 2007a):

Para las tensiones de forma (presión) en flujos bidimensionales se puede hacer la siguiente parametrización cuadrática de todos los esfuerzos de forma:

$$\frac{1}{V_f} \int \int_{S_{int}} \left(\bar{p} [n_{i=1}] - \nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_j} n_j \right) dS = - \frac{dF}{V_f} \quad (2.90)$$

donde el elemento diferencial de fuerza se puede medir experimentalmente o estimar a partir del coeficiente de arrastre C_D si este es conocido:

$$dF = 0.5 C_D \cdot \psi dz \cdot u^2 \quad (2.91)$$

En la ecuación (2.91), $\psi = \sum dy$ es la suma de todas las rugosidades en la dirección y en el volumen total V_o de espesor dz . Entonces ψdz es el área frontal del elemento a la altura a la que se realiza el promediado. Sustituyendo $u = \langle \bar{u} \rangle + \tilde{u} + u'$ en la ecuación anterior y considerando que las correlaciones cruzadas son de segundo orden se tiene:

$$C_D = \frac{dF}{0.5 \psi dz (\langle \bar{u} \rangle^2 + \langle \tilde{u} \tilde{u} \rangle + \langle u' u' \rangle)} \quad (2.92)$$

Otros métodos para determinar las fuerzas de arrastre para flujos bidimensionales sobre otro tipo de objetos como cilindros o perfiles de ala de avión se pueden ver en Willert, (2007).

Los valores del coeficiente de arrastre para formas de fondo y otras rugosidades como traviesas se pueden consultar en la literatura (Coleman *et al.*, 2007b). Los valores del coeficiente de arrastre para berberechos enteros aislados sobre un lecho de arena han sido determinados por miembros del GEAMA (*Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente*) de la UDC en trabajos anteriores (Peña *et al.*, 2008). En este trabajo también se presenta un resumen con los valores de los coeficientes de arrastre para otro tipo de moluscos (ver C4.2).

Una variable importante a la hora de estimar, y comparar con otros estudios, el valor de C_D es la velocidad característica con la que este parámetro se determina. Una discusión sobre este aspecto se puede encontrar en Coleman *et al.*, (2007a) y en Peña *et al.*, (2008).

³⁸ Existen varios métodos para conocer la contribución de los términos de arrastre y fricción a la fuerza total de arrastre que ejerce un fluido sobre los granos de un lecho. Son los métodos denominados *shear stress partitioning*, muy habituales en hidráulica fluvial. Una revisión de los mismos se puede encontrar p.ej. en el capítulo 2 del Manual 110 de la ASCE: *Sedimentation Engineering: Theories, Measurements, Modeling and Practice: Processes, Management, Modeling and Practice*. ASCE Manual and Reports on Eng. Practice 110. García (2008).

En flujos sobre lecho granular, se puede decir que la distribución de tensiones de corte y de las velocidades en la vertical se encuentra en un punto intermedio entre las rugosidades más extremas: tipo $-d$ para $\lambda/\Delta=0$, lecho liso, y tipo $-k$ para $\lambda/\Delta \gg 1$, lecho aislado sobre un obstáculo, p.ej. un canto.

Aberle et al. (2007 y 2008), analizaron las tensiones de corte sobre un lecho granular con condiciones de sumergencia relativa entre 3 y 8. Para estas condiciones encontraron que las tensiones de forma, así como el perfil de intensidades turbulenta de forma $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ son independientes del caudal. El incremento en las tensiones de corte para caudales mayores se realiza en términos de tensiones de Reynolds, por lo que estos autores concluyen que las microrugosidades en lechos granulares son las causantes de las tensiones inducidas por forma.

Con respecto a la distribución de velocidades, la forma y distribución de las rugosidades, así como las condiciones de sumergencia relativa, son los principales parámetros que determinan la estructura vertical de las mismas.

Mignot et al. (2009), realizaron un análisis del balance de energía cinética turbulenta doblemente promediada sobre un lecho de gravas $d_{50}=2$ cm, con ayuda de un perfilador doppler ADV, sobre un longitud de 1 m. En el tramo analizado dispusieron 2 macrorugosidades de 10 cm en forma de montón de gravas.

En la Figura 2.35 se presentan los perfiles de velocidad doblemente promediados obtenidos por estos autores. En la figura se observa la diferencia que existe entre el doble promediado intrínseco, realizado sobre todo el volumen V_0 , y el doble promediado superficial, realizado únicamente sobre la superficie de fluido V_f , ecuación (2.17).

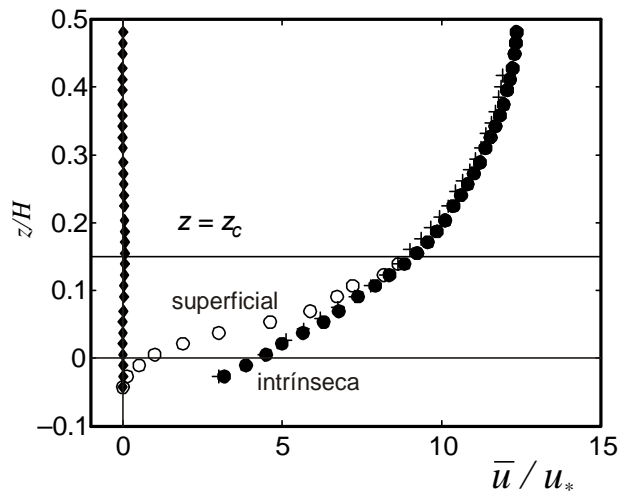


Figura 2.35. Velocidades horizontales, intrínsecas y superficiales, y verticales doblemente promediadas sobre un lecho de grava (Mignot et al. 2009).

Para valores de velocidad por encima de las crestas, ambos perfiles coinciden. Por debajo de las mismas, el perfil superficial se retarda por efecto de la función de rugosidad. En flujos sobre vegetación sería esperable que ambos perfiles coincidiesen, debido a que la función de rugosidad es prácticamente constante y de valor unitario (Lopez y Garcia, 2001). En la Figura 2.35 también se puede apreciar cómo por debajo de las crestas, el perfil de velocidades intrínseco sigue una distribución casi lineal, de acorde a la zonificación del flujo propuesta por Nikora et al. (2001), presentada en el apartado 2.3.1.

En lechos de grava también es interesante analizar la forma de la estructura de velocidades que se forma localmente sobre las rugosidades del lecho. Una forma de hacerlo es a través del estudio del campo de la perturbación espacial de la velocidad doblemente promediada (\tilde{u}, \tilde{w}) .

Estas perturbaciones son un indicador de patrones y estructuras “coherentes” del flujo (ver apartado 2.5.1 y p.ej. Coleman *et al.*, 2007b, o Pokrajac *et al.*, 2007). Aberle *et al.* (2008) señalan que aguas arriba de los cantos más prominentes del lecho se producen las zonas de mayor velocidad \tilde{w} ascendente.

Hoover y Ackerman (2004), tras realizar un estudio de campo en un río de montaña muy somero, propusieron una clasificación de los perfiles de velocidad que se pueden producir en el entorno de grandes rugosidades del fondo, donde las condiciones de flujo son habitualmente de baja sumergencia. Así, según estos autores, los perfiles que se pueden encontrar son del tipo logarítmico, en forma de S y en forma de cuña. En otros trabajos sobre lechos aluviales se han identificado otras formas para los perfiles de velocidad en condiciones de baja sumergencia cómo el perfil doblemente logarítmico (Franca, 2005).

Los perfiles tipo S se suelen encontrar aguas abajo de los grandes cantos, tras las estelas que se forman en la separación de flujo. Estos perfiles están caracterizados por poseer un punto de inflexión, condición imprescindible para que se formen las inestabilidades de Kelvin³⁹-Helmholtz⁴⁰, características de los vórtices que se forman en las capas de cortadura y mezcla. Bathurst (1985, citado por Termini y Greco, 2006) identificó también este tipo de perfil en flujos sobre lechos de grava con grandes pendientes (>1%) y con bajas condiciones de sumergencia ($H/d_{84} \sim 1-4$).

En general, los perfiles en S se producen cuando los elementos del lecho no tienen tamaño uniforme para que se pueda desarrollar la parte inferior del flujo. En estas circunstancias la velocidad cerca del lecho se retrasa por efecto de las fuerzas de arrastre inducidas por la presencia de los cantos -aparición de estelas y capas de mezcla-.

Por último, los perfiles en cuña o acelerados se producen habitualmente sobre las grandes rugosidades. Por encima del nivel de las crestas son similares a los logarítmicos, pero a partir de este nivel su velocidad cae rápidamente hasta cero. En estas zonas también se suelen encontrar las tensiones de corte máximas (Hoover y Ackerman, 2004).

Mignot *et al.* (2009) lograron identificar este tipo de perfiles en su trabajo sobre gravas en laboratorio, Figura 2.36. En esta figura también se presenta la distribución de tensiones de Reynolds característica de cada tipo de perfil de velocidades. Respecto a las tensiones se puede observar que para el perfil tipo S, a una profundidad de $z/z_c \sim 0.5$ se produce un pico que se sale de la tendencia del promedio de todas las clases de perfil. Este comportamiento es similar al encontrado en flujo sobre traviesas cuando estas están aisladas (Coleman *et al.*, 2007b).

³⁹ William Thomson, desde 1892 1er Varón Kelvin de Largs: * 1824, Belfast (UK); † 1907, Netherhall (UK)

⁴⁰ Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz: * 1821, Potsdam (Prusia); † 1894, Charlottenburg (GER)

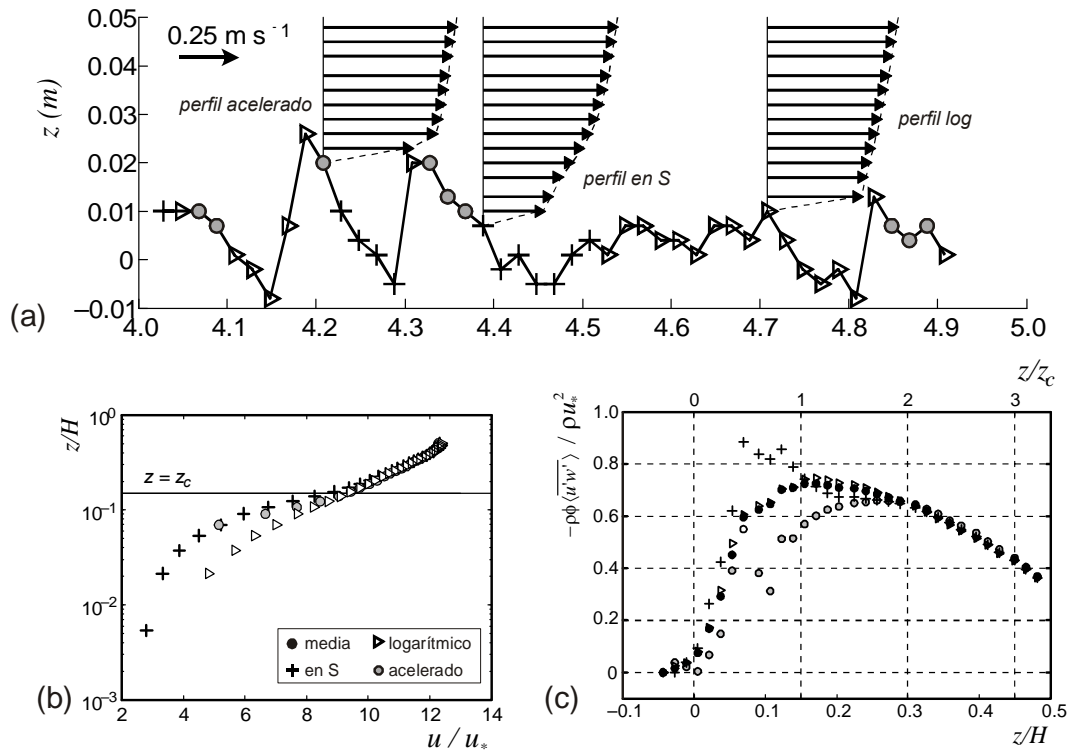


Figura 2.36. (a) Localización de los diferentes tipos de perfil de velocidad encontrados por Mignot et al. (2009) sobre un lecho de gravas en laboratorio, (b) y (c) distribución doblemente promediada de las velocidades y tensiones de Reynolds características de los perfiles logarítmicos, tipo S y acelerados (Mignot et al., 2009).

2.4.5. Determinación de u^*

La velocidad de fricción u_* es quizás la escala de velocidades característica más importante a determinar en la hidráulica de canales abiertos. Esta velocidad se emplea para escalar las leyes de velocidades medias en la región interna del flujo, y también para adimensionalizar las leyes de otros momentos estadísticos de orden superior (tensiones, intensidades turbulentas, etc). A través de esta relación de escala (u^+) se produce el colapso (superposición) de estas leyes (u^+) y este el argumento que se emplea para considerarlas universales.

Además, esta es la escala característica a la que se produce la transferencia de cantidad de movimiento entre el fluido y el contorno por el que circula, por lo que por definición es el parámetro empleado para determinar los esfuerzos de corte:

$$\tau_0 \equiv \rho u_*^2 \tag{2.93}$$

A pesar de la universalidad de este parámetro, en la literatura se pueden encontrar numerosos métodos para su determinación.

En hidráulica fluvial y de canales abiertos, el método más empleado para determinar la velocidad de fricción consiste en igualar la tensión de corte definida en la ecuación (2.93) con la fuerza gravitatoria que ejerce el fluido sobre el contorno, ecuación (2.52). De este modo:

$$u_* = \sqrt{gS_b H} \quad (2.94)$$

Recordemos que esta expresión es válida únicamente para flujos 2D en régimen permanente y uniforme en canales impermeables anchos ($R_H \sim H$). Se puede generalizar para canales estrechos sustituyendo el valor del calado por el del radio hidráulico.

Cuando el régimen es permanente pero no uniforme en la ecuación anterior se debe sustituir la pendiente hidráulica por la pendiente motriz:

$$u_* = \sqrt{gS_o H} \quad (2.95)$$

Empleando las ecuaciones de Saint-Venant, para canales rectos y flujo 2D gradualmente variado, se puede llegar a (Afzalimehr y Ancil, 2000):

$$u_* = \sqrt{gH \left(S_b - \frac{dh}{dx} (1 - Fr)^2 \right)} \quad (2.96)$$

En estudios en modelo físico el principal inconveniente de este método consiste en la determinación precisa de la pendiente motriz, especialmente en tramos cortos como la zona de estudio de un canal de laboratorio. En estas situaciones, la incertidumbre de los registros de los limnímetros puede llegar a ser del mismo orden de magnitud, o incluso superior, que el gradiente de calados.

Además, en flujos complejos como el que se produce en tramos curvos o canales compuestos meandriformes, la determinación de otros parámetros como la pendiente del terreno o el radio hidráulico está sujeto a subjetividades asociadas a las irregularidades del terreno o a la correcta definición de las secciones transversales. A pesar de estos inconvenientes, este método, junto con los dos próximos, es uno de los más empleados en la literatura para estimar la velocidad de corte (ver entre otros Nezu y Nakagawa, 1993; Kironoto y Graf, 1994; Song, 1994; Kironoto y Graf, 1995; Shiono y Muto, 1998; López y García, 1999; Afzalimehr y Ancil, 2000; Coleman *et al.*, 2007a; Manes *et al.*, 2007).

Otra forma de estimar la velocidad de corte es a través del ajuste de la *ley logarítmica de velocidades* o *método de Clauser* (1956). La metodología consiste en ajustar la ecuación (2.32) en la región logarítmica. En el apartado 2.3.2.1 se han presentado varias formas de expresar la ley logarítmica de velocidades, y los valores habituales de las constantes universales de la misma para flujos lisos y rugosos.

Los principales problemas de este procedimiento surgen cuando el flujo no es 2D uniforme. Así, las corrientes secundarias en canales estrechos o cerca de los contornos (§2.4.2), la no uniformidad del flujo (§2.4.3), el transporte de sedimentos o las condiciones de baja sumergencia (§2.4.4), son factores que alteran la estructura vertical del flujo y reducen la aplicabilidad de la ley logarítmica.

Además, existen otra serie de problemas relacionados con la obtención de todos los coeficientes de la ley especialmente en flujos rugosos. Aún asumiendo que los parámetros κ y B (ecuaciones (2.32) y (2.33), §2.3.2.1) son constantes universales, hay que estimar la rugosidad equivalente de Nikuradse (las referencias dan un orden de magnitud de entre 0.5 y 4-5 veces el diámetro característico del grano) y la posición del plano $z=d$ (§2.3.2.1 y §2.3.2.2).

Por tanto estamos ante un problema mal condicionado ya que tenemos una única ecuación para determinar 3 coeficientes. Por este motivo, los coeficientes obtenidos de la regresión lineal

de los datos experimentales tienen un error estándar relativamente elevado (Dancey y Diplas, 2008). Un análisis de la sensibilidad de estos parámetros en la estimación de la tensión de corte sobre el contorno, y por tanto de la velocidad de fricción, se puede consultar en Biron *et al.*, (1998).

El tercer método más empleado para determinar las tensiones de corte consiste en extrapolar el tramo lineal de la distribución de tensiones de Reynolds hasta el fondo, ecuación (2.53). Para evitar el efecto de la anisotropía de la turbulencia cerca de la superficie libre y el efecto del lecho el tramo, sólo se deben emplear los valores de distribución $-\rho\langle u'w' \rangle$ correspondientes a la región intermedia del flujo, $-0.2 - 0.7 z/H$ (Bigillon *et al.*, 2006).

En teoría, esta metodología no se puede aplicar en aquellos escenarios donde el flujo no sea 2D uniforme. Ya se han comentado los efectos sobre la estructura de la distribución de tensiones provocados por la existencia de corrientes secundarias (§2.4.2) o de flujos no uniformes (§2.4.3). No tener en cuenta estos fenómenos puede llevar a subestimar considerablemente la tensión sobre el fondo (Figura 2.34 ; Coleman *et al.*, 2007b).

Otro inconveniente de este método en flujos sobre lechos rugosos radica en la definición del plano hasta donde se deben extrapolar las tensiones de Reynolds. Pokrajac *et al.* (2006) analizan varias alternativas sobre como definir las tensiones en el plano $z = z_c$, en el plano $z = -d$ o en el plano $z = z_c$, considerando la última opción como la menos ambigua y simple.

Además, los resultados de los trabajos sobre la distribución de las tensiones doblemente promediadas señalan que en esta zona se produce el valor máximo de las tensiones de corte y de la intensidad de la perturbación espacial de la velocidad $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$, apoyando así las recomendaciones de Pokrajac *et al.* (2006), Manes *et al.*, (2007) y Aberle *et al.*, (2008), entre otros. Algunos autores también recomiendan emplear la suma de las distribuciones de tensiones de Reynolds e inducidas por forma para ampliar el rango donde los esfuerzos de corte son lineales (Aberle *et al.*, 2007).

En otros trabajos se emplea el plano definido como la posición media entre las crestas y los senos del lecho, que también es un parámetro geométrico independiente del tipo de flujo y de la distribución de velocidades (Pokrajac *et al.*, 2008; Mignot *et al.*, 2009).

Hay que señalar que como los resultados proporcionados por los métodos anteriores no suelen coincidir es habitual que la velocidad de fricción obtenida a partir del ajuste de la ley logarítmica se emplee para escalar las velocidades, y el valor de la velocidad de fricción calculada a partir de la extrapolación de las tensiones de Reynolds se emplee para adimensionalizar las tensiones, intensidades turbulentas y otros momentos de orden superior (Nezu y Rodi, 1986; Nezu y Nakagawa, 1993).

De hecho, es una práctica habitual encontrar en los trabajos tablas con los valores estimados de la velocidad de fricción con al menos, dos de los tres métodos mencionados anteriormente (ver entre otros Nezu y Rodi, 1986; López y García, 1999; Afzalimehr y Anctil, 2000; Wang *et al.*, 2001; Biron *et al.*, 2004; Tritico y Hotchkiss, 2005; Bigillon *et al.*, 2006; Pokrajac *et al.*, 2006; Balachandar y Bhuiyan, 2007; Manes *et al.*, 2007; Cameron *et al.*, 2008; Roussinova *et al.*, 2008). Por este motivo, a la hora de comparar los valores de las tensiones y velocidad de corte entre varios trabajos es fundamental indicar el método con el que éstos han sido obtenidos. Esta práctica no es tan habitual en la literatura.

Por último, también se pueden aplicar otros métodos menos como los siguientes:

- El método del “contorno característico”, que se basa en la estimación del espesor de desplazamiento y de momento, parámetros habituales en trabajos de flujos de aire, aplicado por Afzalimer y Ancil (2000) a flujo gradualmente acelerado sobre lecho de gravas (datos de Song, 1994).
- El ajuste de la ley de velocidades en la subcapa viscosa, $z^+ = u^+$, válido sólo para flujo sobre superficies lisas.
- El método espectral, que estima el valor de la velocidad de fricción a partir del ratio de disipación ε en la región inercial del dominio de la frecuencia:

$$u_* = (\varepsilon \kappa z)^{1/3} \quad (2.97)$$

La disipación se estima a partir del mejor ajuste del espectro 1D a una expresión de la forma (López y García, 1999):

$$E_{11}(k) = \alpha \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (2.98)$$

donde k es el número de onda, E_{11} es la función de densidad espectral en el subrango inercial y α la constante de Kolgomorov que vale aproximadamente 0.55 en la región externa y 0.51 en la interna de flujos en lámina libre.

- El método de López y García (1999), basado en la relación universal obtenida por estos autores para el flujo vertical de energía cinética turbulenta para la región intermedia del flujo en canales abiertos lisos o rugosos:

$$\frac{1}{2} \overline{k_E^2 w'} / u_*^3 = A^+ \approx 0.30 \quad (2.99)$$

En la ecuación anterior $k_E^2 = u'^2 + v'^2 + w'^2$. Esta aproximación cuenta con la ventaja de que el método no es sensible a problemas de alineación de los equipos de medida (p.ej. ADVs) porque el valor de la energía cinética turbulenta se mantiene constante⁴¹ y los errores asociados a una mala alineación de la componente vertical de la velocidad suelen ser inferiores a los de las componentes horizontales (López y García, 1999). El principal inconveniente de este procedimiento está en determinación del momento de tercer orden $\overline{k_E^2 w'}$. Al elevar el orden del estadístico, se requieren más muestras para que su incertidumbre sea comparable a la de otros momentos de menor orden, como las tensiones de Reynolds o las velocidades medias

Por último, se pueden citar los métodos de estimación de las tensiones de corte sobre el lecho a partir de la energía cinética turbulenta, o de su componente vertical con expresiones de la forma:

$$\tau_0 = cte_1 (u'^2 + v'^2 + w'^2) \approx cte_2 w'^2 \quad (2.100)$$

⁴¹ Recordemos que la energía cinética turbulenta vale la mitad de la traza del tensor de tensiones (ecuación (2.12)). Por definición, la traza de un tensor es un invariante ante giros y rotaciones del sistema de coordenadas.

El origen de este último método se encuentra en estudios oceanográficos. Los valores de las constantes así como una revisión de la aplicabilidad de los mismos a flujos en canales abiertos lisos y rugosos se encuentra en Biron *et al.* (2004).

2.5. DESCRIPCIÓN DE LA TURBULENCIA

2.5.1. Introducción. Descripción estadística de la turbulencia.

La mayoría de los flujos con los que nos encontramos en cualquier parte son flujos turbulentos. Existen numerosos ejemplos como las corrientes de aire que pasan a través de coches, aviones o edificios, aunque también lo son las estelas y los vórtices que se forman cuando se produce la separación del flujo detrás de estos objetos. Otros flujos como los generados en la combustión interna de un motor o en una turbina de gas también son altamente turbulentos. Incluso trabajos recientes han demostrado que los patrones de luminancia de algunos cuadros impresionistas de van Gogh (Figura 2.37) siguen la estructura matemática de los flujos turbulentos desarrollado por Kolgomorov (Aragón *et al.*, 2008).

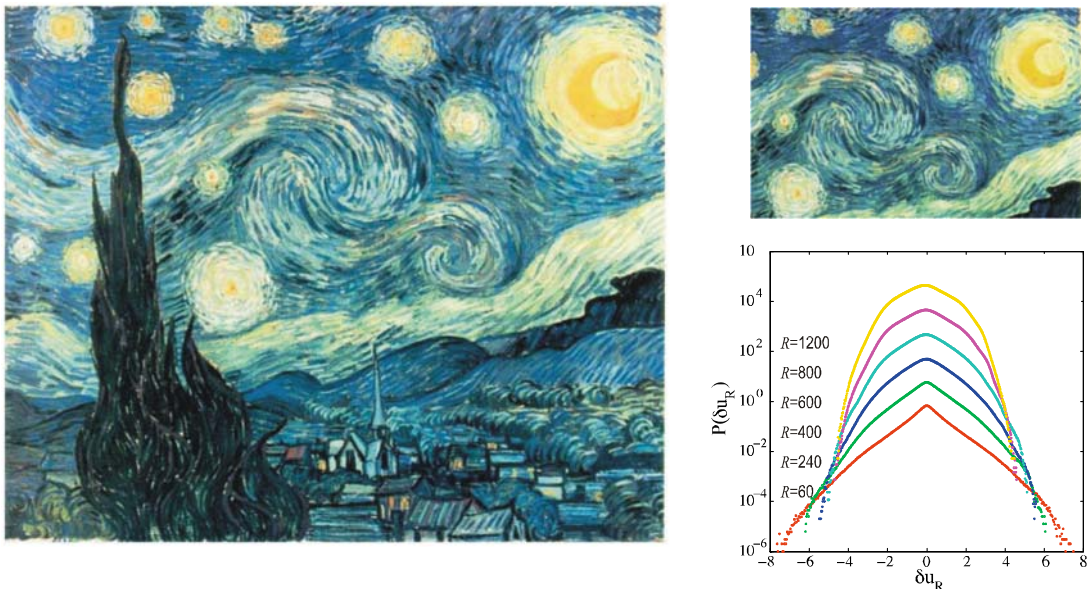


Figura 2.37. La función de distribución de probabilidad de la fluctuación de la luminancia en puntos separados una distancia de R pixels de cuadros como “Una noche estrellada” sigue el patrón de la función de distribución de probabilidad de la diferencia fluctuaciones de velocidad separadas una distancia δ_{uR} (ver detalles en Aragón *et al.*, 2008).

Del mismo modo, cuando miramos hacia la ingeniería hidráulica, también vemos flujos turbulentos. Así, la circulación de agua por una red de distribución o por una red de saneamiento se caracteriza por ser turbulenta. En ingeniería fluvial tenemos flujos turbulentos, y fenómenos de formación de estelas tras los obstáculos que se encuentra el agua (un tronco, una pila de puente) o de formación de capas de mezcla (mixing layers) en la confluencia o en la separación de dos brazos de un río. Los flujos estratificados de intercambio que se producen cuando dos cuerpos de diferente densidad se unen a través de un estrecho, como el que se produce en la confluencia del Mediterráneo y el Atlántico en Gibraltar, son también flujos

turbulentos. También lo son los chorros (*jets*) que favorecen la mezcla del agua residual tratada por una depuradora o de la salmuera de rechazo de una planta desaladora, cuando ésta se inyecta en el mar.

Se podrían poner muchos más ejemplos, pero estos son suficientes para remarcar la importancia de los flujos turbulentos en ingeniería. Este es el motivo por el cual el conocimiento y comprensión, así como la capacidad de caracterizar experimental y numéricamente este tipo de flujos, es un tema de mayor importancia y de actualidad en la ingeniería actual.

La turbulencia es un fenómeno cotidiano, habitual, pero difícil de caracterizar y describir. Tanto es así que a día de hoy, y a pesar de los avances que se han producido desde la primera descripción de flujos turbulentos realizada cualitativamente por Leonardo da Vinci⁴², no existe una definición clara y consensuada sobre el concepto de turbulencia.

Sin embargo, sí se reconocen una serie de propiedades comunes a la gran variedad de flujos turbulentos (Tennekes y Lumley, 1972; García, 1996; Nikora, 2008a):

- *Irregularidad.* Los flujos turbulentos son irregulares, desorganizado y caóticos, parece que siguen un comportamiento aleatorio. La aleatoriedad no significa que las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos, las ecuaciones de N-S, sean estocásticas. De hecho, se han obtenido de un análisis determinista.
- *No repetitibilidad.* Dos escenarios de movimiento de fluido no pueden reproducirse de un modo idéntico. Las características del flujo (p.ej. velocidades instantáneas) son muy sensibles a pequeños cambios en las condiciones de contorno (p.ej. distribución, separación, altura de las rugosidades del lecho) y de las condiciones iniciales (p.ej. nivel de agua). Esta alta sensibilidad y comportamiento caótico está relacionada con la alta no-linealidad que presentan las ecuaciones de N-S. Esta no linealidad es la que provoca que los flujos turbulentos parezcan aleatorios⁴³.
- *Gran rango de escalas de longitudes y tiempos* (y por tanto, velocidades). El flujo turbulento está constituido por un gran espectro de escalas que abarcan desde los remolinos de escalas del calado del flujo, hasta las escalas más pequeñas donde la energía es disipada por los esfuerzos tangenciales viscosos en energía térmica.
- *Continuidad.* Incluso las escalas más pequeñas son varios órdenes de magnitud superiores a las escalas que caracterizan el movimiento molecular, por lo que el fluido se tratará como un medio continuo.
- *Gran capacidad de difusión y disipación.* La difusión (mezcla) turbulenta está mucho más desarrollada que la que difusión molecular (p.ej. la caracterizada por la ley de Fick). La turbulencia es siempre disipativa, existe una transferencia de energía cinética desde las mayores escalas del flujo hacia las más pequeñas a expensas de incrementar la energía interna. Este el proceso de transferencia de energía en cascada, que se explicará con mayor detalle en el apartado siguiente.

⁴² Una descripción de la evolución y estado del estudio de la turbulencia en canales abiertos desde sus orígenes hasta los años 90 se recoge en el Cap. 1 de Nezu y Nakagawa (1993).

⁴³ De hecho, incluso las ecuaciones no-lineales más sencillas pueden tener soluciones que parecen aleatorias. Se puede ver por ejemplo el comportamiento de las ecuaciones de Lorenz en el Capítulo. 3 de Pope (2002).

- *Grandes números de Reynolds.* Los flujos turbulentos se producen para valores elevados del número de Reynolds.
- *Los flujos turbulentos son flujos.* La turbulencia es una característica del flujo, no del fluido.
- *Tridimensionalidad.* Los flujos turbulentos son siempre tridimensionales y rotacionales. Sin embargo, cuando se trabaja con las ecuaciones promediadas en el tiempo, algunos se pueden tratar como flujos bidimensionales.
- *Intermitencia* (en el espacio y el tiempo). El teorema del límite central indica que la función de probabilidad de una variable continua que es suma de un gran número de variables independientes, es aproximadamente una distribución normal o *Gaussiana*.

La mayoría de los procesos naturales o tecnológicos siguen esta distribución, y en consecuencia, existe un gran desarrollo matemático de este tipo de distribuciones. Desafortunadamente, la turbulencia es una excepción: aunque los flujos turbulentos sean la suma de un gran número de procesos (que podrían ser los campos de velocidades asociados a las líneas de corriente), éstos no son independientes.

De hecho, son las pequeñas diferencias con las distribuciones normales las que proporcionan las propiedades más interesantes a los flujos turbulentos. Así, por ejemplo, los productos triples como $\overline{u^2 w}$, que en una distribución Gaussiana deberían ser nulos, están relacionados con la transferencia de energía turbulenta desde un punto a otro, o desde un remolino a otro (Bradshaw, 1971).

La mayoría de los estudios relacionados con la turbulencia requieren de aproximaciones estadísticas y deterministas, sencillamente porque el movimiento instantáneo de los fluidos es muy difícil de comprender. Estas visiones del proceso han dado lugar a dos grandes “escuelas” o aproximaciones para describir la turbulencia, ambas derivadas del estudio de las ecuaciones fundamentales del movimiento.

Las herramientas más difundidas para el estudio de la turbulencia son la de tipo estadístico. Existe un gran desarrollo matemático para caracterizar estadísticamente las velocidades instantáneas. La mayoría de estos conceptos parten de la descomposición de Reynolds, que supone que podemos descomponer la velocidad en una componente media y en una de fluctuación.

La irrupción del anemómetro del hilo caliente y el auge de la aeronáutica en la década de 1930 propició la aparición de la teoría de la turbulencia isotrópica. Esta teoría estadística de la turbulencia fue propuesta por Taylor (1935). Taylor consideró que la turbulencia, como otro proceso aleatorio, se podría representar con una serie de parámetros y funciones que se pueden clasificar en dos grupos Nikora (2008b):

- Estadísticos (bulk parameters). Estos estadísticos son los momentos de la distribución de velocidades en un punto: media, varianza, tensiones de Reynolds, kurtosis, coeficiente de asimetría, etc. Los principales estadísticos se recogen en la Tabla 2.3.
- Funciones de momento o momentos conjuntos. Estas funciones representan la distribución de probabilidad del vector velocidad en el espacio. Algunos ejemplos son las funciones de correlación, las funciones espectrales y las de estructura.

Tabla 2.3. Resumen de los principales estadísticos que representan la turbulencia.

Estadístico	Definición matemática
Velocidad media conjunta (<i>ensemble average</i>)	$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$
Intensidades turbulentas	$\sigma_i = (\overline{u_i'^2})^{0.5} = \sqrt{\text{var}(u_i')}$
Energía cinética turbulenta	$k_E = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$
Intensidades turbulentas relativas	$\sigma_u / \bar{u}, \sigma_v / \bar{v}, \sigma_w / \bar{w}, k^{0.5} / \bar{u}$ $\sigma_u / u_*, \sigma_v / u_*, \sigma_w / u_*, k^{0.5} / u_*$
Coefficiente de Asimetría	$S_{u_i} = \overline{u_i'^3} / \sigma_i^3$
Coefficiente de Kurtosis	$K_{u_i} = \overline{u_i'^4} / (\sigma_i^4 - 3)$
Tensiones de Reynolds	$-\overline{u_i' u_j'}$
Coefficiente de Correlación	$-\overline{u_i' u_j'} / \sigma_i \sigma_j$
Disipación de Energía	$\frac{\nu}{2} \sum_{i,j} (\partial u_i' / \partial x_j - \partial u_j' / \partial x_i)^2$

La teoría estadística de la turbulencia homogénea isotrópica se basa en asumir que las velocidades son representaciones de una variable aleatoria estacionaria y ergódica. Si la velocidad en un punto y una dirección es un proceso estocástico, éste se podrá representar por distintas realizaciones de la variable $u(t)$. Para este conjunto de realizaciones o funciones muestrales $u_i(t)$ se puede hacer una media de conjunto (*ensemble average*) que definirá el proceso aleatorio, Figura 2.38.

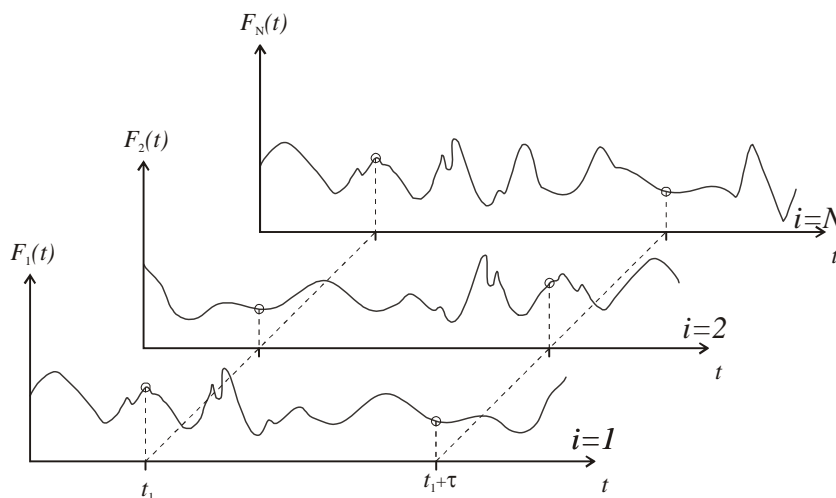


Figura 2.38. Definición y media de conjunto de un proceso aleatorio (Bendat y Piersol, 2000).

Entonces, para caracterizar el proceso (la velocidad instantánea en un punto determinado) para un tiempo t_1 , se pueden definir los momentos (p.ej. media, ec. (2.101)) o los momentos

conjuntos (la función de autocorrelación, ecuación (2.102)) a partir de la media de los momentos obtenidos para cada realización de la variable (Bendat y Piersol, 2000):

$$\mu_u(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u(t_1) \quad (2.101)$$

$$R_{uu}(t_1, t_1 + \tau) = R_u(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(t_1) \cdot u_i(t_1 + \tau) \quad (2.102)$$

Para el caso general, el proceso aleatorio será no estacionario si los momentos definidos en las ecuaciones (2.101) y (2.102) varían con el tiempo. Si por el contrario, todos los momentos de orden superior y los momentos conjuntos son invariantes en el tiempo, el proceso es estacionario.

Cuando el proceso es estacionario, se podrán representar los momentos a partir de la media temporal de una función muestral cualquiera. Considerando la función i -ésima, se tiene:

$$\mu_u(i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \quad (2.103)$$

$$R_{uu}(\tau, i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \int_0^T u(t)u(t + \tau) \quad (2.104)$$

Si el proceso es estacionario, y las funciones $\mu_u(i)$ y $R_{uu}(\tau, i)$ no varían cuando se calculan con otras funciones muestrales, se dice que el proceso es ergódico. Es decir, de las infinitas realizaciones (repeticiones) de la función muestral podremos emplear una para caracterizar el proceso aleatorio.

En flujos turbulentos se trabaja con velocidades tridimensionales que podemos caracterizar vectorialmente como $u(x, t)$. En este caso se habla de campos aleatorios y no de procesos aleatorios, pero los campos no son más que una extensión del concepto de proceso aleatorio a las tres dimensiones (Pope, 2000).

Al trabajar con campos aleatorios, se dice que éstos son homogéneos cuando sus estadísticos (los momentos) son invariantes en el espacio. La definición de turbulencia homogénea es menos restrictiva, ya que son los estadísticos de las fluctuaciones de la velocidad, y no las propias velocidades, los que deben ser invariantes en el espacio. Por último, un campo homogéneo es estadísticamente isotrópico si sus estadísticos son invariantes ante rotaciones y simetrías del sistema de coordenadas.

Todas estas propiedades simplifican notablemente el desarrollo matemático que subyace al análisis estadístico de los flujos turbulentos.

Otro aspecto que también se ha estudiado al analizar la turbulencia está relacionado con la determinación de las incertidumbres asociadas a los estimadores que se pueden obtener de una realización finita de muestras. Es decir, es importante cuantificar el error que cometemos al estimar un momento a partir de digamos 10, 100 o 1000 registros de velocidad instantánea.

Cuando se trabaja con registros de alta frecuencia⁴⁴, es fundamental realizar un análisis detallado de la señal para eliminar el ruido y así poder determinar con precisión los estadísticos

⁴⁴ En flujos de agua en lámina libre podemos hablar de frecuencias del orden de 25-50 Hz a 300 Hz

de orden superior. Los primeros trabajos en este campo se deben al análisis de los datos de anemómetros de hilo caliente instalados en los túneles de viento (ver p.ej. George *et al.*, 1978). La aplicación de instrumentos de medida “rápidos” comenzó a desarrollarse a partir de la década de los años 1980 con la irrupción en este área del anemómetro láser por efecto doppler (*LDA, Laser Doppler Anemometer*). Estos equipos pueden trabajar sin problemas en un rango de frecuencias del orden de 100 a 200 Hz y tras su aparición, se produjo un notable incremento de la calidad y cantidad de trabajos de turbulencia en flujos en lámina libre (ver Nezu y Nakagawa, 1993).

Uno de los inconvenientes de estos equipos es que su empleo no es demasiado intuitivo y se requiere cierto tiempo hasta poder obtener buenos registros. La popularización de otra tecnología de medida, la velocimetría doppler acústica, está asociada a este fenómeno. Los equipos ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) y ADVP (*Acoustic Doppler Velocity Profiler*) permiten determinar de un modo rápido y económico las tres componentes de la velocidad en un punto o una vertical respectivamente. Frente a los LDA, los ADVs son robustos y sencillos de usar, y aunque su frecuencia de adquisición es más baja (habitualmente 25 o 50 Hz), ésta es suficiente para resolver la mayoría de las escalas de los flujos en lámina libre habituales en ingeniería hidráulica.

Los trabajos de Benedict y Gould (1996) y Garcia *et al.*, (2006) son buenas referencias que versan sobre los aspectos más teóricos del análisis estadístico de los parámetros turbulentos de los campos de velocidades obtenidos con ADVs y ADVPs. Antes de realizar cualquier análisis es muy conveniente filtrar la señal con alguno de los métodos presentes en la literatura (ver p.ej. Nikora y Goring, 1998; García *et al.*, 2002; Goring y Nikora, 2002; Rusello *et al.*, 2002; Wahl, 2002; Cea *et al.*, 2007).

Todos estos desarrollos se escapan del ámbito de esta tesis doctoral ya que su importancia aumenta a medida que incrementamos el orden del momento estadístico a analizar. Como se ha comentado en el Capítulo 1, para determinar los campos de velocidades en el estudio de arrastre de berberechos se empleará el equipo PIV del CITEEC (Centro de Edificación en Edificación e Enxeñaría Civil) de la UDC.

En el momento de realizar los experimentos, la frecuencia de adquisición de este equipo era 3.33 Hz⁴⁵. Con esta resolución, no se pueden emplear todas las escalas temporales del flujo. Este ha sido un factor limitante que ha impedido el estudio de estadísticos tercer orden y superiores, así como el análisis de espectros y funciones de momento. Por este motivo, esta Tesis Doctoral se ha centrado en los momentos de primer y segundo orden (velocidades y términos del tensor de Reynolds).

Retomando el análisis de los flujos turbulentos, ya se ha señalado que la turbulencia no es un proceso gaussiano. Esto se debe a que las componentes de la turbulencia no son independientes, es decir, están correlacionadas unas con otras tanto en el tiempo como en el espacio. Los estadísticos empleados para caracterizar la turbulencia, ya sean intensidades o los momentos de mayor orden, así como el espectro y otras funciones de momento, están basadas en realizar promedios de larga duración, con un gran número de muestras.

Sin embargo, el análisis de los parámetros surgidos de promediados de larga duración no sirve para analizar el comportamiento de un remolino o un vórtice. Nezu y Nakagawa (1993)

⁴⁵ En la actualidad el equipo puede adquirir imágenes a 10 Hz, valor habitual en los últimos equipos PIV convencionales: ver más detalles en Capítulo 3.

describen un vórtice cómo una parcela espacial de la turbulencia, bien correlacionada, y que tiene un ciclo de “vida”: nace de una inestabilidad que lo forma, se desarrolla, interacciona y por último desaparece.

En este marco de trabajo es donde se puede inscribir la teoría determinista de la turbulencia, que se centra en el análisis de las estructuras del flujo que se repiten cíclicamente. Estas estructuras se definen como regiones del espacio donde al menos una variable del flujo presenta una correlación o coherencia en un rango espacio-temporal mucho mayor que el definido por las menores escalas del flujo. Estos patrones se denominan estructuras coherentes (*coherent structures*) y fueron descubiertas a través de técnicas de visualización, ya que el análisis de los momentos promediados de larga duración no permite captar su existencia.

En la actualidad se comienza a considerar, y a comprobar, que las estructuras coherentes son las responsables de la producción y disipación de la energía turbulenta, por lo que su análisis y comprensión es de vital importancia para tener un buen conocimiento de la dinámica de un flujo turbulento.

Aunque el estudio de las mismas se escapa del ámbito de esta Tesis Doctoral, se ha considerado importante señalar algunas referencias que puedan servir para avanzar en esta línea de trabajo. Por ejemplo, en Nezu y Nakagawa (1993) se pueden encontrar en los últimos capítulos del texto una introducción, clasificación y explicación de los procesos que las desencadenan. Nezu (2005) da un resumen de las principales características e importancia en ríos y Adrian (2007) realiza una revisión reciente de las mismas. Las principales herramientas (medias condicionales, descomposición LES o POD, etc.) para el análisis de las estructuras coherentes a partir del análisis de campos de velocidades se pueden consultar p.ej en George (1988) y en Adrian *et al.* (2000)

Desde un punto de vista más aplicado, se pueden revisar el estado del conocimiento y los resultados de la tesis doctoral de M. Detert (2008), la de J. de Franca (2005) o la tesina de Ruijter (2004), disponibles electrónicamente a través de las bibliotecas de la Universidad de Karlsruhe, la Escuela Politécnica de Laussane y de T.U. Delft.

Para finalizar el estado del conocimiento se presentará a continuación el concepto de energía en cascada (§2.5.2) y la definición y distribución de la intensidad turbulenta para flujos en lámina libre (§2.5.3), haciendo especial énfasis en aquellos que son hidráulicamente rugosos y en la perspectiva del doble promediado.

Quedan fuera del ámbito de esta tesis otros aspectos del enfoque estadístico de la turbulencia como el desarrollo y análisis detallado del balance de energía turbulenta y el estudio de las funciones espectrales y de momento. Para profundizar en estos aspectos se puede recurrir p.ej. al segundo volumen de Monin y Yaglom (1975) o a Pope (cap. 6 y 7, 2000).

2.5.2. Energía en cascada

En flujos turbulentos existe una amplia escala de longitudes. Las escalas mayores están determinadas por el calado mientras que las menores lo están por la difusión molecular. Para determinar las menores escalas de movimiento hay que recurrir al balance de producción y disipación de energía cinética turbulenta.

Básicamente, la energía turbulenta es obtenida del flujo medio a través de la acción de los vórtices de mayor escala presentes en el flujo. Esta energía es eventualmente disipada, en

forma de calor, a través de la acción de la viscosidad. Sin embargo, como la disipación viscosa está asociada a procesos moleculares, ésta sólo puede ser efectiva en escalas de muy pequeña magnitud, es decir, a los vórtices de menor escala.

El proceso a través del cual la energía contenida en los grandes vórtices del flujo es transferida a los vórtices más pequeños se denomina mecanismo de energía en “cascada” propuesto inicialmente por Richardson (1922).

De acuerdo con este proceso, la energía turbulenta es transferida hacia las escalas más pequeñas a través de la generación de vórtices de tamaños progresivamente más pequeños, hasta que se alcanza una escala adecuada para que la disipación molecular sea efectiva. Es importante señalar que la tasa a la que viscosidad disipa la energía cinética turbulenta ε , no depende de la viscosidad sino de la tasa producción de energía desde el flujo.

La cuantificación de las escalas de movimiento más pequeñas se atribuye a Kolgomorov (1941). Kolgomorov indicó que en las escalas más pequeñas, para grandes números de Reynolds, la turbulencia es localmente isotrópica. El razonamiento de Kolgomorov señala que por el proceso de transferencia de energía en cascada y de reducción de escala de los remolinos, éstos van perdiendo su intermitencia, aleatoriedad y también la “información” del flujo medio del que provienen. En este sentido, se puede pensar que para las menores escalas, los estadísticos que las definen serán universales.

En la primera hipótesis de similaridad de Kolgomorov se señala esto mismo, que los estadísticos para una escala lo suficientemente pequeña tienen una forma universal. Además, esta forma está determinada por la viscosidad cinemática (responsable de la disipación molecular de la energía) y por la tasa de disipación de energía cinética turbulenta ε .

El rango de escalas características de longitudes donde se cumple la primera hipótesis de Kolgomorov se denomina rango de equilibrio universal o rango de quasi-equilibrio. Para esta región, las escalas que caracterizan a los remolinos son más pequeñas que las que caracterizan al flujo ($L, U, L/U$), por lo que éstos son capaces de ir modificando su tamaño y así mantener un equilibrio con la tasa de transferencia de energía D_{Tv} ⁴⁶ impuesta por los remolinos de mayor tamaño.

Las escalas características que definen el rango de equilibrio universal son las escalas más pequeñas del movimiento, denominadas microescalas de Kolgomorov:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{microescala de longitudes :} & \eta \equiv (\nu / \varepsilon)^{1/4} \\ \text{microescala de velocidades :} & v_\eta \equiv (\nu \varepsilon)^{1/4} \\ \text{microescala de tiempo :} & \tau_\eta \equiv (\nu / \varepsilon)^{1/2} \end{array} \right\} \quad (2.105)$$

Los ratios entre las escalas más pequeñas y más grandes se pueden determinar de un modo directo si se asume que $\varepsilon \sim U^3/H$ (Pope, 2000):

⁴⁶ Este es el término de difusión o transporte de energía cinética turbulenta, formado en general por un término de difusividad viscosa, un término de transporte turbulento y otro término de presión. En este texto no se analizará la influencia de cada componente y por este motivo se han agrupado en un único parámetro. Un análisis del balance de la energía cinética turbulenta para flujos 2D se puede consultar en la pág. 18 de Nezu y Nakagawa (1993).

$$\eta / L \sim Re^{-3/4} \tag{2.106}$$

$$v_\eta / U \sim Re^{-1/4} \tag{2.107}$$

La relación η / L decrece a medida que el flujo es más turbulento ($Re \gg$) por lo que es razonable pensar que existe un rango de escalas dentro del rango de equilibrio universal, determinado por $L \gg r \gg \eta$, donde los efectos viscosos sobre la dinámica de los remolinos sea despreciable. En este rango de escalas, los estadísticos del flujo son universales y sólo dependen de la tasa de producción, que es lo que señala la segunda hipótesis de similaridad de Kolgomorov.

Una consecuencia de esta segunda hipótesis es que la región de equilibrio universal queda dividida en dos rangos, el inercial, donde los efectos viscosos son despreciables, y el rango de disipación, donde las escalas características son del orden de las microescalas de Kolgomorov.

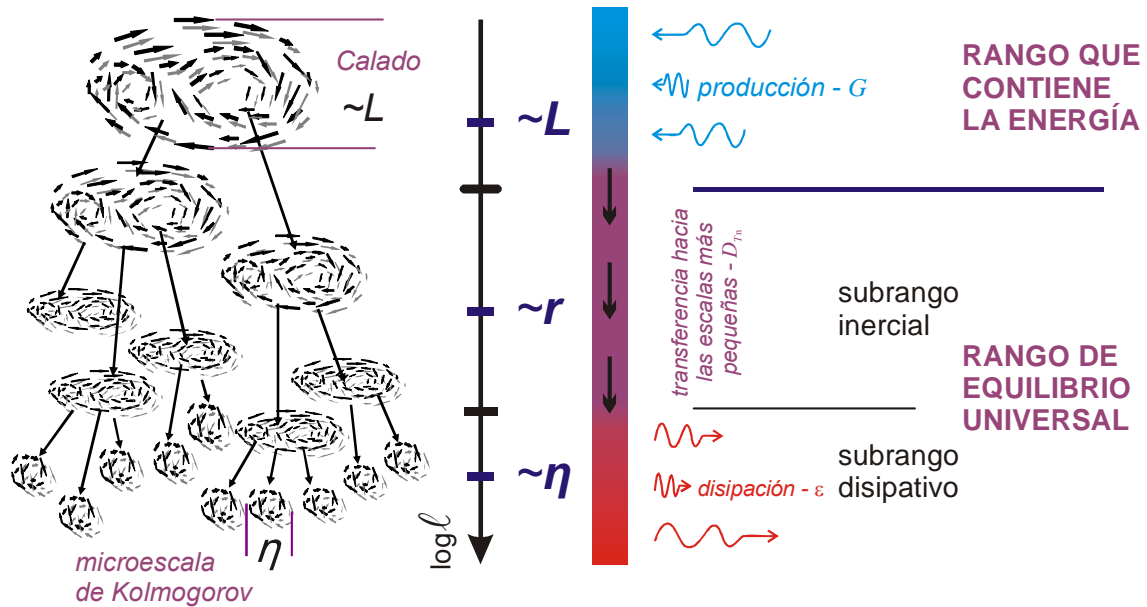


Figura 2.39. Diagrama de funcionamiento del mecanismo de energía en cascada (adaptado de Pope, 2000 y Nikora, 2008b).

En la Figura 2.39 se presenta un esquema con el funcionamiento del mecanismo de energía en cascada. La generación de energía turbulenta es realizada a expensas de la energía del flujo medio. En flujos 2D uniformes, el ratio de producción o generación es $G = -\overline{u'w'} \cdot \partial \langle \overline{u} \rangle / \partial z$. Representando la disipación como ε y D_{Tv} como la transferencia turbulenta y viscosa de la energía turbulenta, el balance de energía cinética turbulenta queda:

$$G = \varepsilon + D_{Tv} \tag{2.108}$$

El concepto de energía en cascada se puede representar a través de espectros de energía. Según Kolgomorov, el espectro de energía de la velocidad, p.ej. en la dirección de la corriente $S_{uu}(k)$, está formado por tres rangos: (1) el de producción, (2) el subrango inercial, donde el espectro sigue la conocida ley potencial “-5/3” y (3) el subrango viscoso o de disipativo. Las variables involucradas en la representación espectral son la velocidad espectral S_{uu} , que tiene

unidades de frecuencia, y el número de onda k , que es inversamente proporcional a la escala de longitudes del flujo $k=2\pi/L$.

Tcheng (1953) completó el modelo de Kolgomorov, realizando una división en el subrango inercial en dos zonas donde la velocidad espectral es proporcional a $\sim k^{-1}$ y $\sim k^{-5/3}$. Nikora (1999), justifica que en la región donde se aplica la ley “-1” existe una fuerte interacción entre el flujo medido y la fluctuación de la velocidad, mientras que en la zona de aplicación de la ley “-5/3” esta interacción es muy débil.

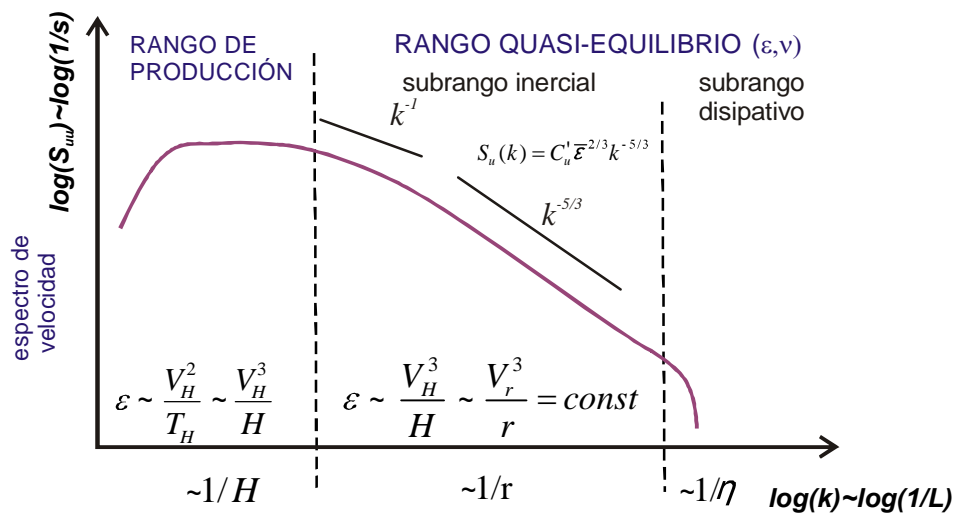


Figura 2.40. Auto-espectro de velocidad $S_{uu}(k)$ en coordenadas doblemente logarítmicas.

En la Figura 2.40 se representa un esquema con el espectro de velocidad y sus rangos. La ley potencial “-5/3” que describen el espectro en el rango inercial fue propuesta por Kolgomorov en 1941 a partir del análisis de las funciones de estructura de segundo orden, que representan la autocovarianza de la fluctuación de velocidad entre dos puntos.

$$S_{uu}(k) = C \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (2.109)$$

Esta expresión también se puede obtener a través de un análisis dimensional del espectro de velocidades (ver cap. 6.5 en Pope, 2000), que para la región inercial sólo depende de la disipación y de la escala del movimiento. C es una constante universal que vale ~ 0.5 .

Para la obtención del espectro de la velocidad se pueden aplicar modelos más prácticos que el propuesto por Kolgomorov, cómo el recogido en Nikora (1999). Dos aplicaciones a flujos sobre gravas se pueden consultar en Nikora y Goring (2000) y en Nikora (2005). Los aspectos sobre el tratamiento y filtrado de las señales de velocidad para obtener una buena representación espectral de las velocidades se puede consultar en George (1978).

2.5.3. Intensidad turbulenta

Una de las características básicas de la turbulencia son sus intensidades. Por definición, la varianza de una componente de la velocidad, p.ej. la correspondiente a la dirección de la corriente, está relacionada con su espectro de densidad a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma_u^2 \equiv \int_0^\infty S_{uu} dk \quad (2.110)$$

Donde $S_{uu}(f)$ es el espectro de potencia que es una función que describe la distribución de la densidad de la amplitud de las fluctuaciones al cuadrado en función de la frecuencia o del número de onda $k=2\pi/L$:

$$S_{uu}(f) = \frac{1}{T} \left| \int_0^T u'(t) e^{-i2\pi f t} dt \right|^2 \quad (2.111)$$

Aunque las relaciones anteriores son muy útiles cuando se realizan análisis espectrales de las velocidades, la intensidad turbulenta se suele expresar como la raíz del momento de segundo orden de las velocidades, o desviación típica. De este modo, para la velocidad en la dirección de la corriente:

$$\sigma_u \equiv \sqrt{\sigma^2(u)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2} \quad (2.112)$$

donde N es el número registros temporales que se dispone

En flujo en canales abiertos, y para el rango intermedio del flujo ($0.15 \leq z/H \leq 0.6$), se han propuesto una serie de ecuaciones universales para describir la variación de las intensidades turbulentas adimensionalizadas con la velocidad de fricción. Las ecuaciones más conocidas son las propuestas por Nezu y Nakagawa (1993), y se basan en aprovechar la característica de la región intermedia en la que la producción de turbulencia es aproximadamente igual a la tasa de disipación $G \simeq \varepsilon$. Para esta situación de equilibrio, y aplicando el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ al balance de energía turbulenta en 2D, se puede llegar a:

$$\frac{\sigma_{u_i}}{u_*} = D_i \exp\left(-C_i \frac{z}{H}\right) \quad (2.113)$$

donde C_i y D_i son constantes empíricas para las tres componentes de la velocidad, $u_i=[u,v,w]$. Nezu y Rodi (1986) sugirieron los siguientes valores para un canal hidráulicamente liso y flujo 2D uniforme (nótese que en el experimento de estos autores no se determinó la velocidad en la dirección de la profundidad del flujo y):

$$\left. \begin{aligned} D_i &= [2.26, -, 1.23] \\ C_i &= [0.88, -, 0.67] \end{aligned} \right\} \quad (2.114)$$

Nezu y Nakagawa (1993) recomiendan emplear unos valores ligeramente diferentes, también para canales lisos:

$$\left. \begin{aligned} D_i &= [2.3, 1.63, 1.27] \\ C_i &= C = 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.115)$$

En cualquier caso, se tiene que las fluctuaciones en la dirección de la corriente son superiores a las de las otras componentes de la velocidad. Además, también se tiene que las fluctuaciones en la dirección vertical son ligeramente inferiores a las de la dirección de la profundidad del flujo.

Para flujos hidráulicamente rugosos, los valores de los coeficientes de la ecuación (2.113) han sido revisados por varios autores como Cardoso *et al.*, (1981) o Kironoto y Graf (1994). Los coeficientes propuestos por estos autores revelan un descenso en la intensidad turbulenta

debido a la presencia de la rugosidad del lecho. Así, Kironoto y Graf (1994) proponen las siguientes relaciones:

$$\left. \begin{aligned} D_i &= [2.04, -, 1.14] \\ C_i &= [0.94, -, 0.76] \end{aligned} \right\} \quad (2.116)$$

Song (1994) comparó sus datos obtenidos para régimen uniforme 2D en lecho rugoso con las distribuciones propuestas por Nezu y Nakagawa (1993) y con las Kironoto y Graf (1994). La distribución de intensidades σ_{u_i} se ajustaba razonablemente bien con la relación de Kironot y Graf, pero se situaba por debajo de las relación propuesta por Nezu y Nakagawa. En cuanto a la variación de la intensidad turbulenta en la dirección z , los registros experimentales tienen una forma convexa, incrementado desde la superficie hasta una cota $z/H \sim 0.2-0.3$. A partir de este máximo, sus valores decrecen hasta alcanzar el lecho.

Este comportamiento es ligeramente diferente al que reproduce la ecuación (2.113), que tiene una forma ligeramente cóncava. Song (1994) atribuye el diferente comportamiento de la intensidad turbulenta al siguiente proceso físico: los remolinos generados por la rugosidad del lecho no pueden desarrollarse en la dirección vertical cerca del mismo por el efecto de contorno establecido por el propio lecho. A medida que los vórtices ascienden, este efecto desaparece y los remolinos se pueden hacer más grandes y fuertes. A cierta altura, el tamaño de los remolinos alcanza su valor máximo y a partir de ésta, comienzan a deshacerse por un proceso de transformación en cascada, hasta que se alcanza la superficie, donde el tamaño e intensidad de los mismos es mínima.

Otra expresión para calcular el perfil de intensidades turbulentas fue desarrollada por López y García (1999). Estos autores presentaron una relación universal para el flujo vertical de energía cinética turbulenta para la región intermedia del flujo en canales abiertos lisos o rugosos, ecuación (2.99). Asumiendo un modelo de gradiente para el flujo de energía cinética turbulenta se puede llegar a la siguiente expresión para las intensidades turbulentas:

$$\left(\frac{\sigma_{u_i}}{u_*} \right)^2 = C_i \frac{A^+}{\kappa} \ln \left(\frac{B^+ z / H}{1 - z / H} \right) \quad (2.117)$$

donde $B^+ \approx 0.12$ y $A^+ \approx$ es ≈ 0.27 y ≈ 0.33 para fondo liso y rugoso respectivamente, aunque se puede usar un valor universal ≈ 0.30 para ambos tipos de flujo. El rango de validez de esta expresión está ente $0.15 \leq z/H \leq 0.7$ y los valores del coeficiente C_i a adoptar para las distintas intensidades es:

$$C_i = [1.10, 0.56, 0.34] \quad (2.118)$$

En la Figura 2.41 se presenta una comparación de las distintas expresiones teóricas empleadas para describir los perfiles de intensidades turbulentas u y w , junto con la tendencia que reflejan los datos experimentales de la literatura.

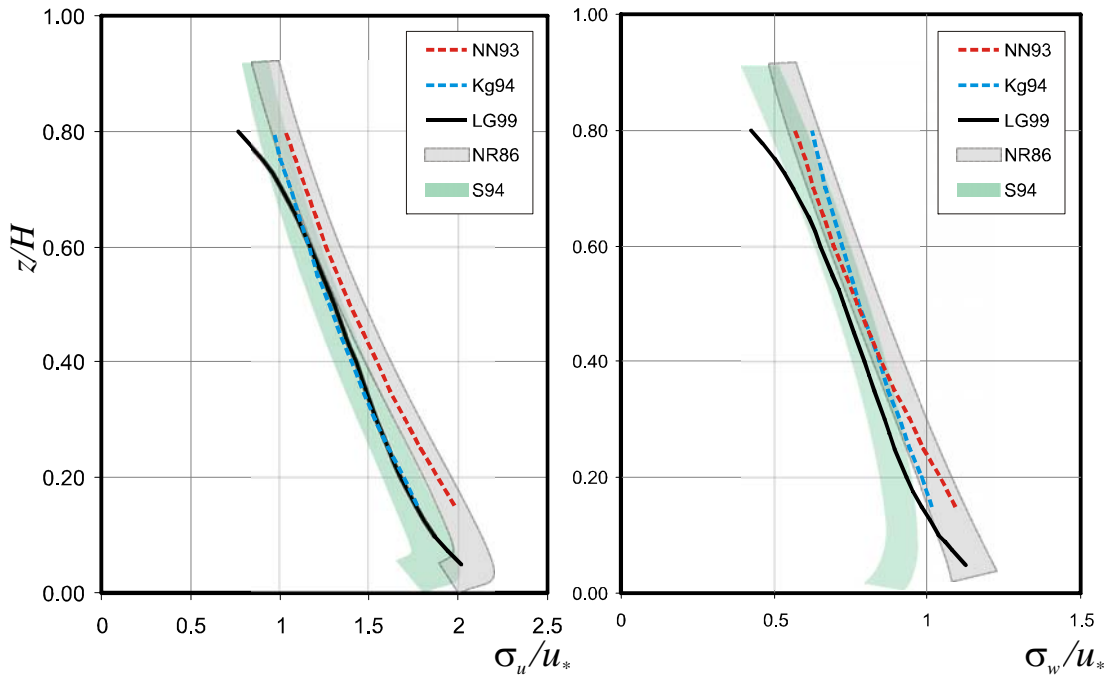


Figura 2.41. Distribución teórica de las intensidades turbulentas en flujo 2D uniforme según las expresiones de Nezu y Nakagawa (1993), Kironoto y Graf (1994) y López y García (1999). Se han representado también las tendencias de los datos experimentales recogidos en Nezu y Rodi (1986) para lecho liso y de Song (1994) para lecho rugoso.

En el caso de que existan corrientes secundarias, p.ej. flujo 3D en canal recto o flujo no uniforme, algunos autores proponen emplear otra escala adimensional de longitudes para poder aplicar las ecuaciones anteriores. Así, Song (1994), Carollo *et al.* (2005) y Detert (2008) sugieren emplear la relación z/δ_h en vez de z/H , para flujos rugosos no uniformes. Recordemos que δ_h es el calado al que se produce la velocidad máxima debido al efecto del descenso de velocidad. Roussinova *et al.* (2008) sugieren emplear el calado δ' a partir del cuál la relación entre σ_u^2 y la velocidad máxima al cuadrado es constante $u^2(\delta')/U_{\max}^2 \approx 0.001 \sim cte$.

Sin embargo, aunque se emplee una escalada de longitudes diferente del calado, la estructura de la turbulencia, y de las intensidades turbulentas, no se consigue representar exactamente con las ecuaciones anteriores. Así, en flujo no uniforme acelerado, las intensidades turbulentas adimensionales σ_u/u_* son menores que para flujo uniforme, con un valor máximo cerca del lecho. A medida que se incrementa el calado su valor decrece hasta δ_h . Cuanto mayor es la no uniformidad del flujo, mayor es la diferencia con el valor calculado para régimen uniforme.

Cuando el flujo es decelerado, el valor de la intensidad turbulenta decrece con el calado hasta alcanzar la lámina de agua. Si se compara con el régimen uniforme, se tienen valores mayores de intensidad turbulenta adimensional, Figura 2.42. La intensidad turbulenta σ_w/u_* se comporta de un modo similar al de la intensidad turbulenta σ_u/u_* . Cuando el lecho es rugoso, cerca del mismo se reproduce el efecto de borde descrito para las intensidades turbulentas en flujo 2D uniforme.

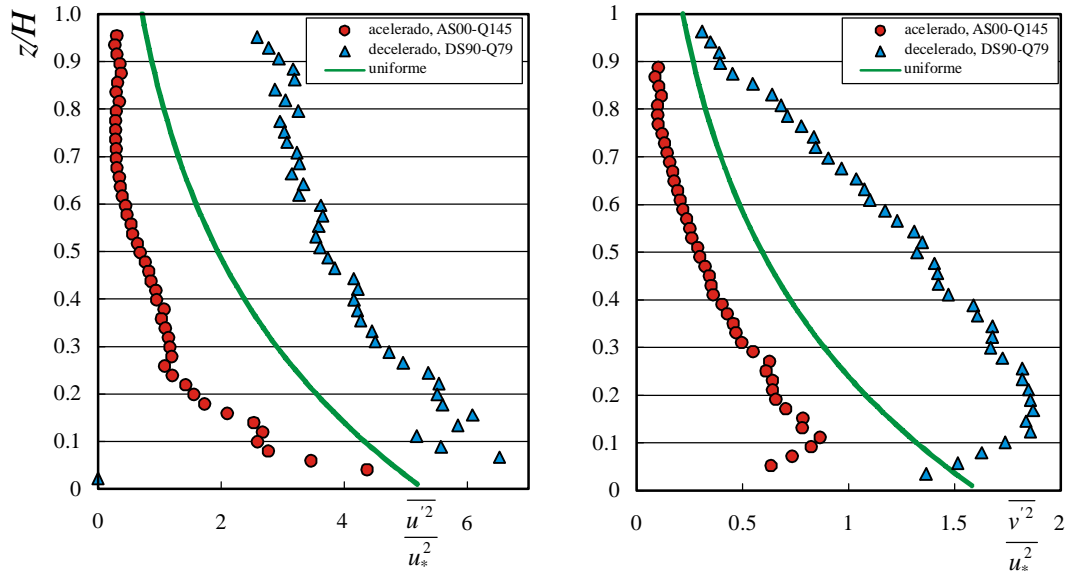


Figura 2.42. Distribución típica de las intensidades turbulentas adimensionales para flujos acelerados, uniformes y decelerados (adaptado de Yang y Chow, 2008; datos de Song, 1994). La nomenclatura empleada está recogida en los experimentos de Song (1994): AS y DS hace referencia a ensayo de flujo acelerado y decelerado respectivamente, y Q señala el valor del caudal de ensayo.

Algunos autores han propuesto revisiones de los parámetros de ajuste de la ecuación universal exponencial (2.113) para flujos no uniformes 2D. Kironoto y Graf (1995) y Song Chiew (2001) desarrollaron una fórmula polinómica para definir el valor de D_i en función del gradiente longitudinal de presiones adimensional β , ecuación (2.73). Las fórmulas propuestas por Song y Chiew son las siguientes:

$$\left. \begin{aligned} C_u &= 0.6(0.1\beta^2 + \beta) + 3 \\ C_w &= 0.3(0.1\beta^2 + \beta) + 1.5 \end{aligned} \right\} \quad (2.119)$$

Yang y Chow (2005) analizaron la influencia de las velocidades verticales en la distribución de tensiones e intensidades turbulentas. Como ya se ha comentado en el apartado 2.4.3, cuando las velocidades verticales son ascendentes (p.ej. flujos decelerados), éstas promueven la generación de turbulencia y la aparición de un perfil de tensiones de Reynolds y de intensidades turbulentas convexo. Cuando las velocidades son descendentes, se reduce la turbulencia y los perfiles son más cóncavos. En este trabajo también se puede encontrar una ecuación para describir las intensidades turbulentas en función de la relación entre las tensiones de Reynolds en flujo 2D uniforme y flujo acelerado o decelerado (no presentada aquí).

Dado que las expresiones para flujo no uniforme o, en general, flujos con corrientes secundarias, no funcionan demasiado bien, en la literatura se pueden encontrar propuestas de otros autores. Por ejemplo, para flujo rugoso con baja sumergencia, se puede recurrir a las distribuciones de Carollo *et al.* (2005), válidas para las regiones interna y externa del flujo.

En la literatura también se pueden encontrar expresiones para describir las intensidades turbulentas en la región interna del flujo para canales lisos (Nezu y Rodi, 1986; Nezu y Nakagawa, 1993) o la expresión de Carollo *et al.* (2005), para canales rugosos. Para lechos

porosos existen pocos trabajos, debido a la dificultad de realizar las medidas experimentales o de modelizar el mismo numéricamente. Una revisión de los principales trabajos se puede encontrar en Detert (2008).

Por último hay que señalar que tal y cómo sucedía con el análisis de los perfiles de velocidad y de tensiones de Reynolds, no se ha encontrado ningún trabajo que analice o describa sistemáticamente las leyes de variación de las intensidades turbulentas para flujo 3D uniforme y no uniforme, en canales rectos estrechos, lejos de la zona central del mismo.

2.6. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Aberle, J., Koll, K. y Dittrich, A. (2007). *Analysis of form induced stresses over rough gravel-bed armour layers*. IAHR Congress 2007, Venice.
- Aberle, J., Koll, K. y Dittrich, A. (2008). "Form induced stresses over rough gravel-beds." *Acta Geophysica* 56(3): 584-600.
- Adrian, R.J., Christensen, K.T. y Liu, Z.C. (2000). "Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields." *Experiments in Fluids* 29(3): 275-290.
- Adrian, R.J. (2007). "Hairpin vortex organization in wall turbulence." *Physics of Fluids* 19(4): 16.
- Afzalimehr, H. y Ancil, F. (2000). "Accelerating shear velocity in gravel-bed channels." *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* 45(1): 113-124.
- Aragón, J.L., Naumis, G.G., Bai, M., Torres, M. y Maini, P.K. (2008). "Turbulent Luminance in Impassioned van Gogh Paintings." *Journal of Mathematics Imaging Visualization* 30: 275-283.
- Balachandar, R. y Bhuiyan, F. (2007). "Higher-Order Moments of Velocity Fluctuations in an Open-Channel Flow with Large Bottom Roughness." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(1): 1-77.
- Bayazit, M. (1976). "Free surface flow in a channel of large relative roughness." *Journal of Hydraulic Research* 14(2): 115-126.
- Bendat, J.S. y Piersol, A.G. (2000). *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*. 3rd Ed. New York, Wiley & Sons. 594 págs.
- Benedict, L.H. y Gould, R.D. (1996). "Towards better uncertainty estimates for turbulence statistics." *Experiments in Fluids* 22(2): 129-136.
- Bigillon, F., Niño, Y. y García, M.H. (2006). "Measurements of turbulence characteristics in an open-channel flow over transitionally rough-bed using particle image velocimetry." *Experiments in Fluids* 41: 857-867.
- Biron, P.M., Lane, S.N., Roy, A.G., Bradbrook, K.F. y Richards, K.S. (1998). "Sensitivity of bed shear stress estimated from vertical velocity profiles: the problem of sampling resolution." *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 133-139.
- Biron, P.M., Robson, C., Lapointe, M.F. y Gaskin, S.J. (2004). "Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields." *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 1403-1415.
- Bradshaw, P. (1971). *An Introduction to Turbulence and its Measurement*. Oxford, Pergamon Press. 218 págs.
- Bradshaw, P. (1987). "Turbulent Secondary Flows." *Annual Review of Fluid Mechanics* 19: 53-74.
- Breugem, W.P. (2004). *The influence of wall permeability on laminar turbulent flows. Theory and simulations*, TU, Delf. PhD Dissertation: 186 págs.
- Cameron, S.M., Nikora, V. y Coleman, S. (2008). "Double-averaged velocity and stress distributions for hydraulically-smooth and transitionally-rough turbulent-flows." *Acta Geophysica* 56(3): 642-653.
- Cardoso, A.H., Gust, G. y Graf, W.H. (1989). "Uniform flow in a smooth open channel." *Journal of Hydraulic Research* 27(5): 603-616.
- Cardoso, A.H., Gust, G. y Graf, W.H. (1991). "Steady gradually accelerating flow in a smooth open channel." *Journal of Hydraulic Research* 29(4): 525-543.

- Carollo, F.G., Ferro, V. y Termini, D. (2005). "Analyzing turbulence intensity in gravel bed channels." *Journal of Hydraulic Engineering* 131(12): 1050-1061.
- Cea, L. (2005). *An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: Numerical solver and experimental validation*. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. A Coruña, Universidade da Coruña. PhD Dissertation: 248 págs.
- Cea, L., Puertas, J. y Pena, L. (2007). "Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV." *Experiments in Fluids* 42: 333-348.
- Cebeci, T. (2004). *Analysis of Turbulent Flows*. 2nd ed. Oxford, Elsevier. 376 págs.
- Clauser, F.H. (1956). "The turbulent boundary layer." *Advances in Applied Mechanics* 4(1-51).
- Coceal, O., Thomas, T.G. y Belcher, S.E. (2008). "Spatially-averaged flow statistics within a canopy of large bluff bodies: Results from direct numerical simulations." *Acta Geophysica* 56(3): 862-875.
- Coleman, N.L. (1981). "Velocity profiles with suspended sediment." *Journal of Hydraulic Research* 19(3): 211-229.
- Coleman, S., Nikora, V., McLean, S., Clunie, R.M. y Melville, B.W. (2007a). "Subelement form-drag parametrization in rough-bed flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(2): 121-129.
- Coleman, S., Nikora, V., McLean, S. y Schlicke, E. (2007b). "Spatially averaged turbulent flow over square ribs." *Journal of Engineering Mechanics* 133(2): 194-204.
- Coleman, S., Nikora, V. y Schlicke, T. (2008). "Spatially-averaged oscillatory flow over a rough bed." *Acta Geophysica* 56(3): 698-733.
- Coles, D. (1956). "The law of the wake in turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics* 1: 191-226.
- Cooper, J.R. y Tait, S.J. (2008). "The spatial organisation of time-averaged streamwise velocity and its correlation with the surface topography of water-worked gravel beds." *Acta Geophysica* 56(3).
- Crespo, A.J.C. (2008). *Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics*. Grupo de Investigación de Física de la Atmósfera y del Océano. Vigo, University of Vigo. PhD Dissertation: 157 págs.
- Cheng, N.-S. y Chua, L.H.C. (2005). "Comparison of sidewall correction of bed shear stress in open-channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 131(7): 60-609.
- Dancey, C.L. y Diplas, P. (2008). "Statistical uncertainty and the estimation of log law parameters." *Journal of Hydraulic Engineering* 134(9): 1353-1356.
- Davison, L. (2003). *An introduction to turbulence modelling. Lecture notes on Introduction to turbulence modelling*. Chalmers University.
- de Lemos, M.J.S. (2008). "Analysis of turbulent flows in fixed and moving permeable media." *Acta Geophysica* 56(3): 562-583.
- Detert, M., Klar, M., Wenka, T. y Jirka, G.H. (2007). *Pressure- and Velocity-Measurements Above and Within a Porous Gravel Bed at the Threshold of Stability*. en *Gravel-bed rivers VI. From process Understanding to River Restoration*. H. Habersack, H. Piegay y M. Rinaldi. Amsterdam, Elsevier Science Publishing Company: 85-108 (23).
- Detert, M. (2008). *Hydrodynamic Processes at the water-sediment interface of streambeds*. *Civil Engineering, Geo- and Environmental Science*, University Fridericiana. PhD Dissertation: 139 págs.
- Dey, S. y Lambert, M.F. (2005). "Reynolds Stress and Bed Shear in Nonuniform Unsteady Open-Channel Flow." *Journal of Hydraulic Engineering* 131(7): 610-614.
- Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K. y Sellin, R.H.J. (2000). "Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 126(9): 653-669.
- Fenton, J.D. (2005). *On the energy and momentum principles in hydraulics*. XXXI IAHR Congress. Seoul: 625-636 págs.
- Finnigan, J.J. (2000). "Turbulence in plant canopies." *Annual Review of Fluid Mechanics* 32: 519-571.
- Finnigan, J.J. y Shaw, R.H. (2008). "Double-averaging methodology and its application to turbulent flow in and above vegetation canopies." *Acta Geophysica* 56(3): 534-561.

- Franca, M. (2005). *A field study of turbulent flows in shallow gravel-bed rivers. Laboratory of Hydraulic Constructions*. Laussane, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. PhD Dissertation: 282 págs.
- García, C.M., Jackson, P.R. y García, M.H. (2006). "Confidence intervals in the determination of turbulence parameters." *Experiments in Fluids* 40(4): 514-522.
- García, C.M., Cantero, M.I., Niño, Y. y García, M.H. (2002). *Acoustic Doppler Velocimeters (ADV) Performance curves (APCs) sampling the flow turbulence*. Critical transitions in water and environmental resources management.
- García, M.H. (1996). *Hidrodinámica ambiental*. Sata Fe, Argentina, Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del litoral. 195 págs.
- García, M.H. (2008). *Sediment Transport and Morphodynamics*. en *Sedimentation Engineering: Theories, Measurements, Modeling and Practice: Processes, Management, Modeling and Practice*. ASCE Manual and Reports on Eng. Practice 110. M. H. García, American Society of Civil Engineers - ASCE. Reston, Virginia: 1150.
- George, W.K., Beuther, P.D. y Lumley, J.L. (1978). *Processing of Random Signals. Dynamic Flow Conference*. Marseille (France): 757-800 págs.
- George, W.K. (1988). *Insight into the dynamics of coherent structures from a proper orthogonal decomposition*. First World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics., Dubrovnik, Yugoslavia, Elsevier.
- George, W.K. (2007). "Is there a universal log law for turbulent wall-bounded flows?" *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365(1852): 789-806.
- Giménez-Curto, L.A. y Corniero-Lera, M.A. (1996). "Oscillating turbulent flow over very rough surfaces." *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 101(C9): 745-758.
- Giménez-Curto, L.A. y Corniero-Lera, M.A. (2003). "Highest natural bed forms." *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 108(2): 28-1.
- Goring, D.G. y Nikora, V.I. (2002). "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data." *Journal of Hydraulic Engineering* 128(1): 117-126.
- Hoover, T.M. y Ackerman, J.D. (2004). "Near-bed hydrodynamics measurements above boulders in shallow torrential streams: Implications for stream biota." *Journal of Environmental Engineering and Science* 3(5): 365-378.
- Ikeda, S. y McEwan, I.K. (2009). *Flow and Sediment Transport in Compound Channels. The experiences of Japanese and U.K. Research*. Madrid, IAHR
- Jackson, D. y Launder, B. (2007). "Osborne Reynolds and the Publication of His Papers on Turbulent Flow." *Annual Review of Fluid Mechanics* 39: 19-25.
- Jiménez, J. (2004). "Turbulent flow over rough walls." *Annual Review of Fluid Mechanics* 36: 173-196.
- Katul, G., Wiberg, P., Albertsson, J. y Hornberger, G. (2002). "A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams." *Water Resources Research* 38(11): 1250-1257.
- Kironoto, B.A. y Graf, W.H. (1994). "Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy* 106(4): 333-344.
- Kironoto, B.A. y Graf, W.H. (1995). "Turbulence characteristics in rough non-uniform open-channel flow." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy* 112(4): 336-348.
- Knight, D.W., Demetriou, J.D. y Hamed, M.E. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channels." *Journal of Hydraulic Engineering* 110: 504-422.
- Knight, D.W., Omran, M. y Tang, X. (2007). "Modelling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(1): 39-47.
- Kolmogorov, A. (1991). "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds." *Proceedings of the Royal Society of London A* 434: 9-13.
- Kolmogorov, A. (1941). "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds (in Russian)." *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 30: 299-303.

- Lopez, F. y Garcia, M.H. (2001). "Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering* 127(5): 392-402.
- López, F. y García, M.H. (1999). "Wall Similarity in Turbulent Open-Channel Flow." *Journal of Hydraulic Engineering* 125(7): 789-796.
- Manes, C., Pokrajac, D. y McEwan, I. (2007). "Double-averaged open-channel flows with small relative submergence." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 896-904.
- McLean, S., Wolfe, S.R. y Nelson, J.M. (1999). "Spatially averaged flow over a wavy boundary revisited." *Journal of Geophysical Research* 104(C7,15): 743-753.
- McLean, S., Nikora, V. y Coleman, S. (2008). "Double-averaged velocity profiles over fixed dune shapes." *Acta Geophysica* 56(3): 669-697.
- Mignot, E., Barthelemy, E. y Hurther, D. (2008). "Turbulent Kinetic Energy budget in a gravel-bed channel flow." *Acta Geophysica* 56(3): 601-613.
- Mignot, E., Barthelemy, E. y Hurther, D. (2009). "Double-averaging analysis and local flow characterization of near-bed turbulence in gravel-bed channel flows." *Journal of Fluid Mechanics* 618: 279-303.
- Monin, A.S. y Yaglom, A.M. (1971). *Statistical Fluid Mechanics. Mechanics of Turbulence*. Massachusetts, MIT Press. 784 págs.
- Monin, A.S. y Yaglom, A.M. (1975). *Statistical Fluid Mechanics. Mechanics of Turbulence*. Massachusetts, MIT Press. 874 págs.
- Nezu, I. y Rodi, W. (1986). "Open-channel flow measurements with a Laser Doppler Anemometer." *Journal of Hydraulic Engineering* 112(5): 335-355.
- Nezu, I. y Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*. Rotterdam, A.A. Balkema
- Nezu, I. (2005). "Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect in the 21st Century." *Journal of Hydraulic Engineering* 131(4): 229-246.
- Nguyen, V.T., Nestmann, F. y Scheulerlein, H. (2007). "Three-dimensional computation of turbulent flow in meandering channels and rivers." *Journal of Hydraulic Research* 45(5): 595-609.
- Nicholas, A.P. y McLelland, S.J. (2004). "Computational fluid dynamics modelling of three-dimensional processes on natural river floodplains." *Journal of Hydraulic Research* 42(2): 131-143.
- Nikora, V. y Goring, D.G. (1998). "ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?" *Journal of Hydraulic Engineering* 124(6): 630-634.
- Nikora, V. (1999). "Origin of the -1 spectral law in wall-bounded turbulence." *Physical Review Letters* 83(4): 734-736.
- Nikora, V. y Goring, D. (2000). "Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds." *Journal of Hydraulic Engineering* 126(9): 679-690.
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I. y Griffith, G. (2001). "Spatially averaged open-channel flow over rough bed." *Journal of Hydraulic Engineering* 127(2): 123-133.
- Nikora, V., Green, M.O., Thrush, S.F., Hume, T.M. y Goring, D. (2002a). "Structure of the internal boundary layer over a patch of pinnid bivalves (*Atrina zelandica*) in an estuary." *Journal of Marine Research* 60(1): 121-150.
- Nikora, V., Koll, K., McLean, S., Dittrich, A. y Aberle, J. (2002b). *Zero-plane displacement for rough-bed open-channel flows*. Proc. of River Flow 2002, Belgium, Swets & Zeitlinger.
- Nikora, V., Koll, K., McEwan, I., McLean, S. y Dittrich, A. (2004). "Velocity distributions in the roughness layer of rough-bed flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 130(7): 1036-1042.
- Nikora, V. (2005). "Flow turbulence over mobile gravel-bed: spectral scaling and coherent structures." *Acta Geophysica Polonica* 53(4): 539-552.
- Nikora, V. (2007). *Hydrodynamics of gravel-bed rivers: scale issues*. en *Gravel-bed rivers VI. From process Understanding to River Restoration*. H. Habersack, H. Piegay y M. Rinaldi. Amsterdam, Elsevier Science Publishing Company: 61-84 (836).
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D. y Walters, R. (2007a). "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 873-883.

- Nikora, V., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., McEwan, I., Campbell, L., Aberle, J., Clunie, D. y Koll, K. (2007b). "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Applications." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 884-895.
- Nikora, V. (2008a). *River Hydrodynamics: Basics, Double Average Methodology and Turbulence. Lecture Notes. Int. Summer School. Complex Flows, Turbulence, Morphodynamics and Ecology in Rivers*. Delft, TU Delft
- Nikora, V. (2008b). *Hydrodynamics of gravel-bed rivers: scale issues*. en *Gravel bed rivers VI. From Process Understanding to River Restoration*. H. Habersack, H. Piégay y M. Rinaldi. Amsterdam, Springer: 61-84.
- Nikora, V. y Rowinski, P.M. (2008). "Rough-bed flows in geophysical, environmental, and engineering systems: Double-Averaging Approach and its applications." *Acta Geophysica* 56(3): 529-533.
- Nikora, V. (2009). "Hydrodynamics of Aquatic Ecosystems: An interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics." *River Research and Applications*(in press).
- Nikuradse, J. (1933). "Stromungsgesetze in rauhen Rohren (Laws of flow in rough pipes)." VDI-Forschungsheft 361. Beilage zu "Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens" (Supplement to "research in the areas of engineering"). Translation by NASA. Technical Memorandum 1292. 4: 64.
- Patra, K.C. y Kar, S.K. (2000). "Flow interaction of meandering river with floodplains." *Journal of Hydraulic Engineering* 126(8): 593-604.
- Pedras, M.H.J. y de Lemos, M.J.S. (2001). "Macroscopic turbulence modeling for incompressible flows through underformable porous media." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44: 1081-1093.
- Peña, E. (2002). *Estudio numérico-experimental del transporte de sedimentos en cauces aluviales. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente*. A Coruña, University of A Coruña. PhD Dissertation
- Peña, E., Anta, J., Puertas, J. y Teijeiro, T. (2008). "Estimation of Drag Coefficient and Settling Velocity of the Cockle *Cerastoderma edule* Using Particle Image Velocimetry." *Journal of Coastal Research* 24 (4C): 150-158.
- Perry, A.E., Schofield, E.H. y Joubert, P.M. (1969). "Rough wall turbulent boundary layers." *Journal of Fluid Mechanics* 34: 383-413.
- Pokrajac, D., Finnigan, J.J., Manes, C., McEwan, I. y Nikora, V. (2006). *On the definition of the shear velocity in rough bed open channel flows. River Flow 2006*. Ferreira, Alves, Leal y Cardoso. Porto, Taylor & Francis Group: 89-98 págs.
- Pokrajac, D., Campbell, L., Nikora, V., Manes, C. y McEwan, I. (2007). "Quadrant analysis of persistent spatial velocity perturbations over square-bar roughness." *Experiments in Fluids* 2007(42): 413-423.
- Pokrajac, D. y Manes, C. (2008). "Interface between turbulent flows above and within rough porous walls." *Acta Geophysica* 56(3): 824-844.
- Pokrajac, D., McEwan, I. y Nikora, V. (2008). "Spatially averaged turbulent stress and its partitioning." *Experiments in Fluids* 45: 73-83.
- Pope, S.B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge, Cambridge University Press. 771 págs.
- Prandtl, L. (1925). "Über die Ausgebildete Turbulenz." *ZAMM* 5: 136-139.
- Radice, A. y Ballio, F. (2008). "Double-average characteristics of sediment motion in one-dimensional bed load." *Acta Geophysica* 56(3): 654-668.
- Rameshwaran, P. y Nadem, P.S. (2004). "Three-dimensional modelling of free surface variation in meandering channel." *Journal of Hydraulic Research* 42(6): 603-615.
- Rameshwaran, P. y Shiono, K. (2007). "Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent vegetation on floodplains." *Journal of Hydraulic Research* 45(3): 302-315.
- Rapauch, M.R. y Shaw, R.H. (1982). "Averaging procedures for flow within vegetation canopies." *Boundary-Layer Meteorology* 22: 77-90.
- Raupach, M.R., Antonia, R.A. y Rajagoplan, S. (1991). "Rough-wall turbulent boundary layers." *Applied Mechanics Review* 44: 1-24.

- Reynolds, O. (1883). "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels." *Philosophical Transactions of the Royal Society* 174: 935-982.
- Reynolds, O. (1895). "On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion." *Philosophical Transactions of the Royal Society* 186: 123-164.
- Richardson, L.F. (1922). *Weather prediction by numerical process*. Cambridge, Cambridge University Press
- Rodi, W. (1980). *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics. A state-of-the-art review*. Rotterdam, A.A. Balkema. 116 págs.
- Rodríguez, J.F. y García, M.H. (2008). "Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed." *Journal of Hydraulic Research* 46(4): 454-465.
- Roussinova, V., Biswas, N. y Bachalandar, R. (2008). "Revisiting turbulence in smooth uniform open channel flow." *Journal of Hydraulic Research* 46(Extra Issue I): 36-48.
- Ruijter, R. (2004). *Turbulence structures affecting stone stability in backward-facing step flow. Experiments by means of Particle Image Velocimetry Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft, TU Delft*. MsC Thesis: 151 págs.
- Rusello, P.J., Lohrmann, A., Siegel, E. y Maddux, T. (2002). *Improvements in acoustic doppler velocimetry*. 7th International Conference on HydroScience and Engineering, Philadelphia, USA.
- Shields, A. (1936). "Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der turbulenforchung auf die Geschiebebewegung (Applications of similarity principles and turbulence research to bed-load movement)." *Mitteilungen der Prussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau and Schiffbau*, Berlin.
- Shiono, K. y Knight, D.W. (1991). "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel." *Journal of Fluid Mechanics* 222: 617-646.
- Shiono, K. y Muto, Y. (1998). "Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow." *Journal of Fluid Mechanics* 376: 221-261.
- Shiono, K., Chan, T., Spooner, J., Rameshwaran, P. y Chandler, J. (2009a). "The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part I." *Journal of Hydraulic Research* 47(1): 5-19.
- Shiono, K., Chan, T., Spooner, J., Rameshwaran, P. y Chandler, J. (2009b). "The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part II." *Journal of Hydraulic Research* 47(1): 20-28.
- Song, T. (1994). *Velocity and turbulence intensities distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow. Laboratoy of Hydraulic Constructions*. Laussane, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. PhD Dissertation: 219 págs.
- Song, T. y Chiew, Y.M. (2001). "Turbulence measurement in nonuniforms open-channel flow using acoustic doppler velocimeter (ADV)." *Journal of Engineering Mechanics* 127(3): 219-232.
- Spalart, P.R. (2000). "Strategies for turbulence modelling and simulations." *International Journal of Hest and Fluid Flow* 21: 252-263.
- Spalart, P.R. (2004). *Research Directions in Unsteady Aerodynamics. 57th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*. Seattle, USA
- Stoesser, T. y Nikora, V. (2008). "Flow structure over square bars at intermediate submergence: Large Eddy Simulation study of bar spacing effect." *Acta Geophysica* 56(3): 876-893.
- Streeter, V.L. y Wylie, E.B. (1980). *Mecánica de los Fluidos*. Mexico DF, Mc-Graw Hill
- Taylor, G.I. (1935). "Statistical theory of turbulence. Parts 1-4." *Proceedings of the Royal Society of London A*: 151-421.
- Tcheng, C.M. (1953). "On the spectrum of energy in turbulent shear flows." *Journal of Res. Nat. Bui. Standards* 50(1): 51-62.
- Tennekes, H. y Lumley, J. (1972). *A first course in turbulence*. Cambridge, Massachussets, The MIT Press,
- Termini, D. y Greco, M. (2006). "Computation of flow velocity in rough channels." *Journal of Hydraulic Research* 44(6): 777-784.

- Tominaga, A. y Nezu, I. (1991). "Turbulent structure in compound open-channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 117(1): 21-41.
- Tritico, H.M. y Hotchkiss, R.H. (2005). "Unobstructed and obstructed turbulent flow in gravel bed rivers." *Journal of Hydraulic Engineering* 131(8): 635-645.
- Van Dyke, M.D. (1982). *An album of fluid motion*. Parabolic Press. 176 págs.
- Wahl, T.L. (2002). *Analyzing ADV Data Using WinADV. 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*. Minneapolis, Minnesota: 10 págs.
- Walters, R. y Plew, D.R. (2008). "Numerical modeling of environmental flows using DAM: Some preliminary results." *Acta Geophysica* 56(3): 918-934.
- Wang, X., Wang, Z.Y., Yu, M. y Li, D. (2001). "Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-law and wake-law." *Journal of Hydraulic Research* 39(2): 211-217.
- Wang, Z.Q. y Cheng, N.-S. (2005). "Secondary flows over artificial bed strips." *Advances in Water Resources* 28(5): 441-450.
- Whitaker, S. (1999). *The method of volume averaging*. Dordrecht, Kluwer Academic Press
- Wilson, N.R. y Shaw, R.H. (1977). "A higher order closure model for canopy flow." *Journal of Applied Meteorology* 16: 1197-1205.
- Willert, C. (2007). *Vector Field Operators for PIV. Lecture Notes. Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice*. Göttingen, DLR
- Wormleaton, P.R., Sellin, R.H.J., Bryant, T., Loveless, J.H. y Catmur, S.E. (2004). "Flow structures in a two-stage channel with mobile bed." *42 2(2004)*: 145-162.
- Wormleaton, P.R. y Ewunetu, M. (2006). "Three-dimensional $k-\epsilon$ numerical modelling of overbank flow in a mobile bed meandering channel with floodplains of different depth, roughness and planform." *Journal of Hydraulic Research* 44(1): 18-32.
- Yang, S.-Q., Tan, S.-K. y Lim, S.-Y. (2004). "Velocity distribution and dip-phenomenon in smooth uniform open-channel flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 130(12): 1179-1186.
- Yang, S.-Q. (2005a). *Mechanism of velocity deviation from classical log-law. XXXI IAHR Congress*. Seoul: 3506-3516 págs.
- Yang, S.-Q. (2005b). "Interaction of boundary shear stress, secondary currents and velocity." *Fluid Dynamics Research* 36: 121-136.
- Yang, S.-Q., Xu, W.-L. y Yu, G.-L. (2006). "Velocity distribution in a gradually accelerating free surface flow." *Advances in Water Resources* 29: 1969-1980.
- Yang, S.-Q. y Lee, J.-W. (2007). "Reynolds shear stress distributions in a gradually varied flow in a roughened channel." *Journal of Hydraulic Research* 45(4): 462-471.
- Yang, S.-Q. y Chow, A.T. (2008). "Turbulence structures in non-uniform flows." *Advances in Water Resources* 31: 1344-13151.
- Yang, S.-Q. (2009). "Velocity distribution and wake-law in gradually decelerating flows." *Journal of Hydraulic Research* 47(2): 177-184.

HIDRÁULICA EXPERIMENTAL



En este capítulo se realiza una pequeña introducción a las principales técnicas de visualización del flujo para, a continuación, describir los fundamentos de la velocimetría de imagen de partículas o *Particle Image Velocimetry* (PIV). Se mostrarán las tipologías y aplicaciones de estos equipos, los fundamentos tecnológicos de los mismos así como las bases de la técnica de evaluación de imágenes con los algoritmos de correlación cruzada. El enfoque del capítulo intenta ser práctico, presentando los aspectos más importantes que contribuyen a mejorar la precisión de la técnica. En el último apartado se ha realizado una descripción del equipo empleado en esta tesis.

Fotografía de Portada:

Chorro circular descargando con $Re=3800$ sobre un flujo con relación de velocidad agua/chorro de ~ 5 . La visualización se realiza con dos colorantes que permiten ver la capa de corte del chorro y como ésta asciende formando vórtices en anillo (Smits y Lim, 2000).

3. HIDRÁULICA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirán los fundamentos de instrumentación PIV empleada en los ensayos de arrastre de berberechos. La herramienta PIV (*Particle Image Velocimetry*) es una técnica de visualización de flujo no intrusiva que permite determinar los campos de velocidades instantáneos en un plano en régimen variable.

La principal característica o potencialidad de esta metodología, frente a otros equipos como los velocímetros acústicos (ADVs) o los anemómetros láser por efecto doppler (LDV), está en que la determinación del campo de velocidades se realiza de modo simultáneo en un dominio bidimensional. De este modo es posible realizar el análisis de las estructuras espaciales del flujo de forma rápida, y en régimen no permanente. Por tanto, esta tecnología es muy apropiada para poder estudiar la variabilidad espacial del flujo con la herramienta del doble promediado, presentada en el capítulo anterior. Además, esta técnica es no intrusiva, por lo que su aplicación no afecta a la estructura del flujo.

En las instalaciones de la Escuela de Caminos (ETSECCP) y del Centro de Investigación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la Universidade da Coruña (UDC) se encuentra disponible un equipo PIV desde el año 2001. Desde esta fecha, se han realizado varios estudios de transporte de sedimentos (Peña, 2002; Peña *et al.*, 2008b), estudios en estructuras hidráulicas (Amador *et al.*, 2004; Mouriño, 2007), investigaciones fundamentales (Anta *et al.*, 2007b) y también aplicadas (Anta *et al.*, 2005; Anta *et al.*, 2007a; Peña *et al.*, 2008a), entre otras aplicaciones.

El trabajo inicial de descripción del equipo y el estudio preliminar de las capacidades del mismo ha sido realizada por Félix Sánchez-Tembleque (Sánchez-Tembleque, 2002). En este trabajo de investigación, Sánchez-Tembleque hace una revisión del estado del arte de la técnica a principios del 2000, y también una descripción detallada de los fundamentos tecnológicos de la misma. La descripción del PIV en este texto, está muy enfocada al análisis tecnológico de los componentes del equipo: partículas, láser, cámaras de grabación, etc. En el trabajo también existe un buen tratamiento de las distintas técnicas de evaluación de la imagen, así como los fundamentos matemáticos empleados en las mismas.

Sin lugar a dudas, el trabajo realizado por Sánchez-Tembleque ha facilitado la aplicación de la técnica en los trabajos posteriores realizados por el GEAMA, y también ha servido de base para la elaboración de algunas partes de este capítulo, especialmente el apartado dedicado a los fundamentos físicos y tecnológicos del PIV (§3.3.3).

Las principales aportaciones de este capítulo, y por extensión del trabajo realizado por el autor de esta tesis, se encuentran en la descripción de los fundamentos de la evaluación de correlación cruzada así como de los aspectos prácticos de la misma (§3.3.4). El tratamiento de los factores que influyen en la bondad y precisión de la técnica, el análisis de las técnicas actuales de correlación cruzada, así como de los procesos de pre y procesado, representa un tema novedoso en el seno del GEAMA. Este trabajo se ha basado en la experiencia propia y la recopilada por el autor en varios cursos internacionales celebrados en la ciudad alemana de Göttingen (Stanislas *et al.*, 2007; LaVision, 2009).

Antes de acometer la descripción de la técnica y del equipo PIV que está a disposición del GEAMA, se ha considerado interesante realizar una introducción de las principales herramientas de visualización de flujo (§3.2).

Tras este apartado, se realizará un revisión de los fundamentos básicos de la técnica centrada en el PIV 2D, pero también se enumerarán las variantes, principales mejoras y nuevas aplicaciones que se han desarrollado desde la presentación del trabajo de Sánchez-Tembleque (§3.3.1 y §3.3.2) hasta la actualidad.

Por último, en el apartado del capítulo (§3.1) se realizará una descripción del equipo PIV disponible en las instalaciones del CITEEC-ETSEEC.

3.2. TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN DE FLUJO

Las técnicas de visualización del flujo permiten observar directamente las estructuras o el propio movimiento de un fluido como el agua. Como la mayoría de los fluidos, líquidos o gaseosos, son medios transparentes, las técnicas de visualización deben permitirnos “descubrir” el movimiento.

Existen una gran variedad de técnicas de visualización, pero la característica común a todas ellas es que se basan en añadir algún tipo de trazador, p.ej. un colorante o humo, de modo que lo que observamos es el trazador y no el movimiento del fluido (2007). Por este motivo, las diferencias entre el movimiento del fluido y el trazador deben ser mínimas.

Para la visualización del flujo es necesario iluminar la escena. Por este motivo, el flujo visualizado es el resultado de la interacción del movimiento del agua y de la luz que lo ilumina. La luz puede ser modificada cuando interactúa con el flujo, y de este modo nos proporciona información que podemos adquirir de dos formas (Figura 3.1):

- Registrando la luz transmitida a través del flujo y comparando sus propiedades con las características de luz incidente (p.ej. fase o dirección de propagación de las ondas). Los métodos típicos son la interferometría óptica, el *schlieren* o la *shadowgraphy*. Una descripción de estas técnicas se puede encontrar en el Cap. 6 del *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics* (Tropea et al., 2007).
- Registrando la luz dispersada por el flujo desde una posición determinada. Con estas técnicas se podrán inferir las propiedades puntuales de los flujos, suponiendo que desde que se produce la interacción con el flujo, la luz no cambia hasta que es captada. Este tipo de técnicas serán las que se presentarán brevemente a continuación.

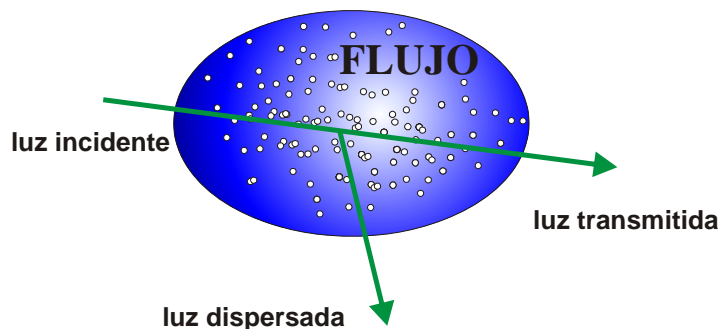


Figura 3.1. Interacción de un haz de luz con el movimiento de un fluido sembrado con partículas.

Aunque esta clasificación de las técnicas de visualización de flujo está bastante extendida, existen otras formas de diferenciarlas como p.ej. técnicas con trazadores, técnicas basadas en medir la variación de densidad del fluido y técnicas en las que se introduce energía en el flujo (Johansson y Naughtin, 2006).

La parte de la luz que no es transmitida por el flujo se refleja o dispersa en las partículas del fluido. Como la intensidad de las partículas reflejadas por las moléculas de fluido es muy débil, es habitual “sembrar” partículas en el flujo para poder visualizar de un modo más sencillo (Merzkich, 2007). Por este motivo, lo que se visualiza es el movimiento de las partículas, y por este mismo motivo, una buena técnica de visualización es aquella que emplea partículas que siguen fielmente el movimiento del fluido.

Las técnicas de visualización pueden ser además de tipo cualitativo, cuando sólo se recoge la información de la luz dispersada, o de tipo cuantitativo, cuando se hace un seguimiento (*tracking*) de ésta. Entre este tipo de técnicas cuantitativas, a veces denominadas *Particle Based Methods*, se encuentra la técnica PIV, pero también se pueden incluir otras metodologías basadas en medir el desplazamiento por efecto *Doppler* de la luz como p.ej. el *Laser Doppler Anemometer* (LDA), que no permite la visualización del flujo.

En otras situaciones, la interacción del flujo con el contorno sobre el que se desplaza puede ser de tipo mecánica, térmica o química. Algunos métodos de visualización se basan en analizar los cambios que una pintura u otro tipo de recubrimiento aplicado sobre la superficie de los modelos ensayados, p.ej. en un túnel de viento, para determinar indirectamente las presiones o las tensiones tangenciales. Un ejemplo es la técnica *Pressure-Sensitive Painting*, donde la superficie del modelo es pintada con una pintura especial permeable al oxígeno (Figura 3.2). Este recubrimiento se ilumina con una longitud de onda determinada, y con una cámara digital se analiza la luminancia del modelo, que es inversamente proporcional a la presión ejercida por el flujo. Más detalles sobre la técnica PSP y otras similares se pueden encontrar p.ej. en Metha *et al.*,(2000) o en el apartado 4 del Capítulo 4 y en el Capítulo 7 de Tropea *et al.* (2007).

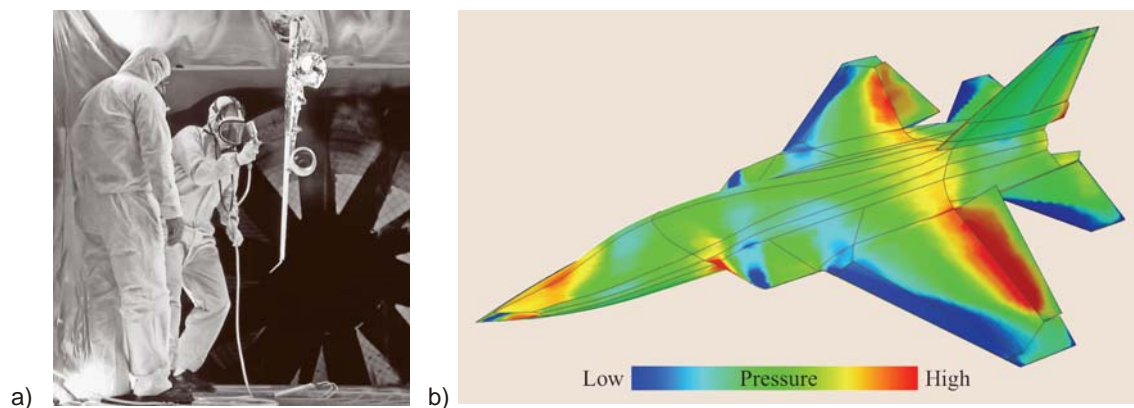


Figura 3.2. a) Operarios pintando el ala de un modelo de avión comercial en un túnel de viento y b) resultados de las presiones sobre un modelo completo de avión de combate (Cap. 4.4. de Tropea *et al.*, 2007).

Históricamente, quizás la primera aproximación al problema de la observación de la estructura de un flujo fuese el experimento realizado por L. Prandtl en 1904. Prandtl dispuso un canal horizontal de agua para su uso a modo de túnel de viento, con una sección de ensayo y una sección de retorno con un molinete accionado a mano. En este canal ensayó estructuras como

cilindros, placas planas y hasta perfiles de ala (Figura 3.3). Para la observación del flujo introducía partículas de mica negra en la superficie del agua (Raffel *et al.*, 2007).

Cambiando los parámetros del experimento (forma del modelo, velocidad de flujo, ángulo de ataque...), Prandtl adquirió grandes conocimientos en los fundamentos básicos del flujo no estacionario. Sin embargo la observación era cualitativa y no cuantitativa ya que en este experimento no se realizaba ninguna medida.



Figura 3.3. Separación de flujo después de un ala. Visualización con una réplica del equipo de Prandtl (Raffel *et al.*, 2007).

Como se describirá con detalle en el apartado 3.1, noventa años después del experimento de Prandtl, un esquema similar permite la obtención de datos cuantitativos a partir de la toma de imágenes, introduciendo del mismo modo partículas en el campo fluido. El desarrollo actual de la tecnología láser, en equipos de toma de imagen, electrónica e informática ha permitido un rápido desarrollo de esta técnica.

Pero antes de hablar de exponer la técnica PIV se ha considerado interesante presentar muy brevemente otras técnicas de visualización de flujo. La importancia de estas técnicas en la comprensión del movimiento del agua ha sido, y sigue siendo, crucial. Por ejemplo, las primeras estructuras coherentes de flujo no se determinaron con una instrumentación sofisticada como los equipos LDA o los anemómetros de hilo caliente. Su existencia se determinó a partir de técnicas de visualización rudimentarias basadas en añadir humo o un tinte al fluido, sí este es aire y agua, respectivamente (Merzkich, 2007).

En la literatura se pueden encontrar varias obras específicas sobre Técnicas de Visualización de Flujo, como por ejemplo el texto de Smits y Lim (2000). Una referencia clásica es el *Album of Fluid Motion* de Milton van Dyke (1982), que únicamente recoge fotografías sobre distintos tipos de flujos tomados con las técnicas de la época.

Lo que podemos ver con las técnicas de visualización de flujo depende del tipo de fenómeno que estemos analizando y de cómo realicemos la inyección del trazador en el flujo. Así, cuando queremos analizar el movimiento de dos masas de fluido con diferentes velocidades, p.ej. un chorro o un flujo de intercambio (Figura 3.4), podemos añadir el trazador homogéneamente en uno de los fluidos y analizar los fenómenos de mezcla o las inestabilidades del flujo en la interfase entre los dos medios.

En otras ocasiones, se puede añadir un trazador de forma continuada en uno o varios puntos fijos del dominio del flujo para así poder visualizar líneas de corriente, procesos de mezcla turbulenta o la frecuencia y crecimiento de ciertas inestabilidades (Figura 3.5).

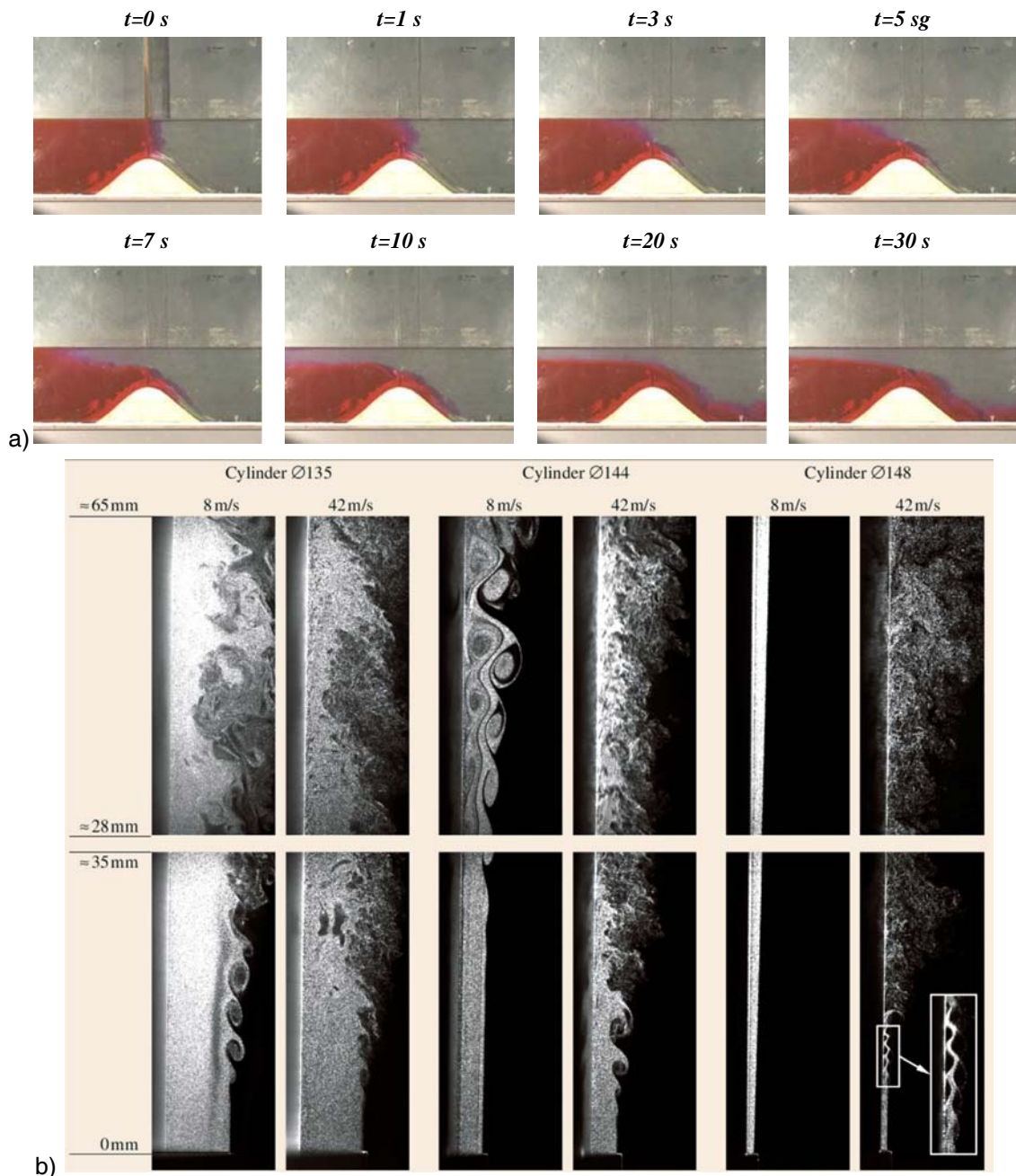


Figura 3.4. a) Secuencia del inicio de un flujo estratificado sobre un obstáculo submarino. La visualización se ha realizado añadiendo Rodamina WT al medio con mayor densidad y la grabación con una cámara de video convencional miniDV (Anta et al., 2007b); b) Visualización con humo de un chorro axisimétrico adyacente a un cilindro liso de $\phi=135$, 144 y 148 mm. La apertura del difusor, en forma de anillo, decrece hacia la derecha ($\phi 7.5$, 3 y 1 mm). La iluminación se ha realizado con un plano láser (Fotografías de F. Peters, recogidas en Merzkich, 2007).

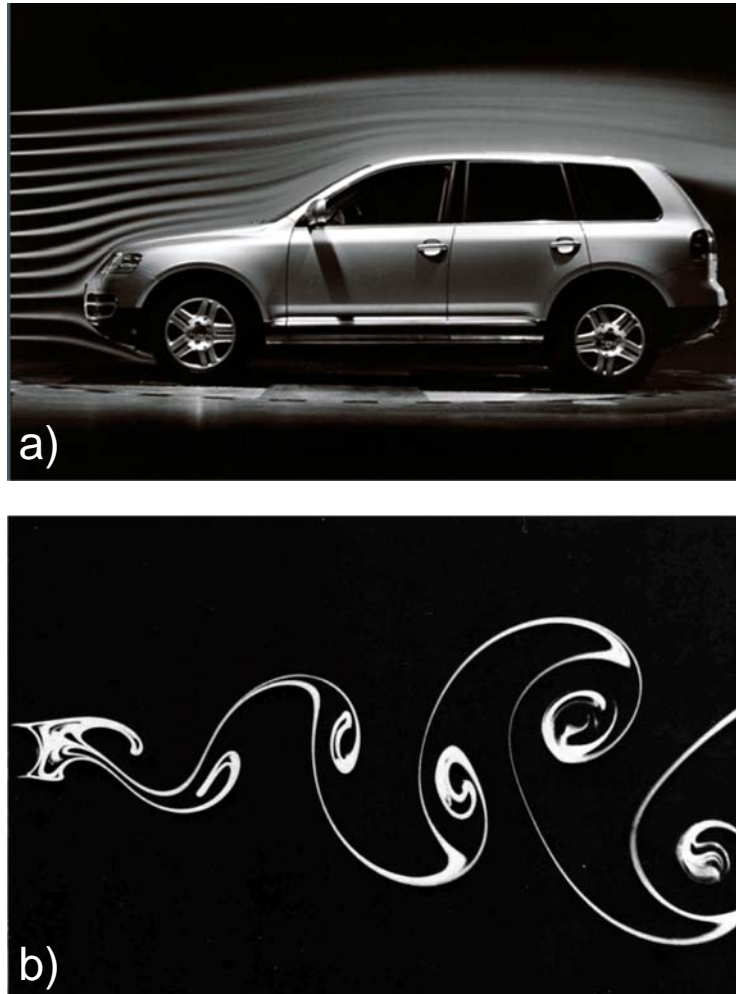


Figura 3.5. a) Visualización con humo de las líneas de corriente sobre un modelo a escala real de un VW Golf en túnel de viento (Fotografías de la Volkswagen AG en Wolfsburg, recogidas en Merzkich, 2007); b) Calle de Kármán tras un cilindro para un $Re=140$ en un canal con auge a velocidad de 1.4 cm/s. La visualización se realiza por la precipitación de un humo blanco coloidal iluminado por un plano láser. En la figura se puede apreciar como las inestabilidades crecen varios diámetros en anchura (Van Dyke, 1982).

Las técnicas de visualización presentadas en las figuras anteriores (Figura 3.4 y Figura 3.5) se basan en introducir un trazador que se mezcla de un modo continuo con el fluido. En otras técnicas de visualización se pueden añadir partículas de algún metal (ver Figura 3.3 y Figura 3.6), burbujas de aire o gotitas de aceite, y trazar su movimiento.

Sí la densidad de partículas no es muy alta, y las fotografías se toman con un tiempo de exposición elevado, se puede determinar la velocidad del flujo a partir de la longitud de las partículas (que se ven como estiradas) y el tiempo de exposición. Sin embargo, este tipo de técnicas están cayendo en desuso por el auge de los modernos sistemas digitales PIV (*Particle Image Velocimetry*), y PTV (*Particle Tracking Velocimetry*), (ver apartado 3.3.1).

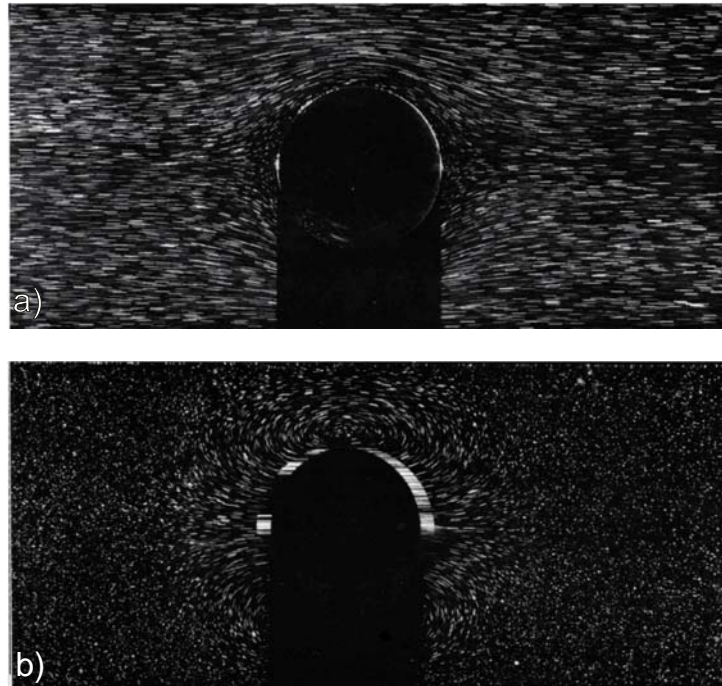


Figura 3.6. Esfera sedimentando en un tubo relleno con aceite con un $Re=0.10$ en el que se han sembrado partículas de magnesio. La escena se ha iluminado con un plano de luz. a) movimiento relativo: la cámara se mueve a la misma velocidad que la esfera y b) movimiento absoluto: la cámara está en una posición fija. El movimiento es de izquierda a derecha. (Vand Dyke, 1982).

Otro tipo de técnicas de visualización permiten observar el movimiento del fluido a lo largo de un perfil vertical u horizontal. En fluidos acuosos, la más popular es la técnica *hydrogen-bubble*, que se basa en generar, por la electrólisis del agua entorno a un cable, un filamento de burbujas de hidrógeno. Esta hilera de burbujas traza perfectamente el movimiento del agua (Figura 3.7). La generación de las burbujas se realiza con una fuente de corriente continua pulsada. El hilo de la sonda funciona como cátodo en la reacción. En el ánodo, el otro extremo del circuito situado en otra zona del canal, se generan burbujas de oxígeno.

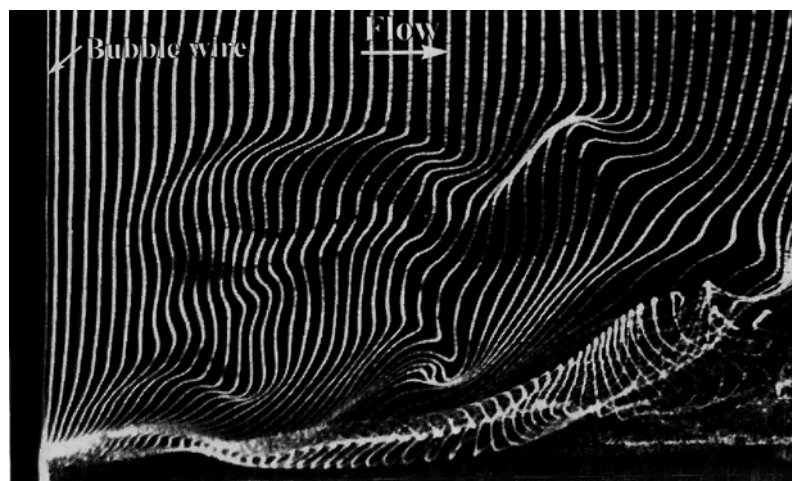


Figura 3.7. Visualización de una capa límite turbulenta mediante la técnica de las burbujas de hidrógeno. La frecuencia de generación de los filamentos es de 30 Hz y el $Re=2.2 \times 10^5$ (Fotografía de Praisner y Sabatino, recogida en Smith et al., 2000)

A través de la determinación de la distancia entre los hilos visualizados se puede inferir la velocidad del agua, aunque en la actualidad esta técnica también ha dejado de emplearse como un método experimental cuantitativo. En los capítulos 2 y 3 de Smits y Lim (2000) se pueden consultar los aspectos más tecnológicos de las técnicas de generación de burbujas de hidrógenos y de las de visualización de humo y colorantes (Lim, 2000; Smith *et al.*, 2000).

En algunas ocasiones el trazador se mezcla tan rápido en el medio que es imposible determinar las estructuras y los procesos de mezcla con el fluido en el cual es inyectado. Para evitar esto se puede mejorar la visibilidad del flujo empleando trazadores fluorescentes. Para inducir la fluorescencia se suelen emplear fuentes láser, tecnologías LIF (*Laser Induced Fluorescence*), o fuentes de UV (Merzkich, 2007).

Desde comienzos de 2008, el equipo PIV del CITEEC-ETSCCP (ver descripción en apartado 3.1), ha sido actualizado para poder ser empleado como un equipo LIF. El principio de funcionamiento de esta técnica consiste en la iluminación, por medio del mismo haz de luz láser empleado en la técnica PIV, de un flujo en el que se ha diluido un trazador, en concreto la Rodamina 6G en nuestro equipo. Cuando el trazador es excitado por el láser, que emite su luz a una longitud de onda de 532 nm, la rodamina emite una luz fluorescente con una longitud de onda de unos ~560 nm. La intensidad de la luz emitida depende de la concentración de trazador y de la intensidad de luz que es absorbida por la Rodamina. Entonces, a partir de la intensidad de luz registrada con una cámara CCD se podrá estimar la concentración del trazador⁴⁷.

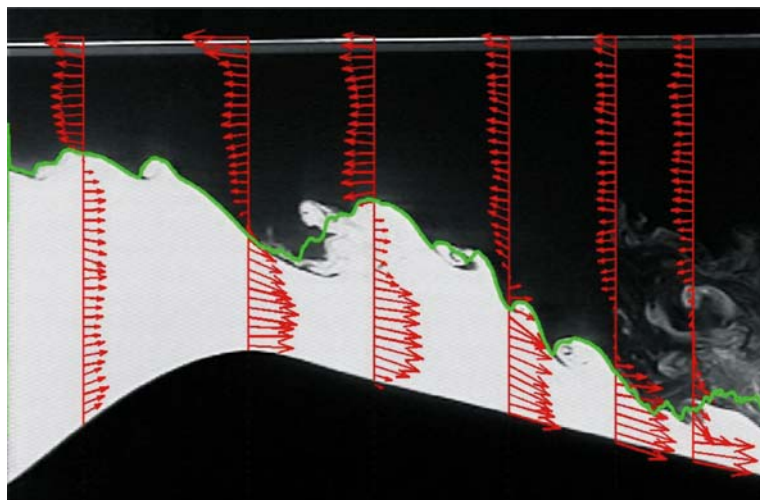


Figura 3.8. Evolución del flujo de intercambio sobre un obstáculo submarino. La capa más densa (inferior, salada) contiene el trazador fluorescente. En la figura se ha representado la interface entre ambas capas y varios perfiles de velocidad instantánea (Fouli, 2006).

En los últimos años la tecnología LIF está proliferando en numerosos campos de la ingeniería hidráulica y ambiental experimental, ya que con un diseño adecuado se pueden analizar muchas tipologías de flujos. Algunos ejemplos son los siguientes:

⁴⁷ Como la intensidad del plano de luz láser decae en con la distancia al foco emisor será necesario realizar una serie de correcciones para eliminar este, y otros efectos, de la imagen registrada. Sólo con un correcto pretratamiento de las imágenes se podrán estimar campos de concentraciones precisos. El procedimiento de corrección se puede encontrar p.ej en Aanen, (2002).

- Flujos estratificados: estudio de los procesos de intercambio de las masas de agua, generación (frecuencia y amplitud) de las inestabilidades que se producen en la capa de mezcla (Figura 3.8) y efecto de la rugosidad del lecho en la mezcla (p.ej. Fouli, 2006; Negretti, 2007; Negretti *et al.*, 2008; Querzoli *et al.*, 2008). Los campos de concentraciones y velocidades (con el uso conjunto de PIV) en chorros o *jets* de agua (Aanen, 2002). Un caso particular es el estudio de la inyección de un efluente a través de un emisario submarino (p.ej. Tian, 2002; Tian *et al.*, 2004).
- Para analizar el proceso de mezcla en la capa límite: la tecnología LIF puede ser empleada de un modo similar a otras técnicas más antiguas como la inyección de humo o un colorante. Un ejemplo es el estudio de flujo sobre traviesas de diferente rugosidad realizado por Djenidi *et al.*, (2008) -Figura 3.9-.

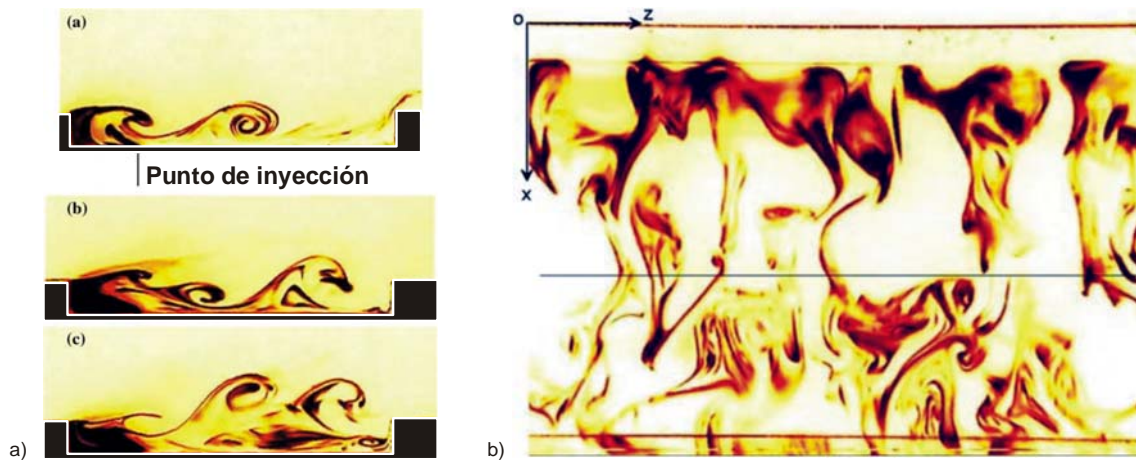


Figura 3.9. Determinación de la estructura de la capa límite turbulenta en la zona rugosa de un flujo sobre traviesas de tipo $-k$ (obstáculo aislado) con ayuda de la técnica LIF: a) evolución temporal de las estructuras coherentes en perfil y b) vista en planta. (Djenidi *et al.*, 2008).

Desde el GEAMA hemos comenzado a trabajar con la tecnología LIF aplicándola al estudio de las diluciones obtenidas tras la inyección de un efluente por un emisario en medio marino (Figura 3.10). En este estudio, realizado para la Administración Hidráulica de Galicia, se ha analizado con éxito la influencia de la separación de los difusores, el calado y el caudal de descarga en las diluciones obtenidas en el medio receptor en una serie de ensayos que representan de un modo realístico las características de los emisarios submarinos gallegos..

En el momento de escribir esta Tesis Doctoral, el autor de la misma está involucrado en la realización de una nueva serie de ensayos de flujo estratificado (ver Figura 3.4) sobre dos configuraciones geométricas de lecho: una sucesión de dunas con diferentes ratios de λ/Δ y sobre una pendiente con una geometría similar a la del contacto río-ría en la desembocadura del Ulla. El objetivo de esta serie de estos ensayos es mejorar el conocimiento sobre los procesos de mezcla que se producen en la zona de los Lombos do Ulla, que como se verá en el Capítulo 4, están relacionados con los fenómenos de mortandad de berberechos en esta zona.

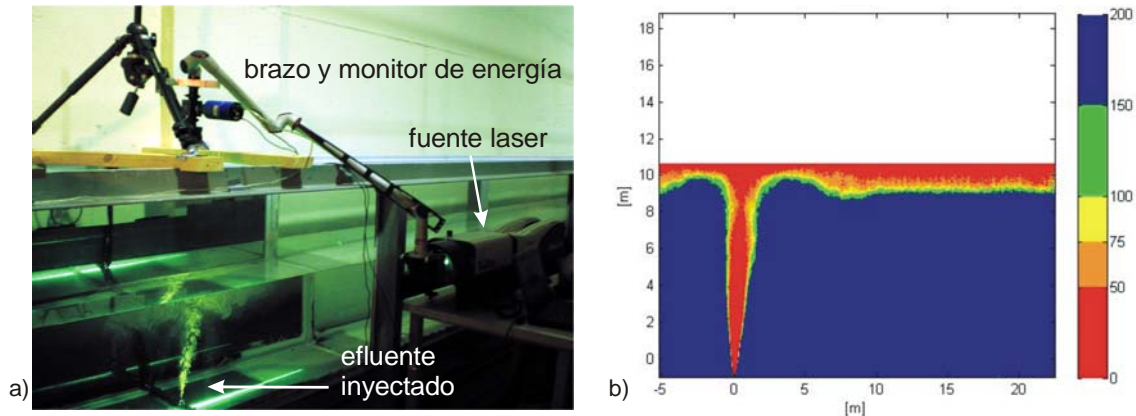


Figura 3.10. a) Ejemplo de un experimento de LIF en un modelo físico de un emisario submarino realizado por el GEAMA en el CITEEC y b) ejemplo de campo diluciones obtenidas.

Por último hay que señalar que en la actualidad, y con el auge de la modelización numérica, también se comienza a aplicar el término *visualización de flujo*, a aquellas técnicas relacionadas con la visualización de los resultados de los CFD.

3.3. VELOCIMETRÍA PIV

3.3.1. Introducción: Fundamentos básicos

El montaje experimental de un equipo de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) puede verse en la Figura 3.11. La base de la técnica consiste en introducir en el medio fluido un plano de luz láser e iluminar con él las partículas en suspensión del mismo, ya sean éstas introducidas artificialmente o no.

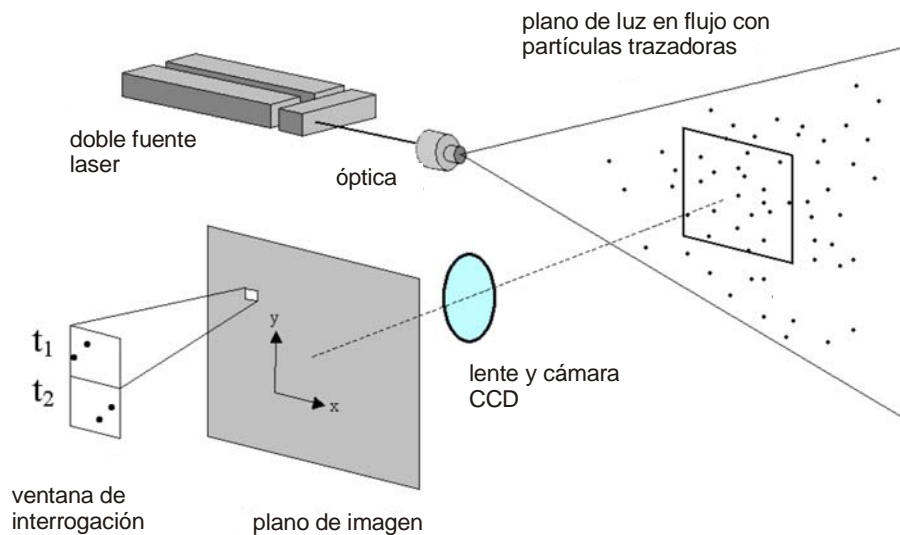


Figura 3.11 Esquema básico de funcionamiento de las técnicas PIV (LaVision, 2002)

El haz láser emite dos pulsos de duración muy breve (varios nanosegundos) y una o varias cámaras de video digital captan dos imágenes muy próximas en el tiempo. La variación de la

posición en ese tiempo de las partículas en suspensión entre las dos imágenes aproxima con mucha precisión el campo de velocidades del fluido. El software del sistema utiliza técnicas de correlación estadística para localizar las partículas y seguir su movimiento.

El sistema consta por tanto de varias partes que se describen a continuación, una fuente de luz láser, una o varias cámaras y un software de proceso de imágenes. La mayor parte de los equipos de PIV actuales utilizan fuentes láser de Nd:YAG pulsadas, capaces de concentrar su energía en varios nanosegundos y de ese modo ‘congelar’ el movimiento de las partículas en las imágenes que obtienen las cámaras.

Los equipos digitales de PIV toman sus imágenes con cámaras CCD, de modo que éstas se almacenan inmediatamente en el ordenador sin necesidad de un revelado y digitalizado posterior. Estas cámaras son capaces de tomar dos imágenes separadas por un intervalo de tiempo muy breve, para luego transferirlas al ordenador que controla el proceso, tanto de forma individual o como secuencias para el estudio de un proceso en régimen transitorio.

El sistema se completa con un software de procesamiento de imágenes que separa en pequeñas partes el campo de imagen –ventanas de interrogación- y busca en ellas las partículas para evaluar su desplazamiento en el intervalo de tiempo elegido. Éste puede ajustarse en función de la velocidad media del flujo para que las partículas no salgan de la ventana de interrogación.

Si se toman dos imágenes consecutivas y se calcula la correlación cruzada entre ambas, la función tendrá un máximo que se corresponde con el valor del desplazamiento medio de las partículas (si éstas se mueven de un modo aproximadamente uniforme). Esta idea se esquematiza en la Figura 3.12.

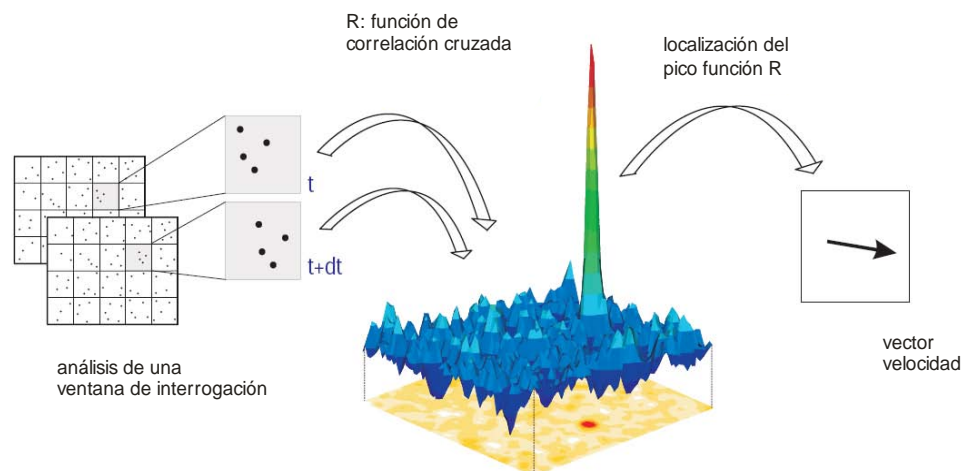


Figura 3.12 Esquema de obtención del campo de velocidades con PIV (LaVision, 2007a)

Para obtener los campos de velocidades en unidades del modelo, es necesario realizar un proceso de calibración. Éste consiste en introducir una plantilla en el medio fluido que el software del equipo reconoce. De este modo se establece la *magnificación*, que relaciona las unidades en la imagen, en píxeles, con las unidades reales, en metros. El resultado de este proceso es la obtención de campos vectoriales como los de la figura siguiente, donde se presenta el campo de velocidades obtenido en el ejemplo de la Figura 3.13.

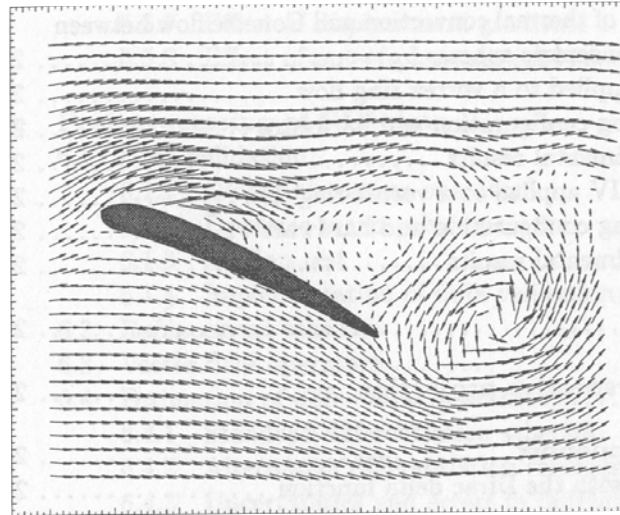


Figura 3.13 Campo de velocidades correspondiente a la Figura 3.3 (Raffel et al., 2007).

Hay que señalar que la densidad de partículas existentes en el campo de la imagen condiciona su forma de análisis. De este modo, se pueden distinguir tres técnicas de tratamiento bien diferenciadas (Raffel et al, 2007):

- a) *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) o *low-image-density PIV*. Con densidades bajas de partículas, como las de la Figura 3.14 (a), se requieren técnicas de trazado de partículas individuales, para después interpolar o extrapolar los resultados al resto del campo fluido. Esta herramienta se puede utilizar para comparar los resultados experimentales con los numéricos obtenidos en una malla regular o adaptativa.
- b) *Particle Image Velocimetry* (PIV). Esta técnica es aplicable a fluidos con densidades medias de partículas (ver Figura 3.14 (b)), que permiten la separación del campo en pequeñas ventanas de interrogación con la garantía de encontrar en ellas suficiente número de partículas para su trazado por correlación estadística. En estas situaciones no se pueden aplicar procedimientos de búsqueda individual de partículas porque el desplazamiento de las partículas es mayor que la separación media entre las mismas. Como se ha comentado, esta técnica se conoce como *high-image-density PIV*, o PIV a secas.

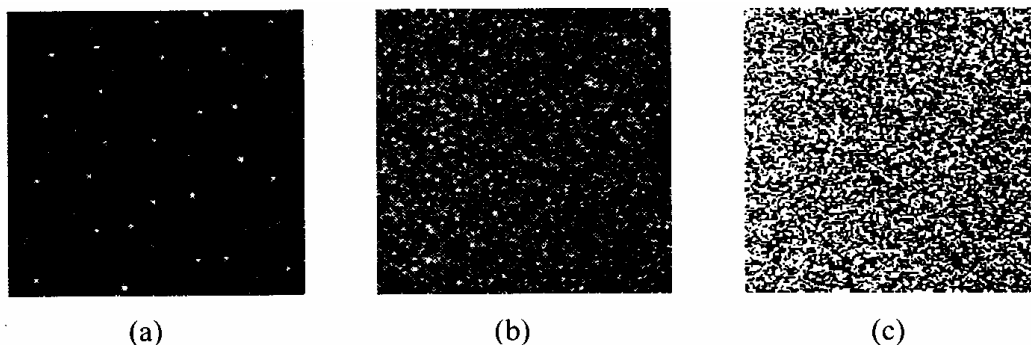


Figura 3.14 Diferentes densidades de partículas para PTV (a), PIB (b) y LSV (c), (Raffel et al., 1998).

- c) *Láser Speckle Velocimetry* o *Speckle Interferometry*. Con densidades elevadas la reflexión de la luz en las propias partículas hace que éstas puedan confundirse formando una imagen moteada, no siendo posible detectar partículas individuales

Los programas de software actuales suelen permitir las dos primeras posibilidades con el mismo equipo físico, variando únicamente el tratamiento matemático de las imágenes. Los equipos modernos de grabación de imagen y las técnicas actuales de determinación de picos de intensidad hacen que sea posible detectar cada vez mayores densidades de partículas, con lo cual la tercera de las opciones tiende a desaparecer.

En los equipos actuales es habitual disponer del orden de $\sim 10^3$ - 10^5 vectores de velocidad por cada imagen analizada (dependiendo de la resolución de la cámara y el tamaño de las ventanas de interrogación), con una precisión media en el entorno del 1% (Stanislas *et al.*, 2005).

Además de la no intrusividad, una de las principales ventajas de la técnica PIV es que permite determinar el campo de velocidades completo en un plano. Como se posee información de todo el campo, es posible determinar además de las componentes de la velocidad otras magnitudes derivadas como los gradientes de velocidad o la vorticidad en la dirección perpendicular al plano de medida. A partir del análisis de los campos de velocidad instantáneo y de estas magnitudes derivadas es posible estudiar el comportamiento de las estructuras coherentes del flujo (Adrian *et al.*, 2000; Perry y Chong, 2000; Vollmers, 2001).

3.3.2. Principales tipologías y aplicaciones

Con el esquema mostrado en el apartado anterior, la técnica PIV se puede emplear para determinar las componentes de la velocidad en un plano. Existen sin embargo, otras variantes que permiten ampliar el rango de aplicación de este dispositivo. En este apartado, se describirán las principales tipologías de los equipos PIV actuales así como sus principales ámbitos de aplicación.

En primer lugar hay que señalar que el origen de la técnica PIV se remonta a principios de los años 80. En esta época, en los trabajos sobre Laser Speckle Velocimetry de R. Meynart del Von Kármán Institute (Bruselas), aparecían fotografías con partículas individuales en el flujo. La importancia de las imágenes de partículas, y su utilidad para trazar las velocidades del flujo comenzó a partir de entonces a ponerse de relieve. Se puede indicar que la primera referencia a la técnica PIV que se puede encontrar en la literatura es de 1984 (Adrian, 2005).

Sin lugar a dudas, el desarrollo de la fotografía y grabación de video digital, y las técnicas de procesado de imágenes con equipos informáticos, permitió el desarrollo de este nuevo método que permitía la descripción cuantitativa de un campo de velocidades instantáneo (Adrian, 1991).

Tras estos 25 años, la técnica PIV está sumamente extendida en los estudios de flujos de agua y aire, y su campo de aplicación crece de una forma exponencial con el paso del tiempo. La primera mejora sustancial del esquema inicial, o PIV 2D, consistió en el empleo de 2 cámaras para así obtener una visión estereoscópica del flujo que permitía determinar la componente de la velocidad en la dirección perpendicular al plano iluminado por el láser (p.ej. Willert, 1997). Esta técnica se denomina PIV estereoscópico, SPIV, o también PIV2D-3C (haciendo referencia a que se obtienen las tres componentes de la velocidad en un único plano).

No es el objetivo de esta tesis realizar una descripción de los fundamentos del SPIV, o del resto de técnicas que se expondrán a continuación. Una descripción general de las mismas se puede consultar en el gran libro de Raffel *et al.*, (2007) o en los apuntes de los cursos especializados que se desarrollan en el Instituto Aeroespacial Alemán (DLR) o en el Instituto Von Kármán.

La extensión de la tecnología PIV para la determinación de la velocidad en dominios tridimensionales se ha acometido de varias formas. Una técnica, denominada *Multi Plane Stereoscopic PIV (MPS PIV)*, emplea 4 cámaras y un sistema de 4 fuentes láser que permiten determinar las velocidades en dos planos paralelos de modo un simultáneo (Kähler, 2004). Otros esquemas permiten determinar la velocidad en varios planos de un modo secuencial.

En estos equipos, un espejo rotatorio sobre el que incide el haz láser, hace que este vaya modificando su posición y describa un movimiento en el que haciendo secciones transversales o longitudinales del fenómeno estudiado. En la literatura aparece referenciado como *scanning PIV*. Esta técnica para mover el plano de luz ha sido aplicada p.ej. por Tian (2002) en sus experimentos de (cuasi) 3D LIF sobre el proceso de mezcla del campo cercano de emisarios submarinos en modelo físico.

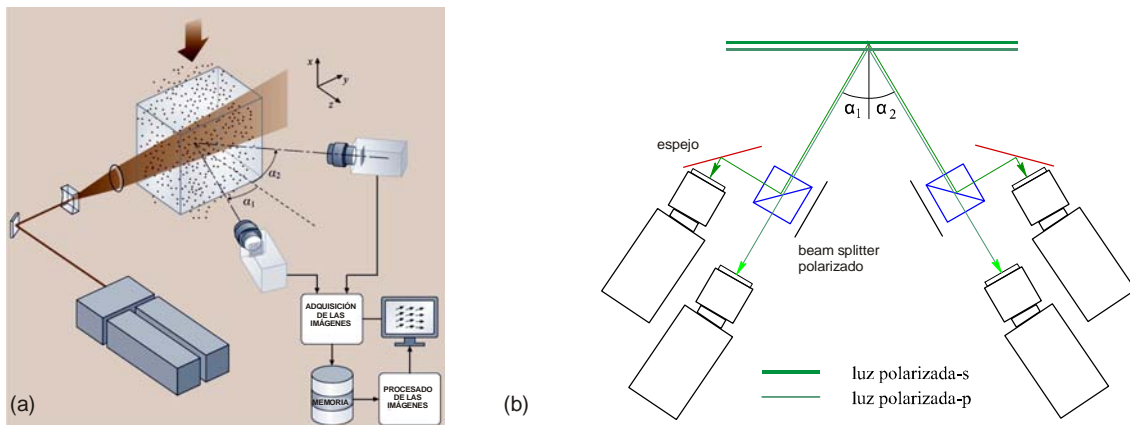


Figura 3.15. (a) Esquema de un equipo SPIV (adaptado de McKeon *et al.*, 2007) y (b) Esquema de un sistema multi-plano con 4 cámaras que registran dos planos paralelos separados pocos milímetros con una configuración estereoscópica. Para que el sistema pueda funcionar, la polarización de los planos es diferente y dos beam-splitter especiales dividen la imagen para cada dos grupos de cámaras en función de la polarización de la luz (ver detalles en el tesis de Kähler, 2004)

La medida simultánea del campo tridimensional de velocidades en un volumen de interrogación no se ha conseguido hasta el desarrollo de la Tomografía PIV (T-PIV). Esta tecnología requiere del empleo de 4 cámaras (para un correcto funcionamiento) que se enfocan hacia un volumen de control de poco tamaño (de unos $5 \times 5 \times 1.5 \text{ cm}^3$). Para la reconstrucción del campo de intensidades de luz se aplica un algoritmo específico que da el nombre a la técnica (Geisler, 2007).

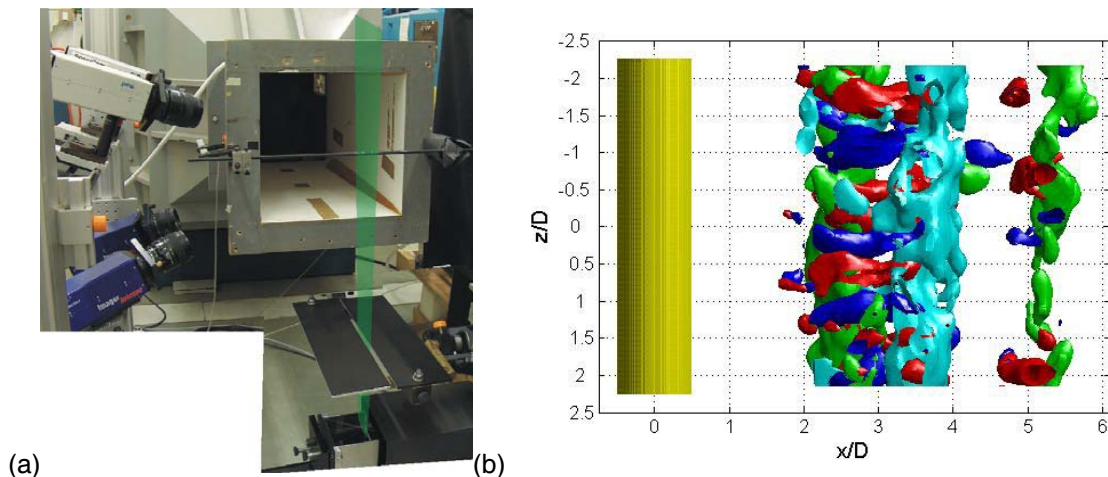


Figura 3.16. (a) Montaje experimental en el túnel de viento y (b) ejemplo del campo de vorticidades formado en la estela de un cilindro de 8 mm de diámetro (Elsinga, 2008).

Las primeras aplicaciones de esta nueva herramienta se pueden encontrar p.ej en la tesis doctoral de Elsinga (2008). A modo de ejemplo se recoge en la Figura 3.16 un montaje experimental con 4 cámaras en un túnel de viento en el que esta autora ha analizado el patrón de vórtices formado en la estela originada tras un cilindro. Un trabajo similar en un túnel de agua ha sido presentado por Scarano y Poelma (2009).

En la actualidad, los factores más limitantes de la técnica son el pequeño tamaño del volumen de medida, la necesidad de un láser hasta cinco veces más potente que un láser de SPIV, el tiempo asociado a la evaluación de la imagen (que puede llegar al orden de una hora para una única imagen) y la capacidad de almacenamiento, que es hasta 10 veces mayor que para un sistema de PIV convencional (Raffel *et al.*, 2007).

Otro ámbito en el que también han mejorado los sistemas PIV ha sido en la capacidad de éstos de adquirir imágenes con mayor frecuencia temporal. En las primeras soluciones comerciales, los equipos no eran capaces de capturar más de un par de imágenes por segundo. Las mejoras en los equipos de grabación (ver §3.3.3.4) y la utilización nuevas fuentes láser, permiten en la actualidad resolver algunos flujos con a frecuencias del orden del KHz. Este tipo de equipos se denominan habitualmente *High Speed PIV* (HS-PIV) o *Time Resolved PIV* (TR-PIV).

El PIV también comienza a aplicarse en fluidos a escala microscópica. Este tipo de flujos tiene interés en algunos procesos industriales, en la industria aeroespacial y también en la industria biomédica. La fundamentos de la técnica microPIV (μ PIV) son similares a los de la PIV convencional aunque existen algunas diferencias entre ambos métodos. Las principales diferencias están originadas en los patrones de difracción de las partículas, en el movimiento de las mismas que en muchas ocasiones es de tipo Browniano, y en el espesor del plano láser, que en este tipo de aplicaciones en varios órdenes de magnitud mayor que el plano enfocado por el microscopio (Raffel *et al.*, 2007).

Una revisión reciente del estado del arte de las investigaciones que emplean la técnica PIV en una gran variedad de campos de aplicación se puede encontrar en Schröder y Willer (2008). En este libro se puede encontrar un resumen de los principales resultados de la red PIVNET 2, desarrollada a partir del proyecto Europeo "A European collaboration on development, quality

assessment, and standarization of Particle Image Velocimetry for industrial applications". En las actividades de esta red, se han desarrollado aplicaciones tan diversas como:

- μ PIV y aplicaciones en microsistemas
- Flujos bio-médicos
- 3D-PIV
- Desarrollos específicos no comerciales
- Comparación y validación con CFD
- Turbo-maquinaria
- Combustión interna
- Aplicaciones en la industria del automóvil
- Aerodinámica
- Flujos supersónicos
- Aplicaciones navales

Algunos ejemplos de otras aplicaciones no recogidas en este texto son las investigaciones aplicadas en el campo de la ingeniería hidráulica y ambiental. A modo de ejemplo se pueden citar trabajos en el campo de la ingeniería marítima y portuaria (p.ej. Jung *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2005), en el estudio del transporte de sedimentos y fenómenos de erosión local (p.ej. Hill y Younkin, 2006; Radice *et al.*, 2006), o en la determinación de las velocidades de la superficie del agua en flujos en ríos o canales (p.ej. Weitbrecht *et al.*, 2002), técnica conocida como *Large scale PIV* (LPIV), o incluso algunos desarrollos propios que permiten sumergir un pequeño equipo PIV portátil en un flujo natural como un río o un estuario (Underwater Miniaturized PIV, ver p.ej. Tritico *et al.*, 2007; Liao y Botsma, 2009), ver Figura 3.17.

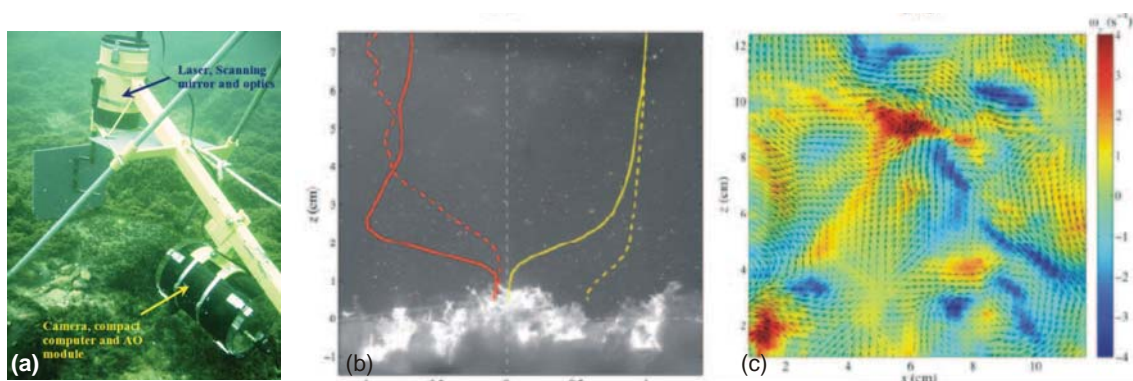


Figura 3.17. Ejemplo de aplicación de la técnica UM-PIV en el lago Michigan (a) Ubicación del equipo sobre un lecho cubierto de un tipo de mejillón de la zona; (b) imagen con el perfil de velocidades y concentraciones de partículas (en amarillo continuo y discontinuo respectivamente), y el perfil de tensiones de Reynolds y flujo turbulento de partículas (en rojo continuo y discontinuo respectivamente); (c) velocidad instantánea sin la componente de velocidad media sobre un mapa de vorticidades (Liao y Botsma, 2009).

Otros campos en el que se está aplicando recientemente las técnicas PIV o μ PIV es en la determinación de los campos de velocidades en el entorno de animales vivos (ver Figura 3.18) o en el interior de los mismos.

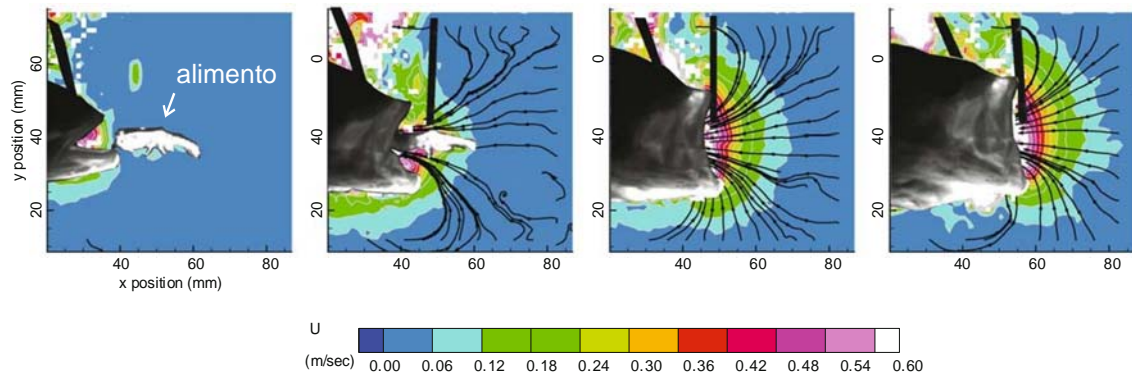


Figura 3.18. Campo de velocidades producido durante la alimentación de un róbalo (Day et al., 2007)

Algunas aplicaciones han permitido determinar el campo de velocidades y la estructura del flujo formada tras mecanismos que simulan el movimiento de insectos o peces (Poelma et al., 2006; Brücker y Bleckman, 2007), y también con organismos vivos como murciélagos (Hedenström et al., 2007; Hedenström et al., 2009; Hubel et al., 2009) o peces (Day et al., 2007; Lauder y Madden, 2007).

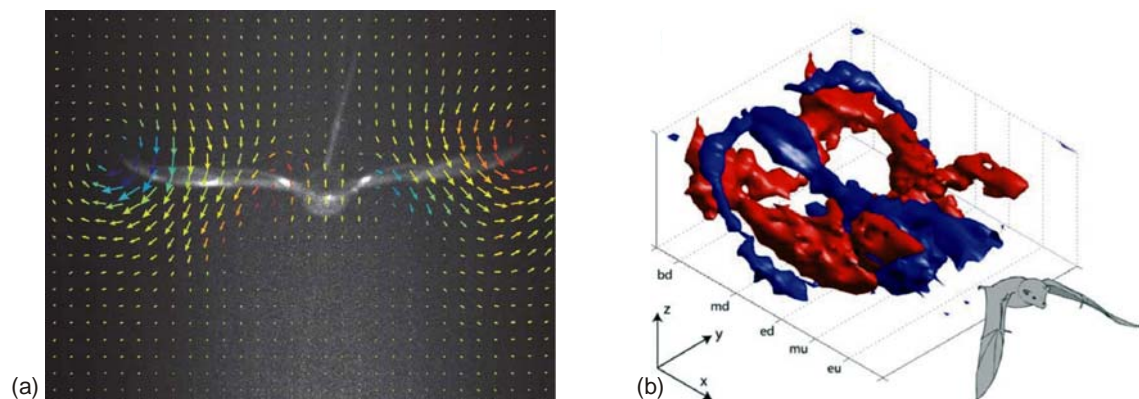


Figura 3.19. Determinación con SPIV del patrón de velocidades tras el aleteo de un murciélago, ver detalles en (a) (Hedenström et al., 2007) y (b) (Hedenström et al., 2009).

A nivel microscópico, se pueden citar los trabajos de Poelma en los que se han analizado el flujo y las tensiones tangenciales en los conductos vitelinos o en el corazón de un embrión de pollo (Poelma et al., 2008; Poelma et al., 2009).

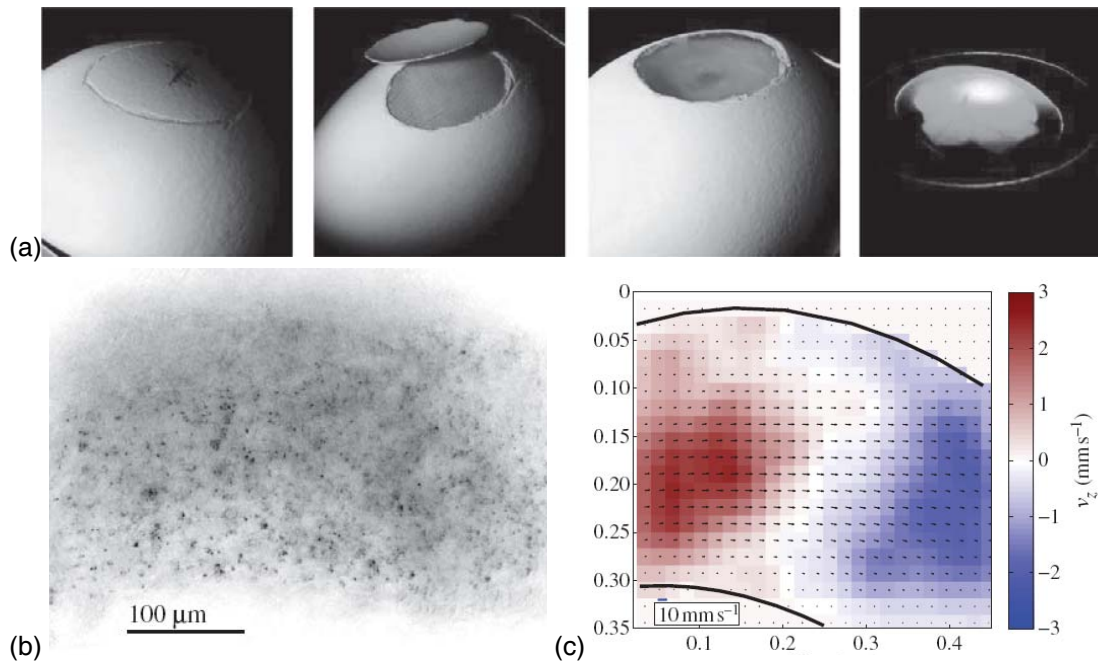


Figura 3.20. Determinación de las velocidades y tensiones tangenciales en el sistema cardiovascular de un embrión de pollo (a) preparación del huevo para realizar las medidas con la técnica μ PIV; (b) ejemplo de imagen en el conducto de unas $\sim 300\mu$ de diámetro y (c) campo de velocidades (Poelma et al., 2009)

3.3.3. Fundamentos físicos y tecnológicos

3.3.3.1. Partículas trazadoras

El método PIV, en contraposición a otras medidas de la velocidad que la determinan a partir de ciertas propiedades físicas del medio, está basado directamente en la medición del espacio y el tiempo. Se trata de una técnica indirecta al medir la velocidad de las partículas en lugar de la del fluido, por lo que la concordancia de ambas deberá ser comprobada.

Por tanto, las propiedades fundamentales de las partículas empleadas en esta técnica son las siguientes (Poelma y Westerweel, 2007): (i) deben ser suficientemente pequeñas para seguir las trayectorias del flujo, (ii) deben ser suficientemente grandes para poder ser visualizadas, (iii) deben estar homogéneamente distribuidas y, (iv) no deben alterar las ni propiedades del fluido ni del flujo.

Una primera fuente de error en esta técnica aparece cuando las densidades del medio y las partículas no coinciden. De este modo, las fuerzas gravitatorias que afectan a las partículas inducen una componente ascensional en las mismas que perturba los resultados. La determinación de esta velocidad de sedimentación no es nada trivial ya que ésta depende de factores como la velocidad y nivel de turbulencia presente en el flujo analizado, régimen de caída de la partícula, y de su forma y/o tamaño.

Una estimación de la velocidad de sedimentación (w_s) se puede realizar a partir de la ley de Stokes, válida para partículas esféricas y bajos números de Reynolds de sedimentación. Bajo estas premisas:

$$w_s = d_p^2 \cdot \frac{\rho_p - \rho_w}{18\mu} \cdot g \quad (3.1)$$

donde w_s es la velocidad de sedimentación, d_p es el diámetro de la partícula trazadora, μ es la viscosidad dinámica del fluido, ρ_p y ρ_w representan la densidad de las partículas y del fluido respectivamente, y g es la aceleración de la gravedad.

Haciendo una analogía con la ecuación anterior se puede estimar la diferencia entre la velocidad de las partículas U_p y del fluido cuando éste se mueve con una aceleración constante a , llegando a (Raffel *et al.*, 2007):

$$U_s = U_p - U = d_p^2 \cdot \frac{\rho_p - \rho}{18\mu} \cdot a \quad (3.2)$$

Si la aceleración del fluido no es constante o aparecen grandes velocidades, la ley de Stokes no se cumple y por tanto el movimiento de las partículas es mucho más difícil de determinar. El problema es mucho mayor en los estudios de flujo de aire, al ser mucho menor la viscosidad cinemática y debido a que las partículas pueden cambiar de diámetro al ser transportados por la corriente de aire (Raffel *et al.*, 2007).

En cualquier caso se deberá encontrar un compromiso a la hora de decidir el diámetro de las partículas ya que, si este es muy pequeño, y como se expondrá a continuación, se verá comprometida la dispersión de la luz y la toma de imágenes de las partículas. Por otra parte, si el diámetro es muy grande, los dos términos de error anteriores harán la medida poco exacta.

El otro factor que se ha introducido en el análisis es la luz dispersada por parte de las partículas, puesto que es ésta la que impresiona el medio fotográfico (digital o no) para tomar las imágenes. En muchas ocasiones será más importante realizar una adecuada selección de las partículas para elevar la potencia de luz dispersada, y por tanto la definición de éstas en la imagen, que el proceso de elevar la potencia del láser.

La potencia de luz dispersada depende fundamentalmente de la relación entre el índice de refracción del material de las partículas frente al medio fluido, así como del ángulo de polarización y observación.

Para partículas esféricas con diámetro mayor que la longitud de onda de luz (532 nm en los láser Nd:YAG empleados en PIV, §3.3.3.2) puede aplicarse la teoría de Mie de la dispersión. Según esta teoría, la dispersión de la luz en torno a las partículas se produce según unos patrones característicos como los representados en la Figura 3.21. En la figura la luz impacta en la partícula de izquierda a derecha. Se puede observar como la intensidad depende fuertemente del ángulo de observación.

El ángulo empleado con mayor frecuencia en los montajes experimentales es el de 90° (la cámara se sitúa en perpendicular al flujo). Este ángulo se encuentra lejos del óptimo que es 180°. Sin embargo, de estos diagramas puede extraerse otra conclusión para optimizar la potencia de luz, ya que no sólo el tamaño de las partículas la condiciona, sino también la cantidad de éstas. Para grandes densidades de partículas, la luz dispersada a 180° se mantiene en el plano iluminando las partículas adyacentes sin perderse en partículas situadas en planos fuera del campo de visión (Sánchez-Tembleque, 2002).

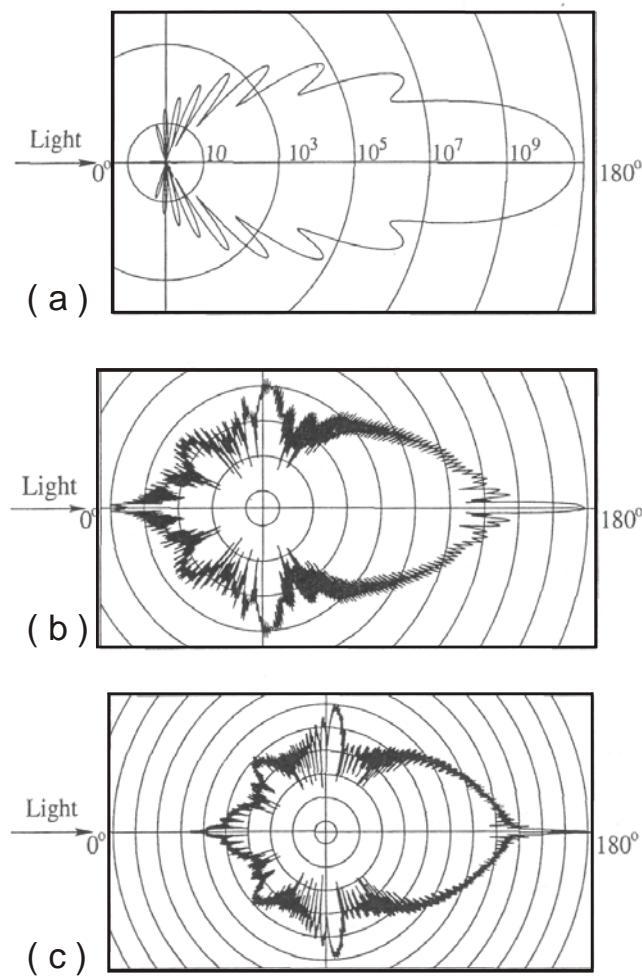


Figura 3.21 *Dispersión de la luz entorno a partículas de vidrio de varios tamaños en agua: (a) 1 μm , (b) 10 μm y (c) 30 μm . La intensidad de la luz dispersada se representa en escala logarítmica. Los círculos concéntricos representan una diferencia de 100 unidades de intensidad (Raffel et al, 2007).*

3.3.3.2. Fuentes de luz. El láser Nd:YAG

Como la base de la técnica PIV radica en la observación de las partículas que están presentes en el flujo, es necesario disponer una fuente de luz que ilumine la escena durante un corto intervalo de tiempo δ_t . Un criterio práctico es escoger la duración máxima que permita observar las partículas como puntos circulares y no como elipses o filamentos alargados. La segunda característica de la fuente de luz es que debe formar un plano luminoso de potencia suficiente para que la luz dispersada por las partículas contenidas en el plano sea captada por el sistema de grabación de imágenes (McKeon et al., 2007).

La cantidad de energía requerida E es proporcional a la longitud de la zona a iluminar. McKeon et al., (2007) señalan que unos 100 mJ son capaces de iluminar una zona de 10 cm en un flujo de aire y unos 20 cm en un flujo de agua. Además, también indican que el espesor del plano debe ser del orden del 1% de las dimensiones de la zona iluminada.

Las fuentes láser son el sistema de iluminación más empleado en los equipos PIV porque son capaces de emitir una luz pulsada monocromática con una alta energía. Los láser empleados son de estado sólido de tipo Nd:YAG⁴⁸, que típicamente proporcionan un pulso de entre ~10 mJ y un ~1 J, de una duración comprendida entre ~5 y ~15 ns. El láser del sistema PIV disponible en las instalaciones del CITEEC-ETSECCP es de este tipo.

La longitud de onda fundamental del cristal Nd:YAG, ultravioleta de 1064 nm, es doblada a luz visible verde de 532 nm en un cristal especial denominado doblador. La máxima potencia que atraviesa el cristal se produce cuando el haz incidente está alineado con la estructura de red del cristal, por lo que girándolo se puede ‘sintonizar’, modificando la potencia de salida a la conveniencia de cada caso.

La arquitectura estándar de los equipos PIV está formada por dos fuentes láser de iguales características de forma que la separación entre disparos se puede ajustar de un modo muy sencillo. La separación entre los disparos dependerá de la magnificación de la imagen y de la velocidad del fluido.

Los haces de las dos fuentes gemelas se alinean en un espejo semitransparente para después pasar por el cristal doblador. A la salida se disponen dos espejos dicróicos, cuya propiedad principal es reflejar únicamente una longitud de onda, enviando el resto a un sumidero con un dissipador de calor (Figura 3.22). En el proceso de emisión estimulada los dos fotones producidos tienen la misma longitud de onda y la misma fase. Este hecho unido a la forma de producir luz con dos espejos perfectamente alineados hace que la luz láser sea monocromática, coherente (con todos los haces en fase) y fuertemente direccional o *colimada* (Sánchez-Tembleque, 2002).

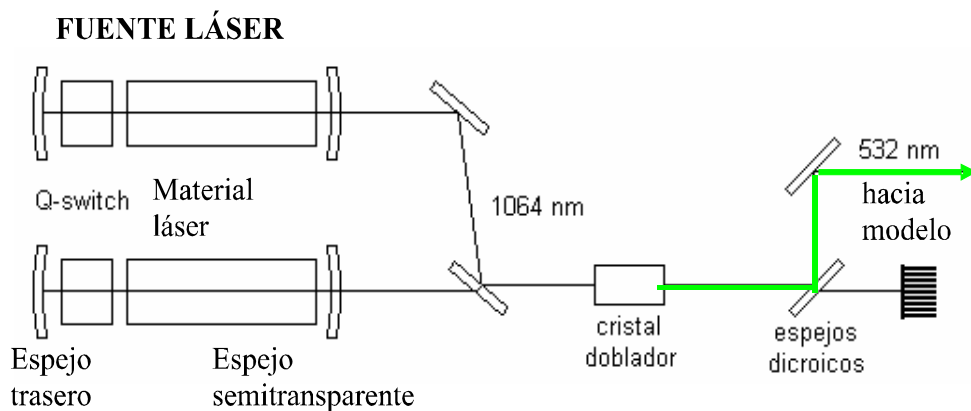


Figura 3.22 Esquema de operación de un equipo PIV con dos fuentes de luz gemelas (adaptado de Sánchez-Tembleque, 2002).

⁴⁸ Nd:YAG: Neodymium Yttrium Aluminum Garnett. En estos sistemas el haz de luz es generado por iones Nd⁺³ en una matriz de itrio y aluminio formando un semiconductor. Esta matriz está contenida en una cavidad cilíndrica de sección elíptica en la que unas fuentes de luz blanca (*flash lamps*), bombean la energía necesaria para producir la resonancia. Para que la resonancia se produzca, la cavidad cuenta en sus extremos con dos espejos, uno de ellos semitransparente, que se corresponde con el foco de emisión del haz láser. En el interior de la cavidad también se introduce un cristal (*Q-switch*) que puede permitir o cortar el paso de luz, de modo que la cavidad sea resonante o no. El tiempo de apertura y la sincronización de la misma con la fuente de luz permiten controlar la duración y energía del pulso de luz, congelando así el movimiento de las partículas. Una descripción más detallada de los sistemas láser se puede encontrar en Sánchez-Tembleque (2002) y en Raffel *et al.*, (2007).

El principal problema de las fuentes láser Nd:YAG es su baja frecuencia de repetición, que está comprendida entre los 10 y los 50 Hz. Este ratio de repetición limita la frecuencia de adquisición de imágenes y el tipo de flujos que pueden resolverse completamente es de baja velocidad (<0.2 m/s, McKeon *et al.*, 2007). Por este motivo, en los sistemas de alta velocidad o *Time Resolved PIV* (§3.3.2) se emplean fuentes láser Nd:YLF (*Neodymium Yttrium Lithium Fluoride*), que pueden trabajar con ratios de repetición de hasta ~ 10 kHz, aunque con densidades de energía menores: ~ 10 -40 mJ (Raffel *et al.*, 2007).

3.3.3.3. Formación del plano de luz

El haz láser producido por las fuentes mostradas de Nd:YAG tiene forma aproximadamente cilíndrica. En el caso del PIV disponible en las instalaciones de la UDC el diámetros es del orden de los 7 mm de diámetro (§3.1).

Para producir un plano será necesario disponer una serie de lentes que lo estrecharán en un sentido y lo ampliarán en forma de abanico en el otro. Existen varias combinaciones de lentes para producir este efecto (ver p.ej. Raffel *et al.*, 2007), aunque sólo se presentará una de ellas a modo de ejemplo (Figura 3.23 (a)). En este caso se emplea una lente cilíndrica para formar el plano de luz combinada con dos de tipo teleobjetivo (dos lentes esféricas, una divergente y otra convergente). La distancia entre la lente cilíndrica y la lente convergente es variable, y de este modo la lente puede enfocarse para que la mínima anchura del plano (*beam waist*) coincida en el lugar deseado (Figura 3.23 (b)).

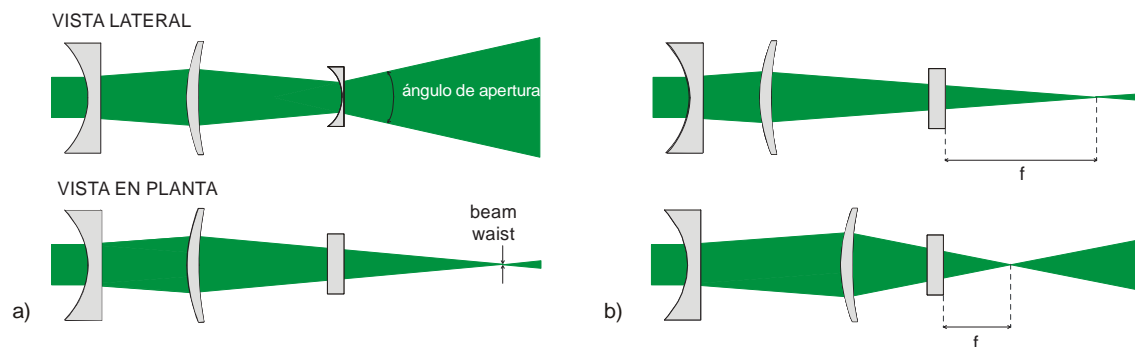


Figura 3.23 a) Vista lateral y superior de la óptica para producir un plano de luz a partir de un haz de luz y b) el ajuste de la distancia entre la lente cilíndrica y la esférica permite ajustar la posición del plano de espesor mínimo o *beam waist* (LaVision, 2007b)

Para minimizar la variación de energía y espesor del plano de luz es conveniente realizar un buen ajuste del sistema óptico de forma que el *beam waist* coincida más allá de la zona de análisis, ya que en el entorno del mismo es donde se producen mayores fluctuaciones de energía y del espesor del plano. De este modo se reducirán los problemas con las partículas que se salen del plano y que reducen la precisión del método (§3.3.4.1). Esto es especialmente importante cuando se realizan medidas con PIV estereoscópico, con fuertes componentes de la velocidad en la dirección normal al plano láser (McKeon *et al.*, 2007).

3.3.3.4. Adquisición digital de imágenes

El desarrollo reciente de dispositivos capaces de registrar imágenes directamente sobre un soporte digital ha evolucionado el campo de la fotografía y el video en todas sus facetas. Lo mismo ha sucedido con la técnica PIV.

Los dispositivos empleados en los equipos PIV estándar son sistemas de tipo CCD (*charged coupled device*). Básicamente un CCD es un dispositivo que transforma la luz en energía eléctrica. Cuando se habla de un sensor CCD se hace referencia a la matriz de sensores individuales, que no son más que los píxels. Por tanto, cada uno de los sensores individuales del CCD recoge la información impresa en cada píxel de la imagen. El tamaño habitual de los sensores es de $\sim 8 \times 8 \mu\text{m}$.

En los equipos PIV de alta velocidad los sensores CCD se sustituyen por otro tipo de tecnología denominada CMOS. Esta tecnología es capaz de transferir la información recogida en el sensor de un modo mucho más veloz que la arquitectura CCD. El tamaño habitual de los sensores es de $\sim 20 \times 20 \mu\text{m}$.

A pesar de la mayor velocidad de adquisición de los sistemas CMOS, estos cuentan con una serie de inconvenientes que limitan su aplicabilidad a todos los campos de trabajo. Así, el mayor tamaño físico de los píxels, puede provocar la aparición de un efecto indeseable en la estimación de las velocidades (*pixel locking*, §3.3.4.2). Estos dispositivos tienen menor calidad e imagen que los CCD y menor sensibilidad (necesitan más luz). Además, la respuesta del sensor no es del todo lineal (Hain *et al.*, 2007).

No es objeto de este trabajo analizar de un modo pormenorizado el funcionamiento de estas tecnologías. Una descripción detallada de los diferentes esquemas de adquisición y transferencia de la imágenes, sincronización de los equipos y comparación de los dispositivos se puede consultar en la bibliografía (Willert, 2007a). En un plano más práctico, se puede consultar el reciente trabajo de Falchi y Romano (2009), que compara los momentos estadísticos de varios órdenes (medias, asimetría, kurtosis,..) en un chorro de agua circular medido con tecnología PIV (con una cámara CCD) y TR-PIV (con una cámara CMOS).

3.3.3.5. Formación de la imagen

Si en un extremo del sistema se sitúa la óptica que forma el plano láser, en el otro se tienen la óptica de la cámara que registra las imágenes. Como veremos a continuación, será necesario considerar los fenómenos ópticos en el proceso de formación de la imagen.

En la Figura 3.24 se presenta un esquema de la configuración óptica de un sistema PIV convencional. El plano de luz tiene un espesor Δz_0 que se supone homogéneo en la zona de análisis (Westerweel, 1997). Para que todas las partículas estén enfocadas, el espesor del plano debe ser inferior a la profundidad de campo δ_z ⁴⁹ (Adrian, 1991).

⁴⁹ La profundidad de campo se define como el espesor de la imagen real que se encuentra enfocada. Números grandes de apertura de diafragma D_n se corresponden con bajas profundidades de campo y viceversa, ver ecuación (3.6).

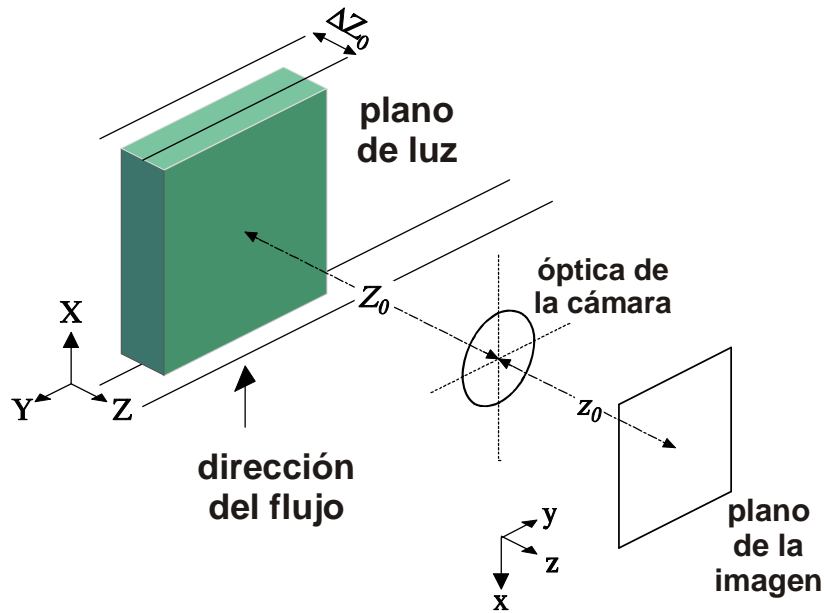


Figura 3.24. Esquema de la formación de la imagen en una configuración de PIV estándar (Westerweel, 1997). Las definiciones de los parámetros se pueden consultar en el texto.

Las partículas presentes en el flujo se transformarán en el plano de la imagen (el sensor CCD o CMOS) por medio de una lente circular sin aberraciones ópticas. La lente se caracterizará por su distancia focal f , el número de apertura $f^\#$ (que es el cociente entre la distancia focal y la apertura del diafragma f/D_a). Otro parámetro importante es la magnificación de la imagen M_0 , definida como el ratio entre la distancia del plano de la imagen a la lente z_0 y la distancia del plano del objeto real a la lente Z_0 :

$$M_0 = \frac{z_0}{Z_0} \quad (3.3)$$

El diámetro de las pequeñas partículas de tamaño real d_p en el plano de la imagen es d_τ , que se puede estimar como (Adrian, 1991):

$$d_\tau \cong \sqrt{M_0^2 d_p^2 + d_s^2} \quad (3.4)$$

donde $M_0 d_p$ es el tamaño geométrico de la partícula en la imagen y d_s es el diámetro máximo limitado por la difracción, que se calcula con la siguiente expresión en la que λ es la longitud de onda de la luz que provoca el fenómeno de la difracción:

$$d_s \cong 2.44(1 + M_0) f^\# \lambda \quad (3.5)$$

El diámetro de la partícula limitado por la difracción, *diffraction-limited spot diameter*, es un patrón de difracción formado cuando la luz de un foco puntual ($d_p \rightarrow 0$) se proyecta en un plano lejano, como el plano de la imagen ($M_0 \rightarrow 0$). En estas situaciones, la luz capturada por el objetivo es un patrón disperso sobre un pequeño punto conocido como *disco de Airy*. De la ecuación (3.5) se tiene que a menores aperturas corresponderá un mayor grado de difracción y una imagen mayor de la partícula, como puede verse en la Figura 3.25. Además, a efectos

prácticos, el patrón de difracción del disco de Airy se suele aproximar con una distribución normal Gausiana (ver p.ej. Cap 2. de Raffel *et al.*, 2007).

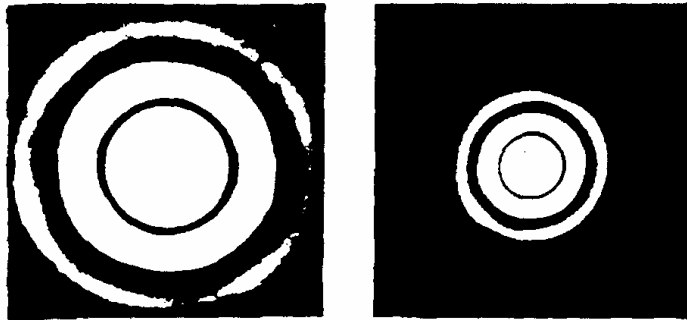


Figura 3.25 Discos de Airy para una menor (izquierda) o mayor (derecha) apertura de diafragma (Raffel *et al.*, 2007).

En una configuración tipo de PIV, el diámetro de la partícula en la imagen definido por la ecuación (3.4) está dominado por el efecto de la difracción, $d_\tau \approx d_s$, y es prácticamente independiente del tamaño real de las partículas (McKeon *et al.*, 2007). Para reducir los efectos de las aberraciones ópticas es recomendable emplear aperturas y distancias focales adecuadas para que el valor de $f^\#$ no sea muy bajo⁵⁰.

Para que el diámetro de la partícula siga la relación de la ecuación (3.4), esta debe estar enfocada. Como se ha comentado, para que esto ocurra, el espesor del plano de luz debería ser inferior a la profundidad de campo δ_z (Adrian, 1991):

$$\delta_z \cong 4 \left(1 + \frac{1}{M_0} \right)^2 f^{\#2} \lambda \quad (3.6)$$

Como es habitual trabajar con profundidades de campo reducidas, digamos del orden de pocos mm, y como además existe una fuerte relación entre el tamaño de las partículas y el error de las medidas, es muy importante enfocar correctamente el sistema.

Aunque se puede ajustar el enfoque de forma manual, observando la nitidez de la imagen en el monitor del equipo, los textos recientes indican otros métodos más objetivos para poder realizar esta operación. Por ejemplo, McKeon *et al.*, (2007), indican que una buena práctica puede ser evaluar el contraste de la imagen, definido con la desviación estándar del gris dividido por su valor medio. Este valor depende de la posición del plano focal. La posición óptima se encontrará cuando el contraste sea máximo.

3.3.3.6. Procesado digital de la imagen

Antes de comenzar a evaluar la imagen adquirida será necesario transformarla del dominio de la imagen (en pixels) al dominio del espacio (en metros). Este proceso se conoce como calibración y forma parte del montaje del experimento.

⁵⁰ Como se verá más adelante (§3.3.4.2), otros factores limitantes para definir el valor de $f^\#$ están relacionados con el tamaño de las partículas d_s .

Para calibrar las imágenes se suele introducir en la posición que ocupará el láser un patrón con una serie de marcas. Estas marcas pueden ser una retícula de cruces, como los de la Figura 3.26, o puntos equiespaciados cuando se trabaja con PIV 2D y SPIV. Para trabajar con PIV volumétrico, es necesario emplear patrones de calibración con marcas situadas a distintas alturas.

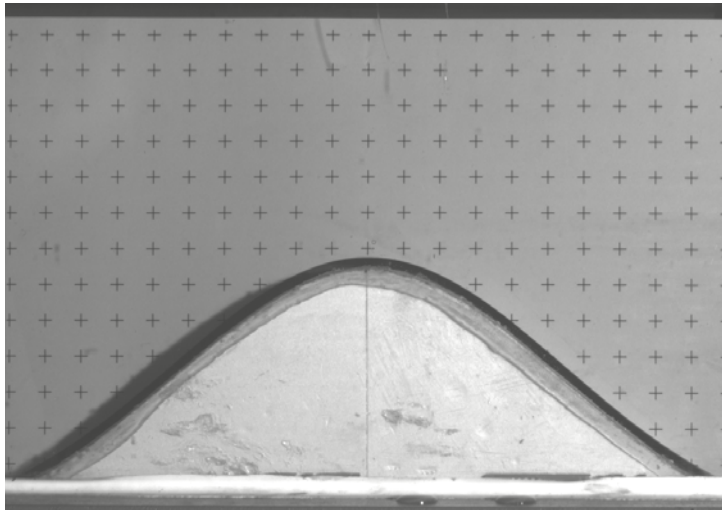


Figura 3.26 Patrón de calibración de malla de cruces equiespaciadas situada sobre un obstáculo submarino (Anta et al., 2007).

El primer método de calibración empleado en la técnica PIV ha sido un modelo de ajuste bilineal entre las coordenadas de la imagen y las de la realidad. Para ello, se suele emplear el método de los mínimos cuadrados para obtener los coeficientes de los polinomios de cuarto orden de la transformación.

La calibración en sistemas de PIV que proporcionan las tres componentes de la velocidad es mucho más compleja ya que pequeñas desviaciones del plano de medida con el plano de calibración (giros y traslaciones) se amplifican considerablemente⁵¹ (van Doorne y Westerweel, 2007). Otro factor que puede afectar a la precisión del método está relacionado el orden con el que se realizan los cálculos: p.ej. si primero se realiza la transformación de la imagen y después la evaluación con las técnicas de correlación o se emplea el procedimiento contrario (ver p.ej. Lin et al., 2008).

Por este motivo, en la actualidad suele recurrirse a otro tipo de transformaciones denominadas *pin-hole camera models*. Estas transformaciones intentan reproducir el comportamiento de un sistema óptico sin aberraciones y permiten determinar la posición geométrica real de la cámara en el modelo. Comparando la posición real con la predicha por estos modelos se puede conocer la bondad del ajuste (Willert, 2006, 2007b). En Raffel et al. (2008), se presenta un listado de recomendaciones para elegir el modelo de calibración así como para realizar el montaje experimental en configuraciones de PIV 2D-3C. El procedimiento de calibración y transformación de la imagen para el PIV 3D (tomográfico) difiere sustancialmente de los procedimientos de velocimetría plana. Una buena revisión de estos métodos se puede

⁵¹ van Doorne y Westeerwel (2007) realizaron medidas de PIV2D-3C en una sección transversal de una tubería. En este trabajo, los autores señalan que una traslación de ~ 0.3 mm en el plano de calibración provoca errores máximos en la determinación de la velocidad del orden del $\sim 5\%$.

encontrar o en Geisler (2007) en la tesis de Elinga (2008), disponible electrónicamente a través de la biblioteca de T.U. Delft.

Además del proceso de transformación de la imagen para dotar a esta de escala, y también eliminar problemas de perspectiva y reducir los efectos de las aberraciones ópticas, es cada vez más común utilizar otro grupo de funciones de transformación para mejorar la calidad de las imágenes.

Así, para que los métodos de correlación espacial empleados en la técnica PIV para determinar las velocidades funcionen correctamente se deben cumplir las siguientes hipótesis (Poelma y Westerweel, 2007):

- Las partículas trazadoras deben estar distribuidas homogéneamente
- Las partículas trazadoras deben describir la dirección del flujo
- El desplazamiento de las partículas debe ser homogéneo dentro de la ventana de interrogación

Sin embargo, es habitual que no se consiga el cumplimiento de las mismas. Por ejemplo, en flujos de alta velocidad o cerca de las paredes es habitual que el sembrado de partículas no sea homogéneo. Por problemas de alienación o de desgaste de las lámparas de flash, la iluminación en la imagen puede tampoco ser homogénea. Otras veces las diferencias en la iluminación de las imágenes son provocadas por las reflexiones del plano láser con el lecho por donde fluye el agua o sobre los contornos del modelo analizado. Cuando se analiza un plano longitudinal en un canal, las pequeñas ondulaciones de la lámina libre también provocan diferencias en la iluminación del plano de luz (Figura 3.27).

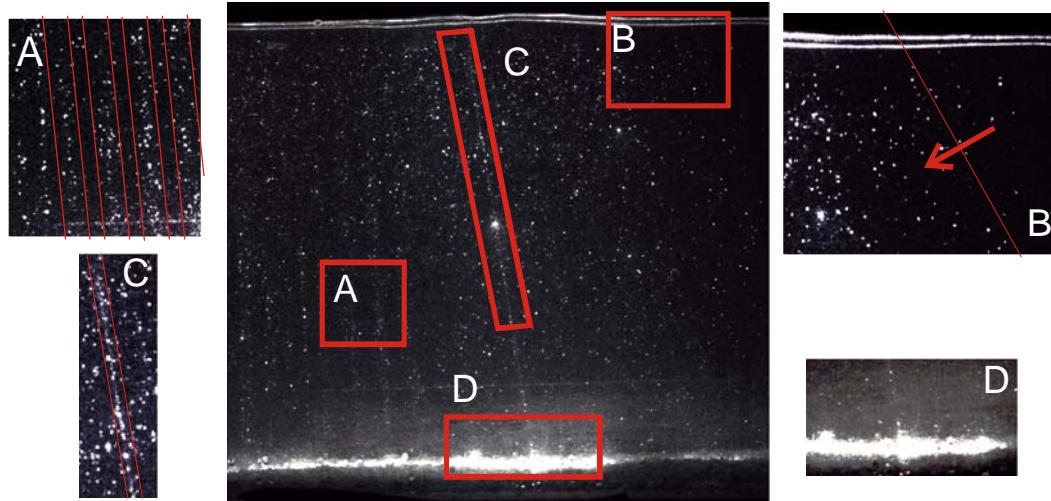


Figura 3.27. Representación de varios fenómenos habituales que se pueden registrar en imágenes de PIV real: (A) el efecto de la intensidad de luz en franjas inclinadas es producido por las perturbaciones de la lámina de agua; (B) diferencias en la iluminación originadas por la forma del plano de luz; (C) la línea de mayor intensidad está provocada por una pequeña imperfección en los cristales que guían al haz de luz; y (D) reflexión del plano láser sobre el lecho.

Una forma de compensar estos efectos no ideales es través de las herramientas de pre-procesado digital de la imagen que, de modo genérico, se pueden consultar en varios tratados recogidos en la literatura (ver p. ej. González *et al.*, 2009). En la descripción de la metodología

experimental de los ensayos realizada en el Capítulo 4, apartado 4.3.3, se presentarán una pequeña descripción de los filtros empleados para mejorar la calidad de las imágenes adquiridas en los ensayos realizados.

El preprocesado de imágenes tiene como objetivo incrementar la detección de vectores válidos obteniendo así campos vectoriales con mayor resolución, mayor SNR (Signal to Noise Ratio) y menor número de vectores espurios o erróneos. Este tipo de procedimientos se han mostrado muy efectivos en la reducción del ruido de fondo de la imagen, y en la mejora de la precisión y resolución espacial de la técnica PIV (Stanislas *et al.*, 2008).

3.3.4. Fundamentos de la evaluación de las imágenes

3.3.4.1. Fundamentos del análisis de correlación espacial

Las imágenes tomadas con PIV se dividirán en subáreas o *ventanas de interrogación* para su evaluación. Estas ventanas no tienen que coincidir en las dos imágenes. La parte del campo de visión que corresponde a cada una de ellas se denominará en adelante *ventana*, o siendo más correctos, *volumen de interrogación* o *voxel*⁵².

Como se ha comentado, con esta técnica se registran dos imágenes consecutivas, realmente con un intervalo de adquisición muy bajo entre ambas, que se analizarán a través de un análisis de correlación espacial. Para explicar este procedimiento, vamos a analizar lo que sucede en una ventana de interrogación como la de la Figura 3.28.

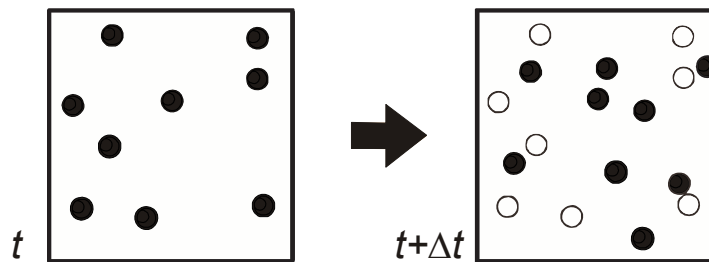


Figura 3.28. Ejemplo del campo de partículas en una ventana de interrogación. En el segundo frame se han superpuesto la posición de las partículas del primero.

Para una de las partículas del primer campo, cada una de las partículas del segundo campo o *frame* es una posible candidata a ser la primera partícula (ver partícula 1 en la Figura 3.29 (a)). La probabilidad de que la partícula 1 sea cualquiera de las del segundo frame es la misma, y se representa en el histograma de la Figura 3.29 (b). Si se analiza lo que pasa con el resto de partículas, y se suman los histogramas, se llega a la representación de la Figura 3.29 (c). En esta representación, el valor máximo del histograma representará el desplazamiento más probable de todas las partículas, si éstas se mueven de forma más o menos uniforme en la ventana de interrogación (McKeon *et al.*, 2007)

⁵² El voxel es la extensión del píxel a un espacio tridimensional.

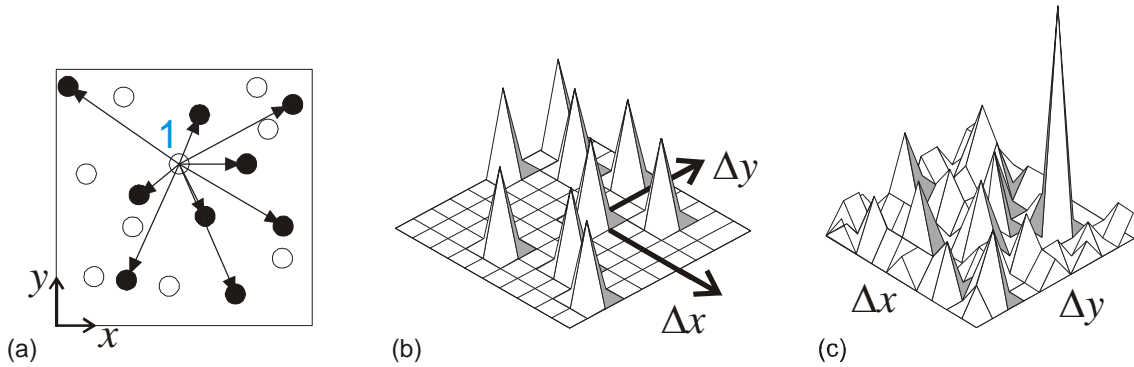


Figura 3.29. (a) Análisis para encontrar el desplazamiento más probable de la partícula centrada en el 1. En (b) se refleja el histograma de los desplazamientos posibles (Δx , Δy) de la partícula 1 y (c) se extiende el análisis a todas las partículas del segundo frame (adaptado de Poelma y Weesterwel, 2007).

El análisis estadístico para identificar el desplazamiento entre partículas más probable es equivalente a encontrar el desplazamiento con la función de correlación cruzada espacial $R(s)$ de las ventanas de interrogación $W_1(x)I_1(x)$ y $W_2(x)I_2(x)$:

$$R(s) = \int W_1(x)I_1(x)W_2(x+s)I_2(x+s) \quad (3.7)$$

donde $W_1(x)$ y $W_2(x)$ son funciones que determinan el dominio de la ventana de interrogación en cada imagen $I_1(x)$ e $I_2(x)$, respectivamente⁵³.

El análisis teórico de la aplicación de los algoritmos de correlación espacial a la técnica PIV se puede encontrar en Adrian (1988), aunque en este texto el desarrollo se centra en imágenes con doble exposición adquiridas con técnicas de fotografía convencional⁵⁴. Jerry Westerweel extendió esta teoría estadística a pares de imágenes consecutivas tomadas con técnicas digitales en los trabajos conducentes a realizar su tesis doctoral (Westerweel, 1993b). El desarrollo presentado en este apartado se basa en estos trabajos y algunos posteriores (Westerweel, 1997, 2000; Poelma y Westerweel, 2007).

Para entender el principio del análisis de correlación espacial es conveniente hacer una descomposición de las imágenes similar a la descomposición de Reynolds. Así, cada imagen $I_1(X)$ e $I_2(X)$, se podrán definir como la suma de su media de conjunto o *ensemble averaged* y una componente de fluctuación:

$$I_1(X) = \langle I_1 \rangle + I_1'(X) \quad (3.8)$$

⁵³ En el Capítulo 3 de Raffel *et al.* (2007) se puede encontrar un desarrollo matemático que describe las funciones $W(x)$, así como el procedimiento generalizado y las transformaciones necesarias para aplicar la correlación espacial al espacio real del flujo y no a las imágenes capturadas por el equipo digital.

⁵⁴ Esta metodología de adquisición se denomina *double frame-single exposure*, porque se toman dos imágenes consecutivas (con dos exposiciones) sobre el mismo papel o fondo. En la técnica actual de PIV, este tipo de procedimiento no se emplea. En el Capítulo 4 de Raffel *et al.* (2007) se puede consultar una comparación de este y otros esquemas de adquisición de imágenes.

En la ecuación (3.8) el operador $\langle \bullet \rangle$ hace referencia a la media de conjunto y no al promediado espacial, como en el Capítulo 2. En este caso, la media de conjunto se aplicaría a varias imágenes que representan el mismo campo de velocidades, pero que tienen patrones de partículas diferentes. Si se asume que las imágenes tienen una distribución de partículas homogéneas, la media de conjunto $\langle I_1 \rangle$ es una constante.

Obviamente, la descomposición anterior también puede aplicarse a la segunda imagen $I_2(\mathbf{X})$. Aplicando la ecuación (3.8) en la expresión (3.7), se llega a (Keane y Adrian, 1992):

$$R(s) = R_C(s) + R_F(s) + R_D(s) \quad (3.9)$$

Donde R_C es la correlación cruzada de la imagen media, R_F la de la media con la fluctuación y R_D la correlación cruzada de la fluctuación. Se puede demostrar que los términos R_C y R_F no contribuyen a determinar la posición del pico o máximo de la correlación-cruzada (el desplazamiento en la ventana de interrogación), y que se pueden eliminar del análisis restando a las imágenes el valor de la media (Westerweel, 2000).

El término correspondiente a la correlación cruzada de las fluctuaciones, R_D , se puede descomponer en una parte media y otra de fluctuación (Poelma y Westerweel, 2007):

$$R_D(s) = \langle R_D(s) \rangle + R_D'(s) \quad (3.10)$$

El término medio de esta componente de la correlación cruzada representa la posición del pico de la función de correlación, y por tanto, el desplazamiento de las partículas de la imagen (siempre que estas se muevan de modo uniforme). El término $R_D'(s)$ representa las correlaciones aleatorias. Esta descomposición se ejemplifica en la Figura 3.30.

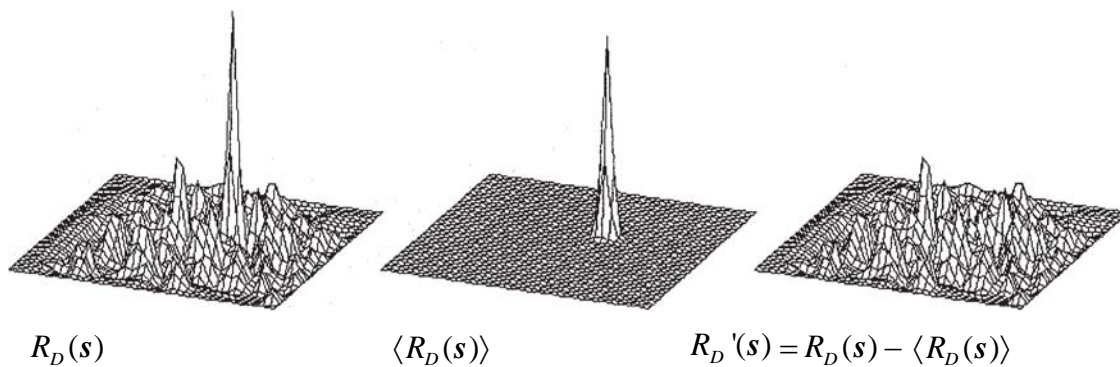


Figura 3.30. Descomposición del término de fluctuación aleatoria $R_D'(s)$ en sus componentes media y de fluctuación (adaptado de Westerweel, 2000).

Para poder identificar el pico de la correlación cruzada, la amplitud del mismo debe ser mayor que la del ruido aleatorio del término de fluctuación. Cuando esto no sucede, se obtendrá un vector erróneo o *espurio*. Otro parámetro relacionado con el funcionamiento del método es la detectabilidad, o el ratio entre el pico máximo y el segundo pico. Este parámetro representa el límite inferior de la relación entre la señal y el ruido, SNR.

Si se hace un estudio teórico sobre el análisis de correlación cruzada para un campo de velocidades cuasi-uniforme en una ventana de interrogación se llega a que el pico de la correlación $\langle R_D(s) \rangle$ vale (Keane y Adrian, 1990):

$$\langle R_D(s) \rangle \sim N_I F_I(s) F_O(\Delta z) F_\Delta(a/d_r) \quad (3.11)$$

donde N_I es el número de partículas de la ventana de interrogación, F_O es un factor que contempla la pérdida de correlación por el *movimiento de las partículas fuera de plano* (en la dirección perpendicular al mismo), F_I es un factor que la pérdida de correlación por el *movimiento de las partículas en el plano* y contabiliza las partículas que se salen del área de interrogación por el movimiento del flujo, y por último, F_Δ la pérdida de correlación por la existencia de un gradiente de velocidades dentro de la ventana.

Por tanto, los términos de la parte derecha de la ecuación (3.11) son una serie de factores que se deben maximizar para que el pico de la correlación se detecte de una forma óptima. En Keane y Adrian (1990, 1992), Westerweel (2000) y Poelma y Westerweel (2007), se puede encontrar una descripción detallada de cada uno de estos factores así como expresiones analíticas para obtenerlos desde un punto de vista teórico.

En este texto, se pretende reflejar su importancia y como influyen en la optimización del montaje experimental. Para ello, a continuación se analizará cada término individualmente para posteriormente presentar unas reglas de diseño que tendrán como objetivo mejorar la calidad de los campos vectoriales obtenidos con la técnica PIV. Por tanto, el análisis teórico se dejará de lado y se desarrollarán los aspectos más prácticos del mismo.

Efecto de la densidad de partículas en la imagen, N_I .

En la Figura 3.31 se presenta el efecto del número de partículas en la función de correlación cruzada, manteniendo constantes los parámetros de movimiento *en el plano* y *fuera de plano*. Se puede observar como el pico de la correlación crece con el número de partículas así como el SNR del análisis.

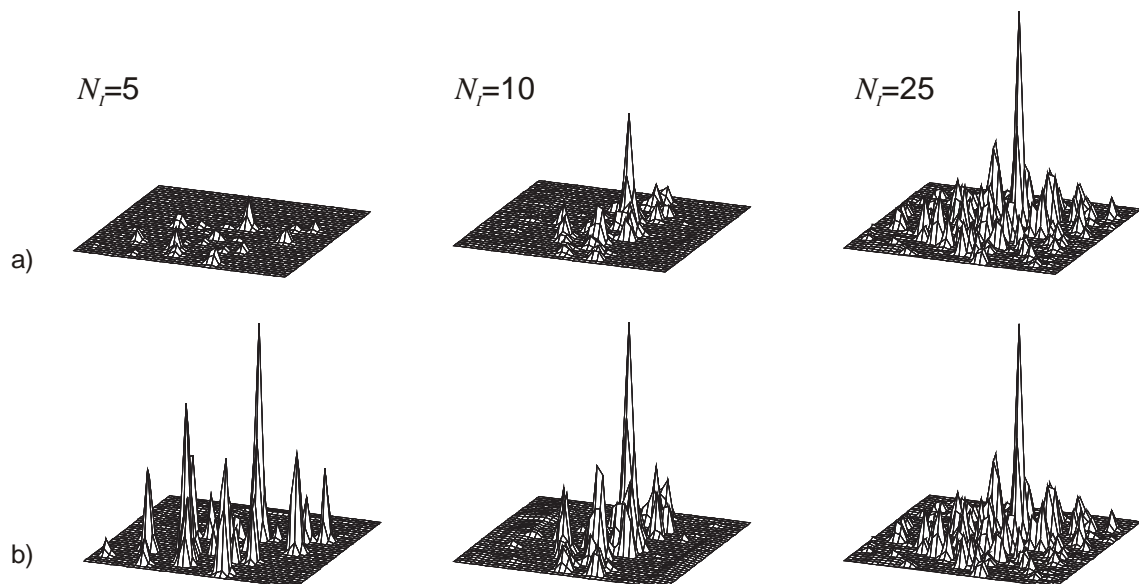


Figura 3.31. Efecto del número de partículas en la función espacial de correlación cruzada. Las funciones de (a) y (b) son idénticas, pero las segundas están normalizadas respecto al pico de la correlación (adaptado de Poelma y Westerweel, 2007).

En la figura también se ve como el ruido (las correlaciones aleatorias) crece con el número de partículas cuando se analiza la correlación en términos absolutos (Figura 3.31, a). Sin

embargo, si se analiza en términos relativos al pico de correlación, el ruido decrece con el número de partículas (Figura 3.31, b).

Efecto del movimiento en plano, F_r .

La pérdida de correlación por el movimiento en el plano contempla que por efecto del flujo, las partículas visualizadas en el primer *frame* salgan del área de interrogación en el segundo. Cuando mayor es este efecto (p.ej. porque el intervalo de disparos del láser es muy alto), mayor será la pérdida de correlación.

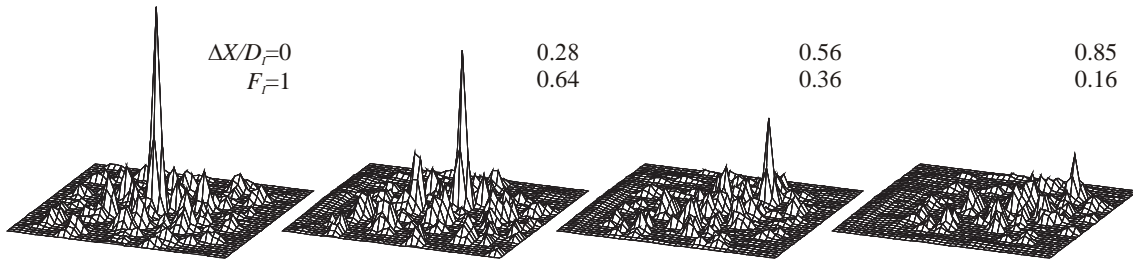


Figura 3.32. Efecto del movimiento en plano (expresado como la relación entre el desplazamiento de las partículas ΔX y el tamaño de la ventana de interrogación D_r) en la correlación cruzada (adaptado de Poelma y Weterweel, 2007).

En la Figura 3.32 se presenta este efecto en función de la relación entre el desplazamiento de las partículas ΔX y el tamaño de la ventana de interrogación D_r , que se ha supuesto cuadrada. Se puede apreciar como el pico decrece a medida que se incrementa el movimiento en el plano y el nivel de ruido permanece, en términos absolutos, constante. Posteriormente, en el apartado 3.3.4.3, se presentarán métodos que permitirán maximizar el número de partículas en plano desplazando la segunda ventana de interrogación en la dirección del flujo una distancia igual a la velocidad media por el tiempo entre disparos del láser (las denominadas *shift techniques*).

Efecto del movimiento fuera de plano, F_o .

Otro factor que reduce la correlación es el movimiento de las partículas fuera de plano. Este efecto se puede observar en la Figura 3.33, en la que se representa la reducción del factor F_o con el aumento del desplazamiento en perpendicular $|\Delta z|$ relativo al espesor del plano de luz Δz_0 .

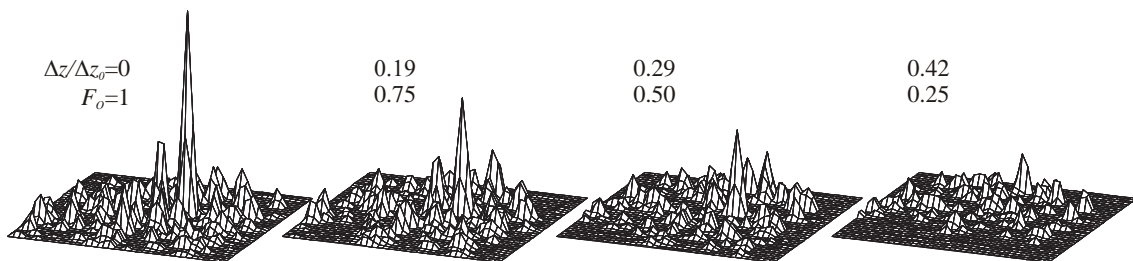


Figura 3.33. Efecto del movimiento fuera de plano de las partículas $\Delta z/\Delta z_0$ en la correlación cruzada (adaptado de Poelma y Weterweel, 2007).

Efecto del gradiente de velocidades, F_Δ

El gradiente local de velocidades también afecta al pico de la correlación cruzada y por tanto, a la precisión de la técnica PIV. Todo el desarrollo realizado hasta el momento ha contemplado que todas las partículas se mueven con una velocidad más o menos uniforme en la ventana de interrogación, pero pueden aparecer situaciones (p.ej. en una capa de cortadura), en la que exista un gran gradiente de velocidades.

En estas situaciones, el efecto del gradiente reduce el pico de la correlación, aunque como se puede apreciar en la Figura 3.34, el ancho del mismo crece (manteniéndose el volumen bajo la función de correlación más o menos constante).

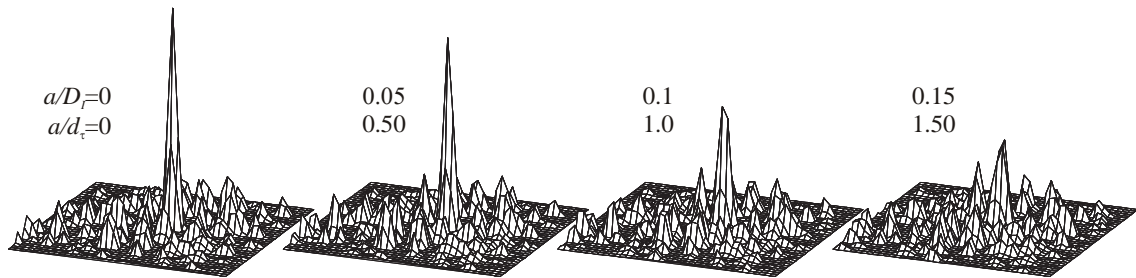


Figura 3.34. Efecto del gradiente de velocidades en la ventana de interrogación en el pico de la correlación cruzada (adaptado de Poelma y Westerweel, 2007).

En esta figura, la variación local del gradiente de velocidades se expresa como $a \equiv M_0 |\Delta u| \Delta t$ (donde M_0 es la magnificación, y Δu y Δt las variaciones de la velocidad y el tiempo entre disparos respectivamente). Se puede observar como este parámetro, que es una medida de la diferencia que existe entre el desplazamiento de las partículas, se relaciona con el tamaño de la ventana y el tamaño de la partícula visualizada en la imagen d_r . Para valores altos del desplazamiento a , el valor del pico se reduce ostensiblemente y, además, pueden aparecer varios picos que reflejarían los diferentes desplazamientos medios de los grupos de partículas.

Como regla de diseño, se recomienda que el valor de a no supere el ~3- 5% del tamaño de la ventana de interrogación y que tampoco supere el tamaño de las partículas visualizadas (Poelma y Westerweel, 2007. Con el empleo de técnicas avanzadas de correlación (usando ventanas de interrogación deformables, §3.3.4.3), es posible recuperar el pico de la correlación para valores de $a > d_r$.

Normas de diseño para obtener una buena correlación con la técnica PIV

Como resumen, se puede indicar que la amplitud de la función de correlación cruzada es función de:

$$R_D(s) \sim N_I F_I F_O F_\Delta \tag{3.12}$$

Para incrementar el SNR de la expresión anterior, y por tanto la precisión de la técnica, se deben incrementar el número de partículas y minimizar los efectos de pérdida de correlación por el movimiento en plano y fuera de plano, así como el efecto del gradiente local de velocidades.

Keane y Adrian (1990), realizaron un estudio en el que analizaron la probabilidad de detectar el pico de la correlación (definida para una detectabilidad D_0 o relación entre los dos picos máximos mayor que 1.1) para diferentes valores de los parámetros N_I , F_I y F_O . Los resultados

de este trabajo muestran que para diferentes configuraciones, la detección colapsa aproximadamente en una única curva, representada en la Figura 3.35.

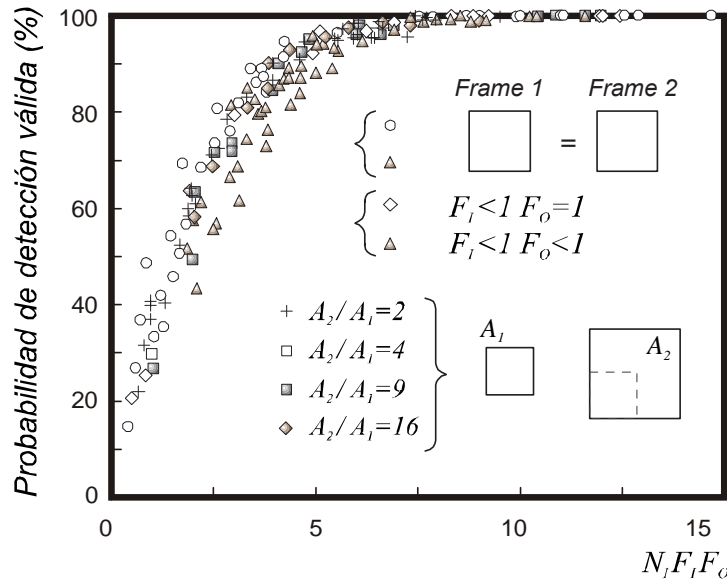


Figura 3.35. Porcentaje de detección de los picos del análisis de correlación cruzada en función de la densidad de la imagen N_i y el movimiento en plano y fuera de plano, F_i y F_o , respectivamente (Keane y Adrian, 1990).

Los datos de la Figura 3.35 se obtuvieron a partir de la evaluación de imágenes sintéticas generadas con la ayuda de simulaciones de Montecarlo⁵⁵ y muestran que la probabilidad de detección del análisis de correlación cruzada para un gradiente local de velocidades nulo ($F_{\Delta}=1$) alcanza un valor cercano al 100% para valores de $N_i F_i F_o > \sim 7.5$.

De los resultados de este trabajo se han desarrollado las reglas de diseño para la técnica PIV (Keane y Adrian, 1990, 1992):

$$\left. \begin{aligned} N_i &> 10 \\ |\Delta X| &< 1/4D_t \\ |\Delta z| &< 1/4\Delta z_0 \\ M0|\Delta u|\Delta t &< d_\tau \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Cuando los criterios de la ecuación (3.13) se cumplen, al menos el 95% de las ventanas de interrogación arrojarán un valor de velocidad correcto, y desde un punto de vista práctico las reglas funcionan muy bien (Poelma y Westerweel, 2007).

⁵⁵ La generación de imágenes sintéticas es una técnica muy empleada en la literatura para analizar y validar nuevos algoritmos de correlación avanzados. Con objeto de facilitar y homogeneizar el procedimiento de generación de campos de partículas, dentro de la red europea PIVNET2 se ha desarrollado el programa gratuito EUROPIV Synthetic Image Generator (S.I.G.). Lecordier, B. y Westerweel, J. (2004). *The EUROPIV Synthetic Image Generator (S.I.G.)*. en *Particle Image Velocimetry: recent Improvements. Proc. of the EUROPIV2 workshop*. M. Stanislas, J. Westerweel y J. Kompenhans. Zaragoza, Springer: 145-161.

Como se ha señalado anteriormente, con las técnicas de correlación actuales se pueden relajar estos criterios, por lo que cada vez es más sencillo realizar medidas precisas con la técnica PIV. Sin embargo, ningún método más avanzado (y lento) mejorará el resultado de la técnica de correlación-cruzada estándar si se cumplen las condiciones expresadas con estas reglas de diseño.

3.3.4.2. Análisis de correlación cruzada digital: optimización del tamaño de las partículas

El desarrollo realizado en el apartado anterior es válido para imágenes continuas, pero en realidad las imágenes digitales son discretas. Esta circunstancia tendrá que contemplarse a la hora de implementar los algoritmos de correlación cruzada en el software de evaluación PIV.

No es objeto de esta Tesis Doctoral tratar los aspectos más teóricos y numéricos del proceso de implementación de las técnicas PIV en el software (una revisión de esta temática se puede encontrar p.ej. en Westerweel, 1997 o en Raffel *et al.*, 2007), pero se ha considerado interesante plantear los principales retos y problemas que surgen en el mismo. Con esta exposición, se pretenden resaltar aquellos problemas que están relacionados con la práctica de la técnica PIV para así reducirlos a la hora de diseñar el experimento.

En el proceso de adquisición y digitalización de las imágenes la información se discretiza y cuantifica. La discretización hace referencia al muestreo de la imagen real en una matriz de puntos, los pixels del sensor CCD o CMOS, y está relacionada con la resolución del equipo de grabación. En la técnica PIV las cámaras habituales suelen tener una resolución de 1Mpx (1280x1024 px²), aunque en la actualidad comienzan a popularizarse cámaras con el doble de resolución (1600x1280 px²).

La cuantización de la información es también inherente al proceso de digitalización y se produce porque la intensidad de luz se evalúa en niveles discretos. Las cámaras PIV actuales trabajan en escala de grises, con rangos dinámicos de 12 o 16 bits, que equivalen a un rango de $2^{12}=4096$ y $2^{16}=65536$ niveles de grises, respectivamente.

Los efectos de la discretización espacial no son importantes según el teorema de Nyquist cuando el ratio de muestreo es al menos el doble del ancho de banda del sistema óptico. La cuantización de la intensidad se puede ignorar cuando las diferencias entre los niveles discretos son pequeñas en comparación con la variación de intensidad total (Westerweel, 1997).

Cuando se adquieren imágenes con un equipo PIV se busca que las partículas tengan una intensidad mucho mayor que la del fondo⁵⁶, por lo que los problemas relacionados con la cuantización no son esperables. Sin embargo es habitual que el ratio de muestreo espacial de la imagen sea inferior al ancho de banda óptico del sistema. Afortunadamente, esto no representa un problema si se tiene un poco de cuidado al realizar el diseño experimental.

Westerweel (1997), señala que la información del desplazamiento de las partículas, o del movimiento del flujo, se representa con una frecuencia espacial mucho menor que la que proporciona la posición real de la partícula. Este hecho está relacionado con la metodología

⁵⁶ En la actualidad es una práctica habitual en preprocesado de las imágenes sustraer el fondo o realizar una media móvil para uniformizar la intensidad del fondo y *resaltar* las partículas para mejorar la correlación. Un caso extremo, empleado en algunas ocasiones en técnicas como la μ PIV, consiste en *binarizar* la imagen (esto es, convertir el fondo en “ceros” y las partículas en “unos”, eliminando los niveles de grises intermedios).

empleada por los algoritmos PIV para determinar la posición del pico de la función de correlación cruzada, o, en definitiva, el desplazamiento de las partículas en la ventana de interrogación.

Veámoslo con un ejemplo. Si tenemos una ventana de interrogación típica de 32×32 px² y el desplazamiento es del orden de 8 px (es la conocida *regla del cuarto de Adrian*, ver (3.13)), podemos estimar la posición con un error de ± 0.5 px porque sólo disponemos de información discreta en cada píxel. Esto nos llevaría a cometer un error de $1/8$, que equivaldría a un $\approx 13\%$. Como veremos a continuación, es posible determinar la posición con una precisión inferior a la del píxel, a través de una serie de técnicas (*subpixel interpolation*) que sin lugar a dudas, han permitido el avance y popularización de los sistemas PIV.

Otro aspecto fundamental en el desarrollo del PIV está relacionado con el modo de evaluar la función de correlación cruzada. Sin entrar en muchos detalles, al discretizar la información, la integral que define la correlación en la ecuación (3.7) se convierte en un doble sumatorio en el dominio de la ventana de interrogación que supondremos de $M \times N$ píxeles. Si se evalúa el sumatorio de forma directa, el tiempo de cálculo para cada ventana es $\propto (2M \times 2N)^2$. Este tiempo se incrementa de modo factorial porque se debe multiplicar por el número de ventanas en cada imagen (p.ej. para una imagen de 1280×1024 px² y una ventana de interrogación de 32 px², sin *overlap*⁵⁷, tenemos 1280 estimaciones) y el número de imágenes de nuestro experimento (en la actualidad, se puede trabajar con órdenes de 10^2 o 10^3 imágenes).

Por este motivo, es habitual que el software de análisis de los equipos PIV transformen los datos recogidos en las imágenes del dominio del espacio al dominio de la frecuencia. Este técnica, que es habitual en otros campos de trabajo relacionados fundamentalmente con movimientos ondulatorios, fue introducida por Willert y Gharib (1991) y consiste en trabajar en el dominio de la frecuencia haciendo uso de las transformadas rápidas de Fourier (FFT). No se hará un estudio de esta técnica en este trabajo, sin embargo, a efectos prácticos, se puede indicar que cuando el tamaño de la ventana es de potencia 2 el algoritmo para el cálculo de las FFT maximiza su eficiencia (con tiempos proporcionales $\propto 4MN \log_2(MN)$). Por este motivo, en la práctica las ventanas de interrogación tienen un tamaño en píxeles de 8×8 , 16×16 , 32×32 , 64×64 , etc.

Retomando el problema de la interpolación a nivel de subpixel, se puede señalar que existen varios métodos para resolver este problema. El más habitual consiste en emplear tres puntos para ajustar una distribución Gaussiana (Willert y Gharib, 1991; Westerweel, 1993b, a), aunque inicialmente se emplearon ajustes tipo media-móvil o de tipo parabólico. Para que este método funcione de un modo óptimo, la relación entre el tamaño de la partícula y el tamaño del píxel, d_p , se debe encontrar en unos rangos determinados. De hecho, se puede demostrar que para relaciones $d_p / d_r \ll 1$ o $d_p / d_r \gg 1$, el error en la determinación de la posición crece considerablemente (ver p.ej. Poelma y Westerweel, 2007).

Como se ha comentado, estos algoritmos emplean la información de los píxeles adyacentes al píxel que presenta el máximo discreto (Figura 3.36). Cuando la partícula tiene un tamaño muy grande, digamos superior a los ~ 4 px, se pierde resolución espacial, pero además, el valor de

⁵⁷ Es habitual que las ventanas de interrogación se solapen o superpongan hasta valores del 50% o 75% para mejorar la resolución espacial. De este modo se pasaría a una separación entre vectores de 32 px a 16 px u 8 px, respectivamente.

los tres puntos empleados para estimar la posición es muy parecido, por lo que las pequeñas diferencias que existen están más afectadas por el ruido.

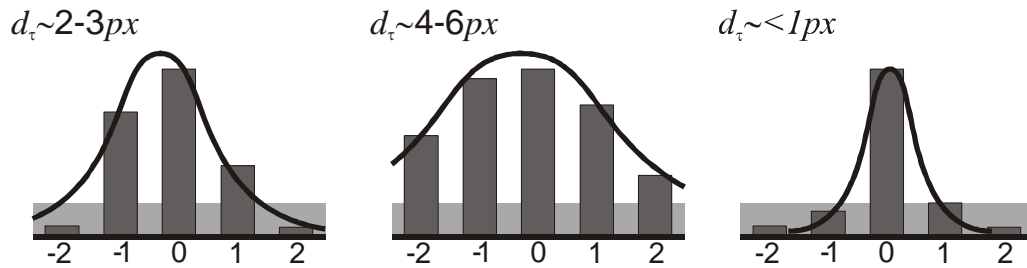


Figura 3.36. Efecto del tamaño de la partícula sobre la determinación de la posición del pico de la función de correlación cruzada empleando el algoritmo gaussiano de precisión inferior al píxel.

Cuando el tamaño de las partículas es inferior al píxel, la magnitud de los puntos adyacentes está por debajo del nivel de ruido, por lo que estimación de la posición está sesgada hacia la posición central del píxel (los puntos adyacentes no proporcionan información para el ajuste). Este fenómeno, denominado *pixel peak-locking*, es un auténtico problema porque reduce notablemente la precisión de la técnica.

Algunos problemas están relacionados con la obtención de campos de velocidades sin sentido físico (Figura 3.37), con la determinación de magnitudes derivadas instantáneas, como p.ej. la vorticidad, aunque sin embargo, parece no afectar demasiado a los estadísticos medios del flujo (Christensen, 2004; Angele y Muhammad-Klingmann, 2005).

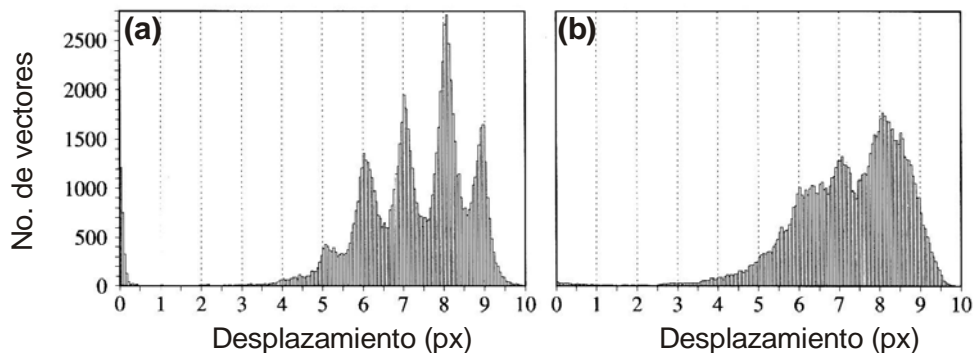


Figura 3.37. Histograma del desplazamiento de unas serie de 10 imágenes en una capa límite turbulenta en la que se ilustra el efecto del peak-locking asociado a un tamaño insuficiente de partícula (a). Con el preprocesado se puede reducir el efecto (b), (Raffel et al., 2007).

Para reducir el problema del *peak-locking*, se han propuesto numerosas soluciones basadas en desenfocar la imagen (de un modo físico o a través de filtros matemáticos) o en el empleo de nuevos algoritmos de interpolación a escala de subpíxel (Fincham y Delerce, 2000). La mayoría de estos métodos se basa en incrementar de modo artificial el tamaño efectivo de la partícula, pero no hay que olvidar que la mejor práctica consistirá en escoger una potencia y un configuración óptica (magnificación, apertura de diafragma) adecuados para que el patrón de difracción de las partículas se encuentre en el rango adecuado.

Entonces, el siguiente paso consiste en establecer cual es el rango adecuado para optimizar el diámetro de las partículas d_p . Para la obtención de este valor, en la literatura se pueden encontrar estudios realizados a partir del análisis de imágenes sintéticas y modelos analíticos, como el de Westerweel (1997) o los recogidos en el capítulo 5 de Raffel *et al.* (2007), ver Figura 3.38.

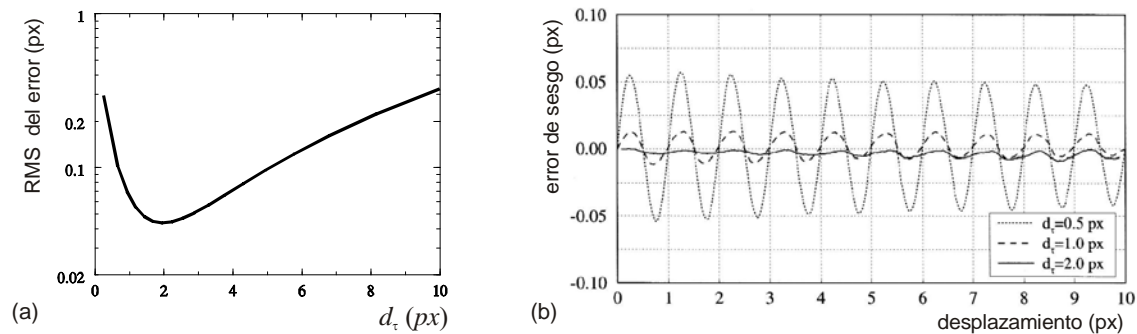


Figura 3.38. (a) Error cuadrático medio en la estimación del desplazamiento en función del tamaño de las partículas (Westerweel, 1997); (b) Efecto de peak-locking en el error sistemático de la estimación del desplazamiento de las partículas en función de su tamaño (Raffel *et al.*, 2007).

Basados en estos trabajos teóricos, y también en consideraciones prácticas, el valor óptimo recomendado en la bibliografía está en el orden de ~ 2 px, aunque por consideraciones prácticas un buen rango de trabajo serían de ~ 2 a 4 px. Para estas situaciones, con los algoritmos de interpolación Gaussiana se pueden alcanzar precisiones de hasta 0.05 o 0.10 px, que equivalen a un error en la determinación del desplazamiento y de la velocidad del orden del $\sim 1\%$ (McKeon *et al.*, 2007).

3.3.4.3. Algoritmos avanzados de correlación cruzada

En los últimos años los algoritmos de evaluación de PIV han avanzado de un modo muy notable, impulsados por los certámenes “*Internacional PIV Challenge*” (Stanislas *et al.*, 2003; Stanislas *et al.*, 2005; Stanislas *et al.*, 2008) organizados por la redes PIVNET y PIVNET2 (www.univ-lille1.fr/pivnet/ y www.pivnet2.dlr.de), la European Research Community On Flow, Turbulence and combustión (ERCOFTAC) y el Japanese Standard Image Project (www.vsj.or.jp/piv) en los años 2001, 2003 y 2005. La implementación de técnicas de correlación iterativas con ventanas de interrogación de tamaño decreciente y con deformación de la imagen, permiten obtener una mayor resolución espacial en las zonas de altos gradientes de velocidades. Con este tipo de procedimientos, la precisión de la determinación de las partículas se puede reducir hasta ~ 0.03 px en ensayos bien realizados. Con un desplazamiento dinámico de unos 10 px, es posibles alcanzar cotas de error sistemático *rms*, en la determinación de los vectores instantáneos, del orden del $\sim 0.3\%$ ⁵⁸ (Schröder *et al.*, 2005).

⁵⁸ En general, las cotas de error de los métodos de evaluación avanzada se han derivado del análisis de imágenes sintéticas. Con los generadores de imágenes actuales, no se contemplan efectos cambios en profundidad de las partículas o problemas de alineación de los haces láser, que provocan que la misma partícula pueda presentar intensidades diferentes en el mismo par de exposiciones. Estos cambios de intensidad están relacionados con la cota máxima de precisión alcanzable en un diseño experimental real, que se ha confirmado recientemente en el entorno de ~ 0.1 px Nobach, H. y Bodenschatz, E. (2009).

La proliferación de métodos y nomenclaturas es tal, que en algunas ocasiones resulta difícil conocer cual es la situación actual de las técnicas de evaluación de imágenes. Además, la publicación de trabajos no cesa, y aunque existen buenas referencias bibliográficas que intentan clasificar y describir las principales técnicas (ver p.ej. Kähler, 2007; McKeon *et al.*, 2007; Raffel *et al.*, 2007), éstas se pueden quedar obsoletas en poco tiempo (al menos, en lo relativo a las técnicas más actuales).

Además, aunque el software de procesado incorpore los nuevos algoritmos, la gran cantidad de parámetros y opciones que se presentan a la hora de realizar la evaluación PIV, hace necesario que se conozcan los fundamentos de cada técnica, cuando conviene aplicarlas y cuando se obtienen realmente mejoras con ellas. A continuación se presentarán las técnicas avanzadas más relevantes y que mayor aceptación han tenido en la comunidad científica.

Algoritmos iterativos con desplazamiento de la segunda ventana de interrogación

Una forma de mejorar el pico de la correlación cruzada consiste en desplazar la segunda ventana de interrogación una distancia igual al desplazamiento de las partículas (Figura 3.39). Esta técnica, denominada genéricamente *window shift method*, presenta dos ventajas:

- Se reduce la pérdida de correlación por movimiento en el plano (F_t , ecuación (3.12)), porque se minimiza el número de partículas que se salen de plano (Westerweel *et al.*, 1997).
- Al desplazar la segunda ventana, es esperable que la evaluación de la función de correlación cruzada señale un desplazamiento nulo o muy bajo. De este modo, se aprovecha la robustez del algoritmo de interpolación gaussiano a nivel de subpixel, que funciona mucho mejor en el entorno del cero (Kähler, 2007). Esto es especialmente cierto cuando se emplea un desplazamiento de la ventana con precisión de subpixel. El principal inconveniente de esta alternativa es que es necesario realizar una interpolación de la imagen, que puede causar una degradación de la misma (y una pérdida de precisión), especialmente cuando las partículas son inferiores a los 2 px (Scarano, 2002).

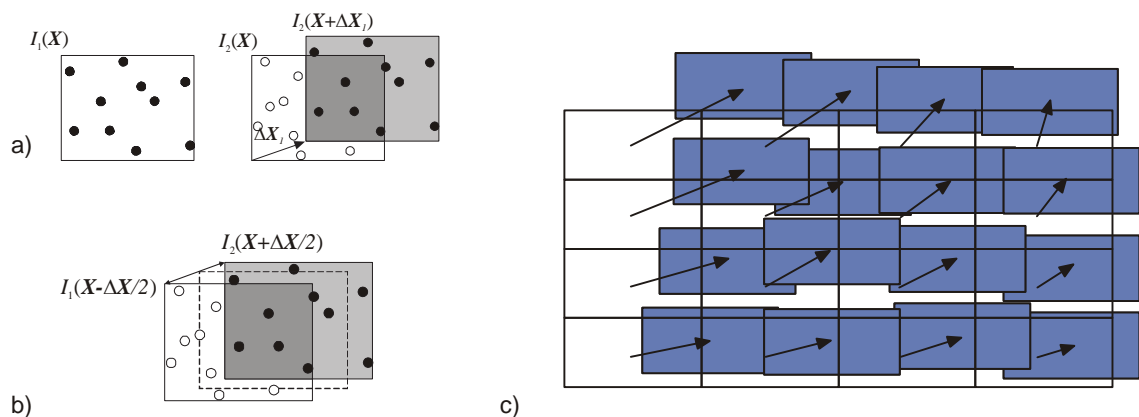


Figura 3.39. Esquema de la técnica del desplazamientos de las ventanas para mejorar la correlación: (a) Desplazamiento de la segunda ventana de interrogación y (b) desplazamiento de ambas ventanas para mejorar la correlación; (c) Esquema del desplazamiento en un grupo de ventanas (adaptado de Scarano, 2002).

"Limitations of accuracy in PIV due to individual variations of particle image intensities." Experiments in Fluids in press: 12.

Para resolver el movimiento con este proceso, ya sea con un movimiento entero o con precisión inferior al píxel, se debe ejecutar el algoritmo de un modo iterativo. Así, a partir de la información de las primeras pasadas, proporcionar el valor del desplazamiento en iteraciones sucesivas.

Una variante de este procedimiento consiste en emplear métodos de segundo orden para mover las ventanas de interrogación, Figura 3.39 (b). Esta segunda alternativa, propuesta por Wereley y Meinhart (2001), consiste en desplazar ambas ventanas de interrogación de un modo simétrico y presenta dos ventajas fundamentales: da mayor precisión cuando el tiempo entre disparos es alto y además proporciona una visión temporal simétrica del flujo.

Esquemas de refinamiento de malla

Una forma de mejorar el procedimiento de desplazar las ventanas de interrogación consiste en emplear un proceso iterativo con ventanas de interrogación decrecientes. Con estas metodologías, denominadas *multigrid schemes* o *múltiple pass interrogation windows*, se puede incrementar el rango dinámico espacial⁵⁹ en aquellas configuraciones de flujo con mucho gradiente de velocidades (Raffel *et al.*, 2007).

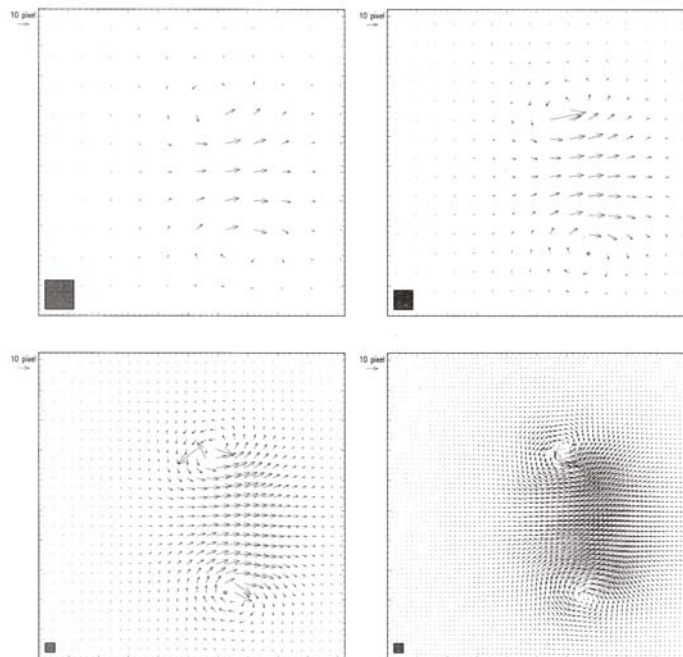


Figura 3.40. Esquema del procedimiento de refinamiento de malla. Los cuadrados grises del borde inferior izquierdo señalan el tamaño de la ventana de interrogación que decrece de $128 \times 128 \text{ px}^2$ a $32 \times 32 \text{ px}^2$ (Raffel *et al.*, 2007)

⁵⁹ El rango dinámico espacial (*Dynamic Spatial Range, DNR*) se define como el ratio entre la mayor (p.ej. área visualizada) y la menor (p.ej. separación entre vectores) escalas medibles con el equipo. Del mismo modo, se define el rango dinámico de velocidades (*Dynamic Velocity Range, DVR*) como el ratio entre la máxima y mínima velocidad que podemos resolver con la técnica. El objetivo de los algoritmos avanzados es incrementar ambos rangos, ya que con los procedimientos de correlación cruzada convencionales (ej. desplazamiento medio $\sim 1/4D$) tienen muchas limitaciones en flujos con altos gradientes de velocidad. Adrian, R.J. (1997). "Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry." *Measurement Science and Technology* 8: 1393-1398.

Con este procedimiento, descrito inicialmente por Willert (1997) y Scarano y Riethmuller (1999), no es necesario cumplir la regla del cuarto (ecuación (3.13)), factor relacionado con el incremento del rango dinámico del sistema. Este incremento es proporcional al grado de refinamiento (relación entre la mayor y la menor ventana de interrogación, que habitualmente se encuentra en 2 y 6. Para flujos bidimensionales, el desplazamiento hasta puede exceder la dimensión de la ventana de interrogación (excepto la de la primera ventana).

El principal inconveniente de este método reside en su coste computacional, ya que requiere ejecutar el algoritmo de correlación de forma iterativa con las ventanas decrecientes. Sin embargo, en la actualidad, y salvo que se empleen las técnicas de deformación de la imagen como las que se presentarán a continuación, este coste es perfectamente asumible.

Esquemas de deformación de la imagen

Este tipo de métodos intentar eliminar la restricción de que el movimiento de las partículas dentro de la ventana de interrogación debe ser constante. Ya se ha señalado (Figura 3.34) que cuando el gradiente de velocidades de las partículas es elevado, el pico de la correlación se reduce notablemente, y en algunos casos, pueden aparecer varios máximos asociados a los diferentes desplazamientos que se producen en el dominio de interrogación (Figura 3.41).

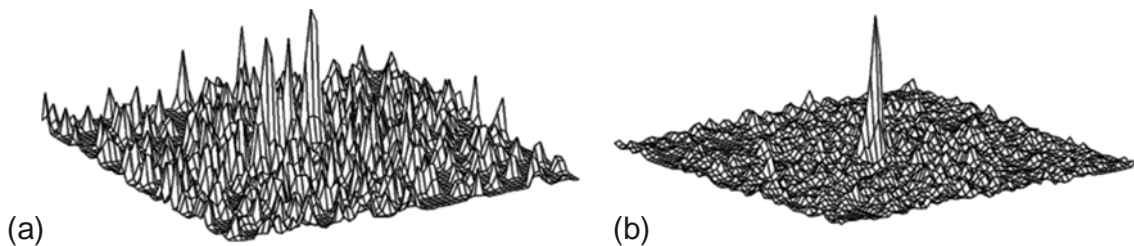


Figura 3.41. Ejemplo de una función de correlación cruzada en un flujo en una capa de cortadura. (a) Algoritmo de correlación básico, sin ningún procedimiento avanzado y (b) Algoritmo iterativo con múltiples ventanas y deformación de la imagen (McKeon et al., 2007).

Una forma de reducir este efecto consiste en deformar la imagen, a través de un proceso iterativo, ajustando su forma al campo de velocidades local. El principio básico de esta técnica se presenta en la Figura 3.42 y aunque fue propuesta a principios de los años 90 (Huang *et al.*, 1993b, a), no ha sido hasta hace dos o tres años cuando se ha popularizado porque hasta ahora, los tiempos de cálculo necesarios para deformar la imagen eran prohibitivos (Kähler, 2007).

Esta técnica se puede implementar con la aproximación de refinación de malla y, frente al método de desplazamiento de ventanas, presenta como ventaja su mayor robustez y precisión en flujos con grandes gradientes como las capas de mezcla, las capas límites y, en general, flujos muy turbulentos. Además, es un método al que el fenómeno del *peak locking* prácticamente no le afecta (Scarano y Riethmuller, 2000; Scarano, 2002).

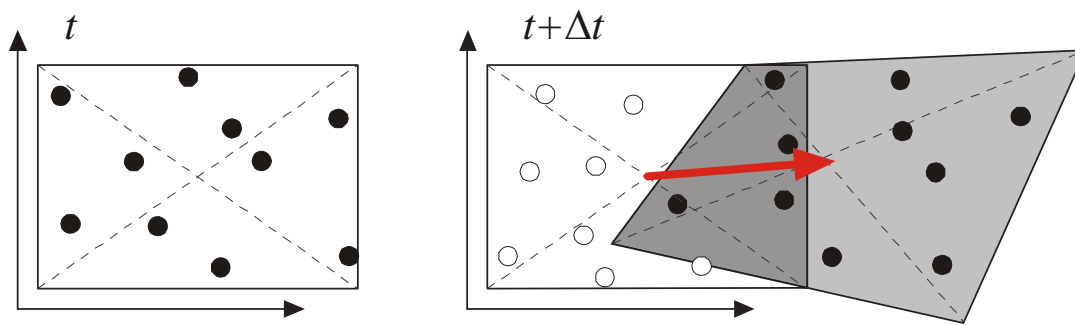


Figura 3.42. Principio básico de la técnica de deformación de la imagen. A la izquierda se presenta el patrón de las partículas de la primera exposición y a la derecha el de la segunda (los círculos negros representan las partículas correlacionadas con la primera imagen). En gris se representa la ventana deformada de acuerdo con el movimiento del fluido (adaptado de Scarano y Riethmuller, 2000; Raffel et al., 2007).

El principal inconveniente de esta técnica radica en que la imagen debe ser deformada y las intensidades deben ser interpoladas en un nuevo dominio, diferente de la matriz CCD de la cámara. Este procedimiento incrementa el coste computacional y además, en función del método de interpolación, se pueden añadir errores sistemáticos en la estimación del desplazamiento del pico de la función de correlación.

En la literatura se pueden encontrar diversos trabajos que analizan las funciones de interpolación empleadas para deformar las imágenes, fundamentalmente B-splines y polinomios de hasta grado 5 (Astarita, 2006; Jae Kim y Jin Sung, 2006). Una buena alternativa es emplear B-splines de 4º o 5º orden, aunque, si se requiere más precisión, se puede usar algún método basado más sofisticado como la reconstrucción de Whittaker (Scarano y Riethmuller, 2000). El principal problema del método de Whittaker es que incrementa un orden de magnitud el tiempo de cálculo (Raffel et al, 2007).

En la actualidad, el procedimiento iterativo más empleado para determinar los campos de velocidades consiste en mezclar el esquema de refinamiento de malla, eliminándose la restricción de la regla del cuarto, y posteriormente, aplicar un esquema de deformación de la imagen, únicamente en la ventana más pequeña (Huang et al., 1993b; Scarano y Riethmuller, 1999; Fincham y Delerce, 2000; Scarano, 2002).

Este método presenta un problema de inestabilidad cuando no se realiza un filtrado espacial de la imagen. Por el procedimiento de filtrado, se puede reducir la precisión espacial si no se utilizan ventanas de interrogación superpuestas un 75%. Por lo tanto, sólo es efectivo cuando se configura el procedimiento de cálculo de esta forma (Raffel et al., 2007).

Otros métodos avanzados

En la actualidad, se están desarrollando otra serie de métodos de evaluación de imágenes que pretenden mejorar la resolución espacial de los campos vectoriales registrados con la técnica PIV. Algunos métodos, conocidos como técnicas de *super-resolución*, son algoritmos que mezclan las técnicas de trazado individual de partículas (PTV) con la metodología PIV (Adrian, 1997). En esta metodología, se emplean las técnicas de correlación cruzada para trazar el movimiento en las ventanas de interrogación, empleando los vectores de velocidad así obtenidos como estimadores de la velocidad individual de las partículas más iluminadas.

Con esta técnica se elimina el efecto de filtrado espacial de la información disponible en las imágenes, ya que se pueden alcanzar resoluciones mayores que las impuestas por el tamaño o la separación entre las ventanas de interrogación. Otra alternativa propuesta en la literatura consiste en la recolocación del vector en la ventana de interrogación.

Los algoritmos tradicionales definen la posición del vector en el centro de la ventana, pero existen metodologías que colocan el vector en una posición diferente, analizando la estructura del mapa de correlaciones (*signal relocation: PIV/sr*). Con esta metodología, y también con la anterior, la información ya no se estructura en una malla regular, por lo que será necesario emplear procedimientos para analizar la turbulencia similares a los empleados con otros equipos que no proporcionan la información de un modo regular, como p.ej. los LDA (ver p.ej. la tesis de Poelma, 2004).

Otra alternativa que se está desarrollando en la actualidad (Theunissen *et al.*, 2007; Astarita, 2009) son las denominadas *adaptive interrogation techniques*. Estas técnicas son especialmente recomendables cuando el sembrado de las partículas no es uniforme en el dominio de visualización y cuando existen patrones de flujo preferencial. En este procedimiento iterativo se realiza un análisis del patrón del flujo y de la densidad de las partículas. Con esta información se construye una malla no regular donde las ventanas de interrogación se ajustan en tamaño y dirección con las características de la imagen (Figura 3.43).

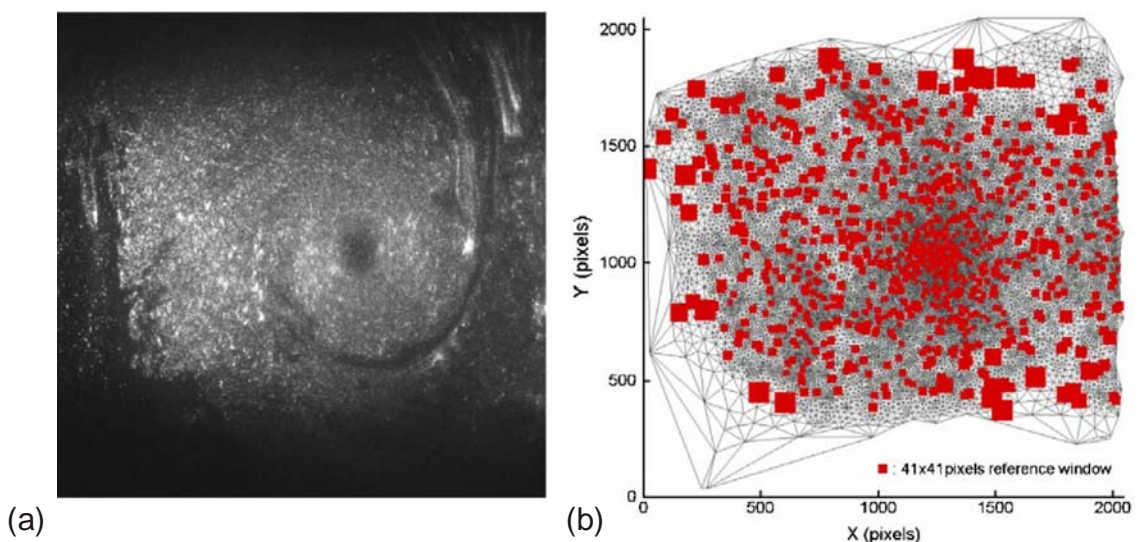


Figura 3.43. (a) Campo de partículas no homogéneas correspondientes al vórtice generado en el entorno del ala de un avión y (b) Ejemplo de malla desestructurada y ventanas de interrogación empleadas en un método adaptativo (Theunissen *et al.*, 2007).

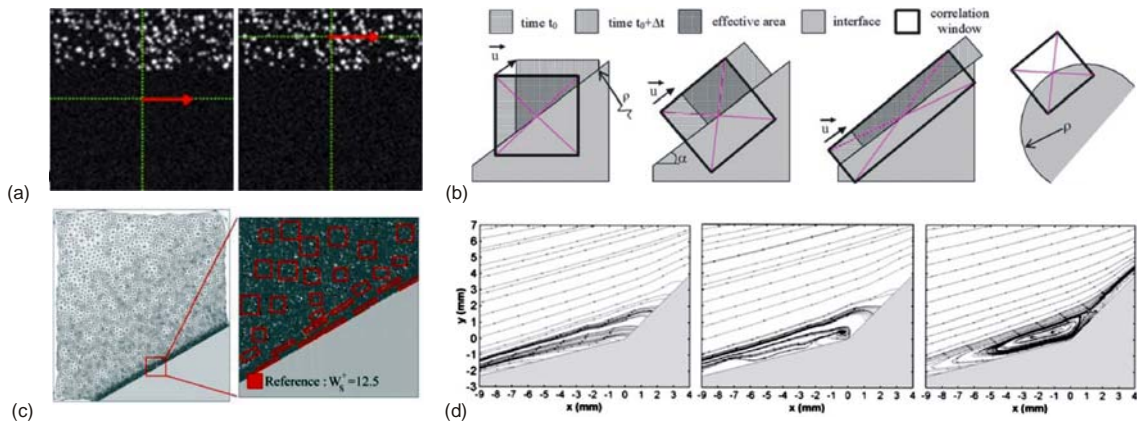


Figura 3.44. Mejora de la resolución espacial de la técnica PIV cerca de los contornos: (a) Recolocación del vector velocidad; (b) Empleo de diferentes esquemas de ventanas de interrogación ajustadas a la superficie; (c) Malla y tamaños de ventanas para el esquema adaptativo; y (d) Líneas de corriente cerca de una rampa con una aproximación convencional, una aproximación convencional con recolocación de vectores y ventanas filtradas y, a la derecha, añadiendo una técnica adaptativa. Más detalles en Theunissen et al., (2008).

En los trabajos más recientes, se intentan aprovechar las mejores características de las distintas técnicas para obtener de una única configuración experimental, el mayor rango de escalas del flujo. Un ejemplo es el trabajo de Theunissen *et al.*, (2008), en el que se presenta un algoritmo que usa funciones de correlación con una máscara especial cerca de los contornos para poder obtener información de la zona con flujo⁶⁰, el método de recolocación del vector en la ventana de interrogación (PIV/sr) y el empleo de ventanas de interrogación adaptativas a la densidad de las partículas y dirección del flujo.

Sin embargo, los usuarios convencionales de PIV, tendremos que esperar unos años para poder hacer uso de estas nuevas metodologías de evaluación de las imágenes.

3.3.4.4. Postprocesado

Después de realizar el montaje experimental, la adquisición de imágenes, el preprocesado de las mismas y la obtención de los campos de velocidades con los algoritmos de correlación cruzada, es necesario procesar toda la información recogida. Cuando se trabaja con la técnica PIV es necesario analizar numerosas imágenes y campos vectoriales, y además, es previsible que este número crezca a la par que las capacidades técnicas de los equipos informáticos⁶¹.

Un procedimiento genérico de postprocesado consta de las siguientes etapas:

⁶⁰ Sin este tipo de correcciones, el pico de la correlación se verá inevitablemente desplazado por efecto del contorno porque este permanece "inmóvil" y se correlacionará muy bien consigo mismo.

⁶¹ Por citar un ejemplo, en los primeros experimentos de flujo bicapa en los que ha estado involucrado este doctorando (Anta *et al.*, 2007), se analizaron del orden de 2-3 Gb de datos (unos pocos CDs). Para almacenar la información de los experimentos de esta tesis, han sido necesarios unos ~210 Gb. La información postprocesada sólo ocupa unos ~10 Gb.

- Validación de los datos. En esta fase deben eliminar los vectores espurios o incorrectos del campo de velocidades determinado a través de la correlación cruzada. Lo ideal es trabajar con algún algoritmo que automatice este proceso.
- Sustitución de los datos incorrectos. Para obtener algunas magnitudes derivadas del flujo (p.ej. determinación de campos de magnitudes derivadas como vorticidades, determinación de espectros, funciones de autocorrelación, etc) es necesario disponer de datos en una malla regular completa. Para este tipo de análisis será necesario interpolar los valores de los vectores instantáneos en aquellos puntos donde se haya eliminado previamente información.
- Evaluación de la información. En esta etapa se podrán analizar magnitudes derivadas o integrales del flujo (p.ej. vorticidad, líneas de corriente), estadísticos representativos de la turbulencia (p.ej. tensiones de Reynolds) o detectar estructuras de flujo.
- Representación de la información a través de gráficos, campos vectoriales y escalares y animaciones.

En este apartado se presentarán los principales métodos de validación de datos y eliminación de vectores incorrectos, así como las estrategias para reemplazarlos por vectores interpolados. Las técnicas de evaluación de la información empleadas en esta tesis se describirán en el Capítulo 4, en el apartado referente a la Metodología.

Para el análisis de otras técnicas que no se han empleado en este texto, como determinación de magnitudes derivadas o determinación de estructuras coherentes, se puede recurrir respectivamente a Raffel *et al.*, (2007) o Willert (2007c), y a Adrian *et al.*, (2000) y Vollmers, (2001), entre otros.

Validación de datos

Aunque realicemos un buen montaje experimental, y nos ajustemos a las reglas prácticas del PIV (ecuación (3.13)), es probable que al procesar un campo de velocidades nos encontremos con vectores con dirección y módulo muy diferente del que presentan los vectores de su entorno (Figura 3.45).

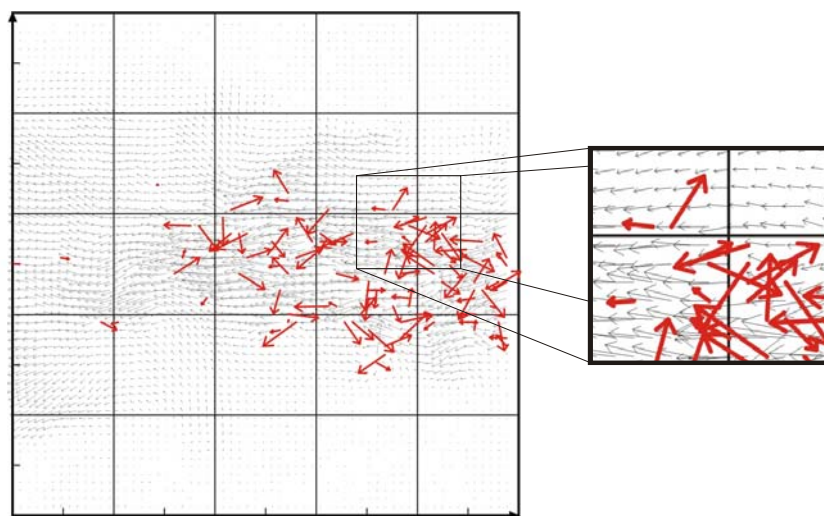


Figura 3.45. Campo de vectores instantáneo de un jet en el que se han representado los vectores espurios de color rojo (Westerweel y Scarano, 2005).

Estos vectores en general se originan cuando la amplitud de un pico aleatorio de la función de correlación cruzada supera el valor máximo que se corresponde con el desplazamiento real. Además, suelen ser el resultado de un número insuficiente de partículas en la ventana de interrogación, de un desplazamiento excesivo en el plano o fuera de plano o por un excesivo gradiente de velocidades. Otras causas que pueden provocar la aparición de vectores erróneos son fuertes intensidades de luz, p.ej. por una reflexión cerca del fondo o del contorno del modelo ensayado, por una heterogeneidad en la iluminación, como una sombra o una fluctuación en la lámina de agua, o también por alguna mancha en la zona visualizada (ver discusión en §4.4.2).

Existen varios métodos para detectar los vectores espurios, siendo los más habituales los siguientes (Poelma y Westerweel, 2007):

- La inspección visual del campo de velocidades.* Que no es útil desde un punto de vista práctico.
- Métodos basados en la detectabilidad.* Que se basan en analizar la calidad de la correlación, medida en términos del ratio entre los dos picos máximos de la función de correlación (la detectabilidad D_0) o a través del SNR. Sin embargo, pueden aparecer situaciones con una alta detectabilidad en las que el vector es espurio, especialmente con el número de partículas es bajo (Westerweel, 1994). Por este motivo, este método no es muy recomendable.
- Métodos basados en el análisis de la coherencia del campo de velocidades.* Estos métodos se basan en suponer que el flujo tiene una estructura “coherente”, y que los vectores espurios no responden a la misma.

Un ejemplo de este tipo de métodos es el del análisis del histogramas de velocidades, como el presentado en la Figura 3.46. Para cada tipo de flujo, se puede analizar la región en la caen los desplazamientos o velocidades correctas, y tras definir una superficie o área de aceptación, se procede a eliminar aquellos vectores que se sitúan fuera de la misma (Raffel *et al.*, 2007).

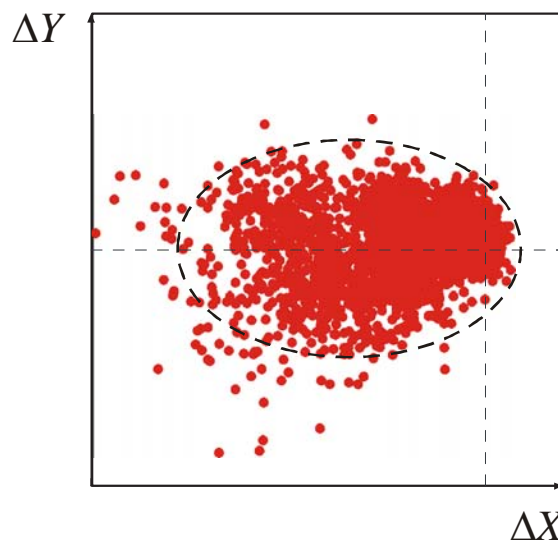


Figura 3.46. Desplazamientos correspondientes al campo vectorial de la Figura 3.45. La elipse señala el rango esperable de desplazamientos (McKeon *et al.*, 2007).

Con el método del histograma global, no se pueden eliminar aquellos vectores que presentan una fluctuación menor que la global del flujo, pero que sí presentan una gran fluctuación local. Para estos casos, se suele aplicar algún método de análisis de residuos, que se basan en analizar el valor de la velocidad en un punto con la velocidad de los puntos de su entorno.

En general, en estos métodos, un vector es rechazado si su residuo r , o diferencia entre su velocidad U y una velocidad de referencia U_{ref} , es mayor que un valor umbral ε :

$$r = |U - U_{ref}| = \begin{cases} < \varepsilon & \text{el vector se acepta} \\ \geq \varepsilon & \text{el vector se rechaza} \end{cases} \quad (3.14)$$

Westerweel, (1994), analizó el funcionamiento del filtro de media (que considera el vector de referencia la media de los 8 vectores del entorno del analizado) y el filtro de mediana (que toma como vector de referencia a la mediana). Las conclusiones de este trabajo indican que el filtro de media es muy sensible a la presencia de un vector espurio en el entorno del punto analizado.

El filtro de mediana es mucho más robusto ante este fenómeno, y hoy en día es el más referenciado en la literatura como herramienta de postprocesado. El umbral de aceptación dependerá de las características del flujo, pero es habitual emplear un valor proporcional a la desviación típica de los vectores del entorno (eliminando p.ej. aquellos valores extremos para evitar la influencia de posibles vectores espurios), que suele establecerse entre 2 y 6 (LaVision, 2007a).

La correcta elección del umbral de detección es importante ya que un valor muy bajo puede etiquetar vectores correctos como espurios (si el umbral es muy bajo se puede reducir de un modo artificial la fluctuación de la velocidad en ese punto y por tanto su nivel de turbulencia); si por el contrario es muy alto, se tomarán vectores espurios como válidos. En función del flujo y de los parámetros a analizar, cometer un error de un tipo o de otro puede ser poco o muy importante (p.ej., tener algún vector erróneo en la determinación de la media de, digamos 500 vectores, es poco relevante).

Una variante de esta metodología fue propuesta por Westerweel y Scarano (2005). Estos autores presentan una versión normalizada de la expresión anterior que permite emplear un valor universal para el umbral de detección. Es decir, el valor de ε no dependería de las características del flujo.

- d) *Multiplicación de correlaciones.* Una forma de reducir el número de vectores anómalos consiste en aplicar el método propuesto por Hart (Hart, 1999; Hart, 2000) que consiste en multiplicar la función de correlación de dos zonas adyacentes para así obtener una nueva función de correlación con mayor amplitud. Como el ruido aleatorio no está correlacionado, el producto de ambas funciones únicamente reflejará el pico del desplazamiento que si lo está (Figura 3.47).

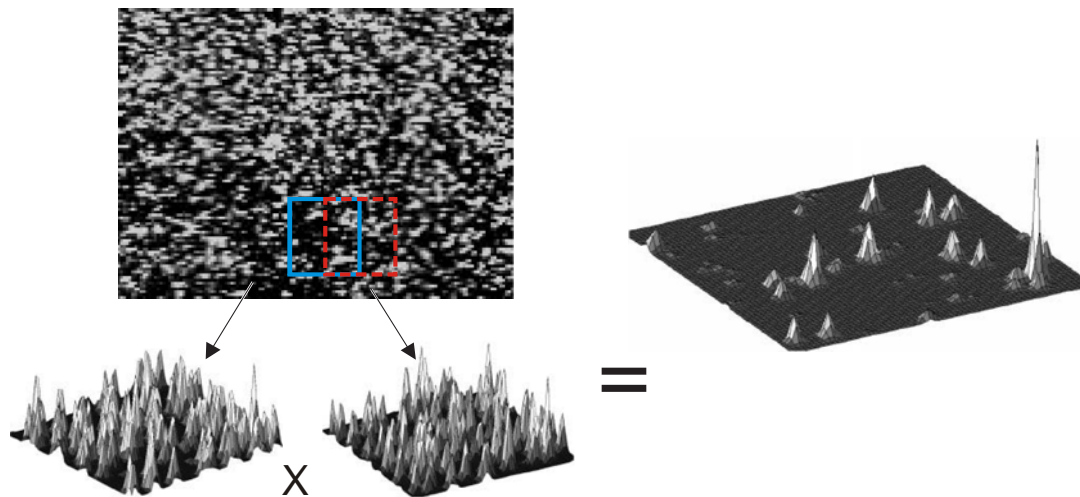


Figura 3.47. Eliminación de las anomalías multiplicando las correlaciones de dos zonas adyacentes. En el producto no aparecen las correlaciones aleatorias, mejorando la calidad de la determinación del desplazamiento (Hart, 200).

Los inconvenientes del método son el elevado tiempo de cálculo, la sensibilidad en zonas con bajo número de partículas y también la dificultad de asignar la posición al nuevo vector obtenido.

- e) *Otros métodos.* Otra forma de analizar la validez de los campos vectoriales es a través del análisis de las propiedades de la mecánica de los fluidos, p.ej. analizando la continuidad en un región, o con métodos más sofisticados como redes neuronales o a través de la simulación de estadísticos con alguna técnica *bootstrap* (Pun *et al.*, 2007).

Sustitución de datos incorrectos

Cuando el origen de los vectores anómalos es de tipo aleatorio se puede demostrar, si las condiciones experimentales son adecuadas (p.ej. una distribución uniforme de partículas), que su porcentaje asciende a un valor en torno al 5% del total de vectores (Westerweel, 1994). En estas condiciones, la distribución de los vectores espurios sigue una distribución binomial, y más de un 80% de los datos se puede recuperar con una sencilla interpolación lineal.

En otros casos, cuando p.ej. existen efectos en la imagen relacionados con una iluminación deficiente o una heterogeneidad en el dominio visualizado, los vectores anómalos tienden a aparece agrupados. En estas circunstancias será necesario emplear otro tipo de aproximaciones, como técnicas de interpolación gaussiana con ventanas adaptativas, para reconstruir la estructura del flujo (Raffel *et al.*, 2007).

3.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PIV DEL CITEEC-ETSECCP

En esta sección se describirán los componentes del equipo PIV disponible en las instalaciones del CITEEC-ETSECCP. En la Figura 3.48 se presenta un montaje tipo en un experimento llevado a cabo en el laboratorio de hidráulica de la Escuela de Caminos.

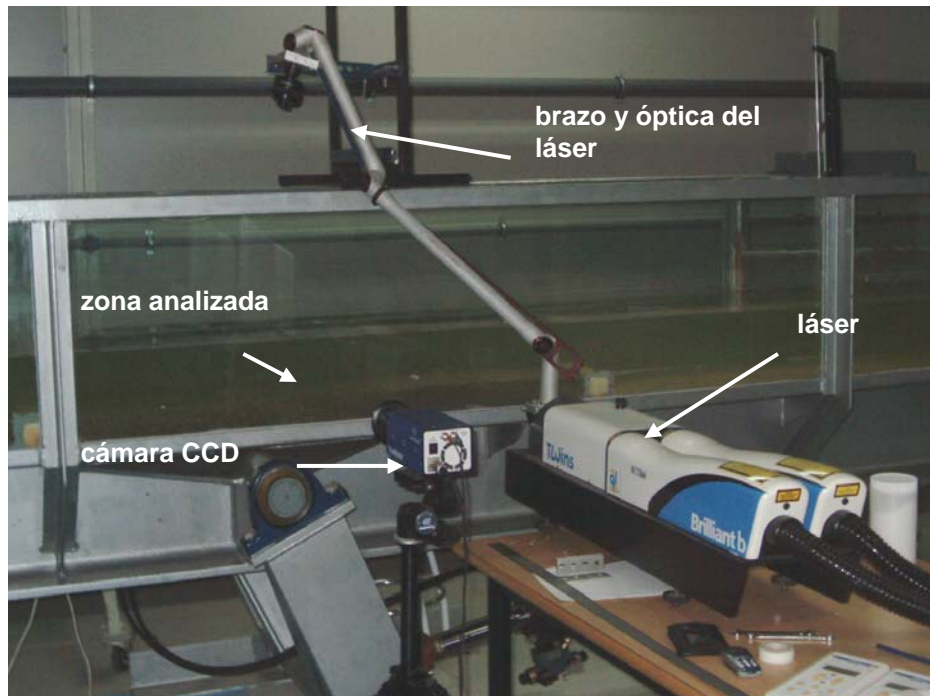


Figura 3.48 Montaje experimental del PIV en el canal de hidráulica de la ETSECCP.

El equipo, manufacturado por LaVision ©, está formado por dos fuentes láser Nd:YAG, dos cámaras y el equipo de adquisición. Para el control del proceso grabación y para la evaluación de las imágenes con los algoritmos de correlación cruzada se dispone del software DaVis© versión 7.254 proporcionado por LaVision ©.

Desde la adquisición del equipo, en el año 2001, se han realizado varias actualizaciones del mismo. En el proceso de actualización del sistema el doctorando ha participado activamente en el proceso de elección de la nueva configuración del equipo.

Así, en la actualidad, se dispone de una nueva cámara de mayor resolución (2 Mpx.) y frecuencia de adquisición, que permite realizar experimentos con la máxima frecuencia de las fuentes láser (10 Hz). Además, se ha actualizado el hardware de gestión y grabación, la unidad de control del sistema y el software de adquisición desde la versión 6.x a la 7.x. Como se comentó anteriormente (§3.2.), otra mejora ha sido la conversión del equipo en un sistema PIV-LIF, que ha permitido y permitirá trabajar en un mayor rango de aplicaciones de ingeniería hidráulica y ambiental (análisis de procesos de difusión y mezcla de contaminantes en modelos de emisarios submarinos o vertidos de desaladoras, flujos estratificados de intercambio o estudio de estructuras coherentes en flujos en lámina libre, entre otros).

A continuación se pasa a describir brevemente cada una de las partes del equipo empleado en la realización de esta Tesis Doctoral.

3.4.1. Fuentes láser

El equipo PIV dispone de un sistema de dos fuentes láser pulsada Nd:YAG Twins Brilliant B fabricadas por Quantel©. Las fuentes láser tienen emiten una luz en el espectro invisible a 1064 nm, que por medio de un generador armónico es doblada a una luz verde de 532 nm.

Cada fuente emite pulsos a una frecuencia constante de 10 Hz que se alinean un haz por medio de un sistema de espejos (ver Figura 3.22). La energía máxima de cada pulso de 532 nm es de ~350 mJ, aunque por el desgaste y las pérdidas producidas por el sistema óptico ésta se reduce ligeramente. Recientemente se ha medido la potencia real del sistema en unos ~270 mJ. La duración del pulso es de 6 ns.

El diámetro del haz láser a la salida de la mesa óptica es de unos ~7 mm, y, aunque la forma del mismo debería ajustarse a una distribución gaussiana, en realidad no es perfectamente circular. En la Figura 3.49 se presentan la forma de los haces láser medidos por el fabricante en el campo cercano con ayuda de un sensor especial, así como los patrones de los haces impresos sobre un papel especial fotosensible (*burning papers*).

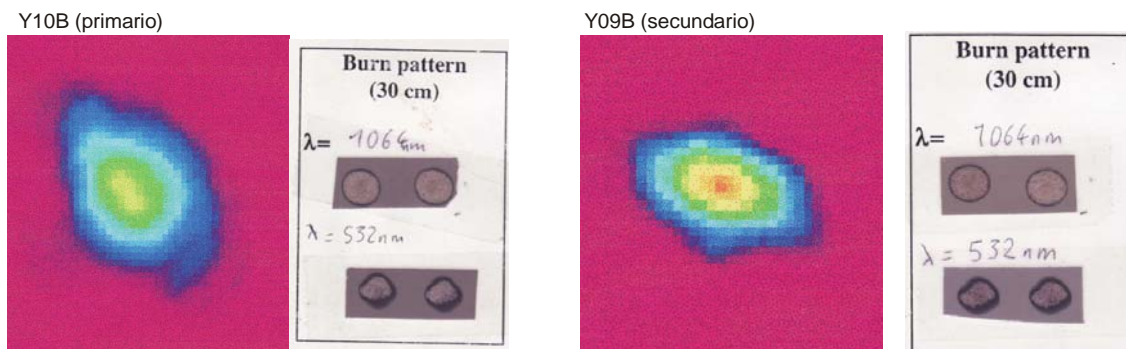


Figura 3.49 Forma de los haces láser en el campo cercano medida por el fabricante con ayuda de un sensor CCD especial y un papel fotosensible.

En el punto de salida del haz láser se ubica un brazo metálico articulado con espejos en los codos dirige el haz al punto de medida. En el extremo del brazo se dispone de una óptica especial que transforma el haz láser en un plano para la obtención de todo un campo en dos dimensiones (Figura 3.50).

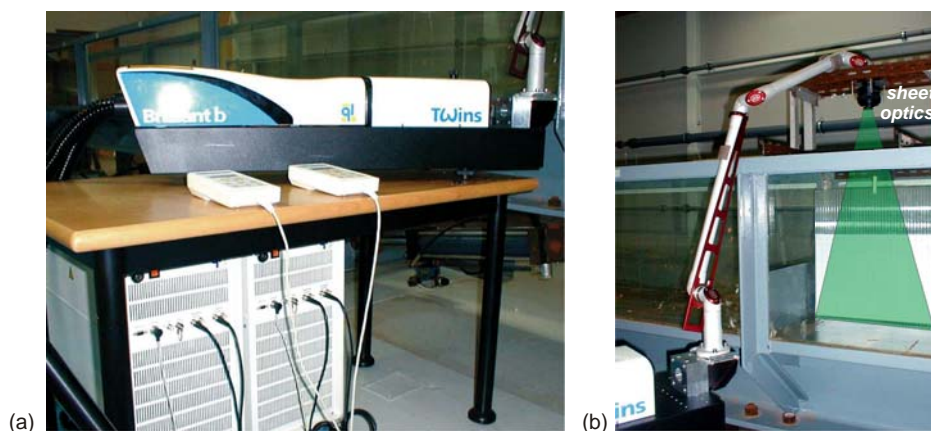


Figura 3.50. (a) Detalle de las fuentes láser y (b) del brazo articulado con el sistema óptico que forma el plano de luz.

Al disponer de dos fuentes gemelas, el tiempo entre cada disparo se puede programar con ayuda del software de adquisición, para así ajustar el desplazamiento de las partículas a los valores recomendados en las reglas de diseño de los montajes PIV (§3.3.4.1). El principal inconveniente de este montaje radica en que la alineación entre los dos haces nunca es perfecta, lo cual puede repercutir en la iluminación de la imagen y en la calidad de los campos vectoriales obtenidos (ver Capítulo 4.1 y 4.3).

3.4.2. Cámaras y sistema de adquisición

La adquisición de las imágenes en el sistema comercial de la UDC se realiza con una cámara digital fabricada por PCO©, aunque es distribuida por LaVision© bajo el nombre comercial de FlowMaster 3S (FM 3S). Esta cámara CCD permite adquirir imágenes en *double frame* (dos imágenes, una para cada disparo del láser) con una resolución de 1280x1024 px². La cámara trabaja en escalas de grises, con un rango dinámico de 12 bits ($2^8=4096$ niveles de gris). La frecuencia de grabación máxima de la cámara es de 8 Hz, que se reducen a la mitad cuando se trabaja en doble frame.



Figura 3.51. Detalle de la cámara CCD FlowMaster 3S© empleada en los experimentos.

La primera imagen que se toma no es transferida directamente al equipo de adquisición, sino que se almacena en la propia cámara. Tras un periodo de unos 0.4 ms (separación mínima entre dos frames, y por tanto, valor teórico mínimo del tiempo entre disparos de las fuentes láser), el sensor CCD vuelve a captar la luz del entorno durante un periodo de 125 ms. En este periodo de tiempo se debe producir el disparo de la fuente secundaria. Como el tiempo de exposición del segundo frame es mucho mayor que el del primero, la segunda imagen es necesariamente más clara.

El tiempo de transferencia (*read out*) del doble frame al sistema de adquisición es de unos 250 ms, valor que marca la frecuencia máxima de adquisición de la cámara. Como los tiempos entre disparo del láser son habitualmente del orden de 10 ms, solo es posible evaluar los

vectores en cada par de imágenes, y no entre diferentes pares (empleando el segundo frame del primer par y el primer frame del segundo⁶²).

El sensor CCD de la cámara tiene un tamaño de 8.6 x 6.9 mm², con pixels cuadrados de 6.7 x 6.7 μm². La principal limitación de la cámara FM 3S es que no permite aprovechar al máximo las fuentes láser disponibles. Así, el sistema láser tiene una frecuencia fija de 10 Hz (tiempo entre disparos de 100 ms), y la cámara tiene una frecuencia máxima de 8 Hz (aunque para doble frame se reduce a 4 Hz, o 250 ms). Si ambos sistemas tuviesen frecuencia fija, la máxima velocidad de adquisición sería de 2 Hz, pero como la frecuencia de la cámara se puede ajustar (siempre que entre cada par de imágenes pasen 250 ms), se pueden alcanzar ratios de grabación de 3.33 Hz. Es decir, la cámara toma una imagen cada 300 ms.

La óptica empleada ha sido un objetivo TAMROM con distancia focal variable 17–35 mm. Para tomar las imágenes PIV se debe colocar un filtro de 532 nm para recoger principalmente la luz del láser y evitar saturar (e incluso dañar) el sensor CCD.

Para sembrar el flujo se han empleado partículas redondeadas de poliamida de diámetro medio 50 μm de la casa DANTEC ©. El tamaño de las partículas oscila entre las 30 μm y las 70 μm, y su densidad relativa es de 1.03. Este tipo de partículas se han empleado con éxito en otros experimentos realizados por el GEAMA.

El sistema de adquisición está compuesto por una unidad externa que se encarga de sincronizar el funcionamiento de todos los componentes del sistema. Para que la adquisición de imágenes sea posible, esta unidad denominada *Programmable Time Unit* (PTU) debe ordenar a cada componente (cámara y fuentes de luz láser) que siga una secuencia determinada. Esta secuencia, denominada *trigger scheme*, es bastante estándar y se puede consultar en Raffel *et al.* (2007) o en Lavisson (2007b).

El software empleado ha sido el paquete Davis © en su versión 7.254. Este sistema permite realizar la evaluación con algoritmos de correlación cruzada, con ventanas de tamaño decreciente en varias pasadas (esquemas de refinamiento de malla). Además, en la última pasada también permite aplicar técnicas de deformación de la imagen con la reconstrucción de Whittaker. En el Capítulo 4 se presenta una descripción de la metodología y las opciones empleadas en la evaluación de imágenes de estos experimentos. En el manual de usuario (Lavisson, 2007b) se puede consultar información detallada sobre el resto de opciones del programa.

⁶² Esta estrategia de evaluación es habitual en los equipos de alta velocidad TR-PIV porque el tiempo de transferencia de la imagen es del orden del tiempo entre disparos del láser. Esta característica ha dado lugar a un sistema de evaluación de imágenes con algoritmos específicos de correlación cruzada denominados multiframe PIV. Hain, R. y Kähler, C.J. (2007). "*Fundamentals of multiframe particle image velocimetry (PIV)*." *Experiments in Fluids* 42: 575-587.

3.5. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Aanen, L. (2002). *Measurement of turbulent scalar mixing by means of a combination of PIV and LIF*. Laboratory of Aero-&Hydrodynamics, Delft University of Technology. PhD: 141 págs.
- Adrian, R.J. (1988). *Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow*. *Laser Anemometry in Fluid Mechanics*. D. F. G. Durao, R. J. Adrian, T. Asanuma, F. Durst y J. H. Whitelaw. Lisbon, Instituto Superior Técnico. III: 115-129 págs.
- Adrian, R.J. (1991). "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics." *Annual Review of Fluid Mechanics* 23: 261-304.
- Adrian, R.J. (1997). "Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry." *Measurement Science and Technology* 8: 1393-1398.
- Adrian, R.J., Christensen, K.T. y Liu, Z.C. (2000). "Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields." *Experiments in Fluids* 29(3): 275-290.
- Adrian, R.J. (2005). "Twenty years of Particle Image Velocimetry." *Experiments in Fluids* 39: 159-169.
- Amador, M., Sanchez-Juny, M., Dolz, J., Sánchez-Tembleque, F. y Puertas, J. (2004). *Velocity and pressure measurement in skimming flow in stepped spillways*. *Hydraulics of Dams and River Structures*. Yazdandoost y Atari. Iran, Taylor & Francis: 279-289 págs.
- Angele, K.P. y Muhammad-Klingmann, B. (2005). "A simple model for the effect of peak-locking on the accuracy of boundary layer turbulence statistics in digital PIV." *Experiments in Fluids* 38: 341-347.
- Anta, J., Peña, E., Puertas, J. y Vázquez, V. (2005). *Hydrodynamic analysis of cockles threshold movement using laser technologies (PIV)*. XXXI IAHR Congress, Seoul (South Korea).
- Anta, J., Peña, E. y Puertas, J. (2007a). "Análisis hidrodinámico del arrastre del berberecho *Cerastoderma edule* de los Lombos do Ulla." *Revista Real Academia Galega das Ciencias* XXVI: 53-90.
- Anta, J., Peña, E., Sánchez-Tembleque, F. y Puertas, J. (2007b). *An experimental study of a two-layer flow above a submarine sill using PIV*. XXXII IAHR Congress. Venice, IAHR: 11 págs.
- Astarita, T. (2006). "Analysis of interpolation schemes for image deformation methods in PIV: effect of noise on the accuracy and spatial resolution." *Experiments in Fluids* 40: 977-987.
- Astarita, T. (2009). "Adaptative space resolution PIV." *Experiments in Fluids* in press.
- Brücker, C. y Bleckman, H. (2007). "Vortex dynamics in the wake of a mechanical fish." *Experiments in Fluids* 43: 799-810.
- Christensen, K.T. (2004). "The influence of peak-locking errors on turbulence statistics computed from PIV ensembles." *Experiments in Fluids* 36: 484-497.
- Day, S.W., Higham, T.E. y Wainwright, P.C. (2007). "Time resolved measurements of the flow generated by suction feeding fish." *Experiments in Fluids* 43: 713-724.
- Djenidi, L., Antonia, R.A., Amielh, M. y Anselmet, F. (2008). "A turbulent boundary layer over a two-dimensional rough wall." *Experiments in Fluids* 44(37-47).
- Elsinga, G.E. (2008). *Tomographic particle image velocimetry and its application to turbulent boundary layers*. Delft, T.U. Delft. PhD Dissertation: 154 págs.
- Falchi, M. y Romano, G.P. (2009). "Evaluation of the performance of high-speed PIV compared to standard PIV in a turbulent jet." *Experiments in Fluids* 2009(in press): 18.
- Fincham, A. y Delerce, G. (2000). "Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithms." *Experiments in Fluids* Suppl: 13-22.
- Geisler, R. (2007). *Volume Resolving PIV. Fundamentals of Tomographic PIV. Lecture Notes. Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice*. Göttingen, DLR
- González, R.C., Woods, R.E. y Eddins, S.L. (2009). *Digital Image Processing Using Matlab*. Gatesmark Publishing
- Hain, R. y Kähler, C.J. (2007). "Fundamentals of multiframe particle image velocimetry (PIV)." *Experiments in Fluids* 42: 575-587.

- Hain, R., Kähler, C.J. y Tropea, C. (2007). "Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras." *Experiments in Fluids* 42: 403-411.
- Hart (2000). "PIV error correction." *Experiments in Fluids*(13-22).
- Hart, D.P. (1999). "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation." *Journal of Visualization* 10: 1-10.
- Hedenström, A., Johansson, L.C., Wolf, M., von Busse, R., Winter, Y. y Sepedding, G.R. (2007). "Bat Flight Generates Complex Aerodynamic Tracks." *Science* 396: 894-897.
- Hedenström, A., Mujres, F.T., von Busse, R., Johansson, L.C., Winter, Y. y Spedding, G.R. (2009). "High-speed stereo DPIV measurement of wakes of two bat species flying freely in a wind tunnel." *Experiments in Fluids* 46: 923-932.
- Hill, D.F. y Younkin, B.D. (2006). "PIV measurements of flow in and around scour holes." *Experiments in Fluids* 41: 295-307.
- Huang, H.T., Fielder, H.F. y Wang, J.J. (1993a). "Limitation and improvement of PIV, Part I: Limitation of conventional techniques due to deformation of particle patterns." *Experiments in Fluids* 15: 168-174.
- Huang, H.T., Fielder, H.F. y Wang, J.J. (1993b). "Limitation and improvement of PIV, Part II: Particle image distortion, a novel technique." *Experiments in Fluids* 15: 263-273.
- Hubel, T.Y., Hristov, N.I., Swartz, S.M. y Breuer, K.S. (2009). "Time-resolved wake structure and kinematics of bat flight." *Experiments in Fluids* 46: 933-943.
- Jae Kim, B. y Jin Sung, H. (2006). "A further assesment of interpolation schemes for windows deformation in PIV." *Experiments in Fluids* 41: 499-511.
- Johansson, P. y Naughtin, J. (2006). *Experimental Fluid Mechanics*. Department of Applied Mechanics. Chalmers University of Technology. 104.
- Jung, K.H., Chang, K.-A. y Huang, E.T. (2004). "Two-dimensional flow characteristics of wave interactions with a fixed rectangular structure." *OCean Engineering* 31: 975-998.
- Kähler, C.J. (2004). *The significance of coherent flow structures for the turbulent mixing in wall-bounded flows*. Göttingen, Georg-August Universität. PhD Degree: 185 págs.
- Kähler, C.J. (2007). *Principles of Advanced Evaluation Methods. Lecture Notes. Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice*. . Göttingen, DLR
- Keane, R.D. y Adrian, R.J. (1990). "Optimization of particle image velocimeters. Part I: Doubled Pulsed Systems." *Measurement Science and Technology* 1: 1202-1215.
- Keane, R.D. y Adrian, R.J. (1992). "Theory of cross-correlation analysis of PIV images." *Applied Science Resources* 49: 191-215.
- Lauder, G.V. y Madden, P.G.A. (2007). "Fish locomotion: kinematics and hydrodynamics of flexible foil-like fins." *Experiments in Fluids* 43: 641-653.
- LaVision (2007a). *FlowMaster. DaVis 7.2 Product Manual*. Göttingen (Germany), LaVision: 205 págs.
- LaVision (2007b). *FlowMaster. Sheet Optics Manual*. Göttingen (Germany), LaVision: 16 págs.
- LaVision (2009). *Programing DaVis. Advanced Batch Proccesing Seminar. Lecture Notes*. Göttingen, Lavision
- Lecordier, B. y Westerweel, J. (2004). *The EUROPIV Synthetic Image Generator (S.I.G.)*. en *Particle Image Velocimetry: recent Improvements. Proc. of the EUROPIV2 workshop*. M. Stanislas, J. Westerweel y J. Kompenhans. Zaragoza, Springer: 145-161.
- Li, F.C., JKawaguchi, Y., Segawa, T. y Suga, K. (2005). "Simultaneous measurement of turbulent velocity field and surface wave amplitude in the initial stage of an open-channel flow by PIV." *Experiments in Fluids* 39: 945-953.
- Liao, Q. y Botsma, H.A. (2009). *In Situ Measurements of Hydrodynamics on Environmental Interfaces Using an Underwater Miniature Particle Image Velocimeter (UWMPIV)*. 33rd IAHR Congress: *Water Engineering for a Sustainable Environment*. Vancouver, IAHR: 2304-2310 págs.
- Lim, T.T. (2000). *Dye and Smoke Visualization*. Cap. 3 en *Flow Visualization. Techniques and Examples*. A. J. Smits y T. T. Lim. London, Imperial College Press: 43-72.

- Lin, J., Foucat, J.-M., Lavat, J.-P., Peérenne, N. y Stanislas, M. (2008). *Assesment of diferent SPIV processing methods for an application to near-wall turbulence.* en *Particle Image Velocimetry. New Developments and Recent Applications.* A. Schröder y C. E. Willert. Berlin, Springer: 191-221.
- McKeon, B.J., Comte-Bellot, G., Foss, J.F., Westerweel, J., Scarano, F., Tropea, C., Meyers, J.F., Lee, J.W., Cavone, A.A., Schodi, R., Koochesfahani, M.M., Anderopoulos, A., Dahm, W.J.A., Mullin, J.A., Wallace, M., Vukoslavcevic, P.V., Morris, S.C., Pardykas, E.R. y Cuerva, A. (2007). *Velocity, Vorticity and Mach number. (Particle Based Techniques: Particle Image Velocimetry).* Cap. 5.(3.3) en *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics.* C. Tropea, A. L. Yarin y J. F. Foss. Berlin, Springer: 309-342.
- Merzkich, W. (2007). *Flow Visualization.* Cap. 11 en *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics.* C. Tropea, A. L. Yarin y J. F. Foss. Berlin, Springer: 857-870.
- Metha, R.D., Bell, J.H., Reda, D.C., Wilder, M.C., Zilliac, G.G. y Driver, D.M. (2000). *Pressure and shear sensitive coatings.* Cap. 8 en *Flow Visualization. Techniques and Examples.* A. J. Smits y T. T. Lim. London, Imperial College Press: 169-203.
- Mouriño, N. (2007). *Estudio experimental en modelo reducido de una escala de peces tipo rampa rugosa. Proyecto Técnico.* Universidade da Coruña. A Coruña
- Nobach, H. y Bodenschatz, E. (2009). "Limitations of accuracy in PIV due to individual variations of particle image intensities." *Experiments in Fluids* in press: 12.
- Peña, E. (2002). *Estudio numérico-experimental del transporte de sedimentos en cauces aluviales. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente.* A Coruña, University of A Coruña. PhD Dissertation
- Peña, E., Anta, J., Puertas, J. y Teijeiro, T. (2008a). "Estimation of Drag Coefficient and Settling Velocity of the Cockle *Cerastoderma edule* Using Particle Image Velocimetry." *Journal of Coastal Research* 24 (4C): 150-158.
- Peña, E., Fe, J., Sánchez-Tembleque, F., Puertas, J. y Cea, L. (2008b). "Experimental validation of a sediment transport two-dimensional depth-averaged numerical model using PIV and 3D Scanning technologies." *Journal of Hydraulic Research* 46(4): 489-503.
- Perry, A.E. y Chong, M.S. (2000). *Interpretation of Flow Visualization.* Cap. 1 en *Flow Visualization. Techniques and Examples.* A. J. Smits y T. T. Lim. London, Imperial College Press: 1-26.
- Poelma, C. (2004). *Experiments in particle-laden turbulence. Simultaneous particle/fluid measurements in grid-generated turbulence using particle image velocimetry.* Delft, TU Delft. PhD Dissertation: 113 págs.
- Poelma, C., Dickinson, W.B. y Dickinson, M.H. (2006). "Time-resolved reconstruction of the full velocity field around a dynamically-scaled flapping wing." 41(231-225).
- Poelma, C. y Westerweel, J. (2007). *Spatial Correlation Analysis: Fundamentals and Data Validation. Lecture Notes. Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice.* Göttingen, DLR
- Poelma, C., Vennemann, P., Lindken, R. y Westerweel, J. (2008). "In vivo blood flow and wall shear stress measurements in the vitelline network." *Experiments in Fluids* 45: 703-713.
- Poelma, C., Van der Heiden, K., Hierck, B.P., Poelmann, R.E. y Westerweel, J. (2009). "Measurement of the wall shear stress distribution in the outflow tract of an embryonic chicken heart." *Journal of the Royal Society* in press: 13.
- Pun, C.S., Susanto, A. y Dabiri, D. (2007). "Mode-ratio bootstrapping method for PIV outlier correction." *Measurement Science and Technology* 18: 3511-3522.
- Radice, A., Malavasi, S. y Ballio, F. (2006). "Solid transport measurements through image processing." *Experiments in Fluids* 41: 721-734.
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S. y Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry. A practical guide.* Berlin, Springer. 448 págs.
- Sánchez-Tembleque, F. (2002). *Análisis de campos de velocidades con la tecnología PIV. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente.* A Coruña, Universidade da Coruña. Trabajo de Investigación Tutelado: 112 págs.
- Scarano, F. y Riethmuller, M.L. (1999). "Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset." *Experiments in Fluids* 26: 513-523.

- Scarano, F. y Riethmuller, M.L. (2000). "Advances in iterative multigrid PIV image processing." Experiments in Fluids Suppl: S51-S60.
- Scarano, F. (2002). "Iterative image deformation methods in PIV." Measurement Science and Technology 13: R1-R19.
- Scarano, F. y Poelma, C. (2009). "Three-dimensional vorticity patterns of cylinder wakes." Experiments in Fluids 47: 69-83.
- Schröder, A., Kompenhans, J. y Goldhahn, E. (2005). *Current topics in experimental transonic aerodynamics. Particle Image Velocimetry in transonic flows. Advanced Measurement Techniques for Supersonic Flows. Von Kármán Institute Lecture Series*. Brussels, Von Kármán Institute: 1-15 págs.
- Schröder, A. y Willert, C.E., Eds. (2008). *Particle Image Velocimetry. New Developments and Recent Applications*. Topics in Applied Physics. Berlin, Springer. 512 págs.
- Smith, C.R., Seal, C.V., Praisner, T.J. y Sabatino, D.R. (2000). *Hydrogen Bubble Visualization*. Cap. 2 en *Flow Visualization. Techniques and Examples*. A. J. Smits y T. T. Lim. London, Imperial College Press: 27-42.
- Smits, A.J. y Lim, T.T., Eds. (2000). *Flow Visualization. Techniques and Examples*. London, Imperial College Press. 396 págs.
- Stanislas, M., Okamoto, K. y Kähler, C.J. (2003). "Main results of the first PIV challenge." Measurement Science and Technology 14: R63-R89.
- Stanislas, M., Okamoto, K., Kähler, C.J. y Westerweel, J. (2005). "Main Results of the Second PIV Challenge." Experiments in Fluids 39: 170-191.
- Stanislas, M., Hirsch, K., Poelma, C., Willert, C.E., Kähler, C.J., Ehrenfried, K., Geisler, R., Kompenhans, J. y Schröder, A. (2007). *Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice. Lecture Notes*. Göttingen, DLR
- Stanislas, M., Okamoto, K., Kähler, C.J., Westerweel, J. y Scarano, F. (2008). "Main results of the third international PIV challenge." Experiments in Fluids 47: 27-71.
- Theunissen, R., Scarano, F. y Riethmuller, M.L. (2007). "An adaptive sampling and windowing interrogation method in PIV." Measurement Science and Technology 18: 275-287.
- Theunissen, R., Scarano, F. y Riethmuller, M.L. (2008). "On improvements of PIV image interrogation near stationary interfaces." Experiments in Fluids 2008(45): 557-572.
- Tian, X. (2002). *3DLIF and its applications to studies of the near field mixing in wastewater discharges*. Georgia, Georgia Institute of Technology. PhD Dissertation
- Tian, X., Roberts, P.J.W. y Daviero, G.J. (2004). "Marine wastewater discharges from multipoint diffusers I: Unstratified stationary water." Journal of Hydraulic Engineering 130(12): 1137-1146.
- Tritico, H.M., Cotel, A.J. y Clarke, J.N. (2007). "Development, testing and demonstration of a portable submersible miniature particle imaging velocimetry device." Measurement Science and Technology 18: 2555-2562.
- Tropea, C., Yarin, A.L. y Foss, J.F., Eds. (2007). *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer Handbooks. Berlin, Springer. 1557 págs.
- van Doorne, C.W.H. y Westerweel, J. (2007). "Measurement of laminar, transitional and turbulent pipe flow using Stereoscopic PIV." Experiments in Fluids 42: 259-279.
- Van Dyke, M.D. (1982). *An album of fluid motion*. Parabolic Press. 176 págs.
- Vollmers, H. (2001). "Detection of vortices and quantitative evaluation of their main parameters from experimental velocity data." Measurement Science and Technology 12: 1199-1207.
- Weitbrecht, V., Kühn, G. y Jirka, G.H. (2002). "Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows." Flow Measurement and Instrumentation 13: 273-245.
- Wereley, S. y Meinhart, C.D. (2001). "Second-order accurate particle image velocimetry." Experiments in Fluids 2001: 258-268.
- Westerweel, J. (1993a). *Analysis of PIV interrogation with low pixel resolution. SPIE-2005. Optical Diagnostics eun Fluid and Thermal Flow*. S. S. Cha y J. D. Trolinger. San Diego: 624-635 págs.

- Westerweel, J. (1993b). *Digital Image Velocimetry. Theory and Applications*. Delft, TU Delft. PhD Dissertation
- Westerweel, J. (1994). "Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data." *Experiments in Fluids* 16: 236-247.
- Westerweel, J. (1997). "Fundamentals of digital particle image velocimetry." *Measurement Science and Technology* 8: 1379-1392.
- Westerweel, J., Dabiri, D. y Gharib, M. (1997). "The effect of discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV-recordings." *Experiments in Fluids* 23: 20-28.
- Westerweel, J. (2000). "Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry." *Experiments in Fluids* 29: S3-S12.
- Westerweel, J. y Scarano, F. (2005). "Universal outlier detection for PIV data." *Experiments in Fluids* 39: 1096-1100.
- Willert, C.E. y Gharib, M. (1991). "Digital particle image velocimetry." *Experiments in Fluids* 10: 181-193.
- Willert, C.E. (1997). "Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows." *Measurement Science and Technology* 8(1465-1479).
- Willert, C.E. (2006). "Assesment of camera models for use un planar velocimetry calibration." *Experiments in Fluids* 41: 135-146.
- Willert, C.E. (2007a). *Digital PIV Recording. CCD and CMOS. Lecture Notes. Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice*. Göttingen, DLR
- Willert, C.E. (2007b). *Calibration Procedures for Stereoscopic PIV. Lecture Notes. Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice*. . Göttingen, DLR
- Willert, C.E. (2007c). *Vector Field Operators for PIV. Lecture Notes. Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice*. . Göttingen, DLR

ANÁLISIS DEL ARRASTRE

BERBERECHO *Cerastoderma edule*



En este capítulo se presenta la problemática de la mortalidad y arrastre de los stocks de berberecho en el banco marisquero de los Lombos do Ulla. Con objeto demostrar la relación entre la hidrodinámica y la estructura de las comunidades bentónicas se ha realizado una revisión del estado del conocimiento que recoge los principales trabajos sobre la movilización de esta clase de moluscos. A continuación se describirá la metodología experimental y los principales resultados de los ensayos realizados en un canal de recirculación. En los ensayos, se ha analizado la influencia de varios factores como el tamaño y distribución de los berberechos en el proceso de arrastre, y su relación con los parámetros hidrodinámicos descriptores del flujo.

Fotografía de Portada:

Berberecho C. edule extendiendo los sifones en un acuario. Fotografía de Brian Spencer/ JNCC (publicada en MarLIN Web site, <http://www.marlin.ac.uk>).

4. ANÁLISIS DEL ARRASTRE DEL BERBERECHO *C. edule*

4.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Una de las principales fuentes de ingresos de la economía de las villas costeras gallegas reside en las actividades de pesca y marisqueo. Así, las actividades de marisqueo tradicional emplean a más 10000 mariscadores en todo Galicia que extraen entre 6000 y 12000 toneladas anuales de marisco (datos correspondientes al periodo 1997-2008, ver Figura 4.1).

Una de las principales especies en Galicia es el berberecho *Cerastoderma edule*, con un porcentaje cercano al 50% de todas las extracciones de bivalvos. En el periodo de los últimos años (2004-2008), el volumen de extracción medio de berberecho representó el 44% del total de moluscos extraídos de los bancos naturales gallegos. Este porcentaje representa el 24% del importe de las ventas de moluscos en este periodo, que ascienden en total a unos 70 millones de euros anuales.

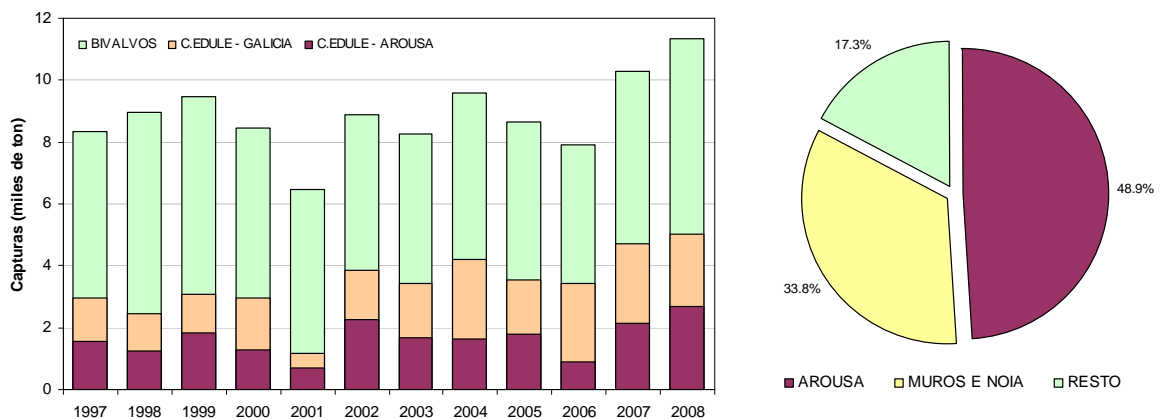


Figura 4.1. Evolución de las extracciones de moluscos bivalvos y del berberecho *C. edule* en Galicia y en la ría de Arousa (izquierda) y distribución de capturas del berberecho en el período 1997-2008 (derecha). Datos extraídos de la Plataforma Tecnológica de Pesca, www.pescadegalicia.com

En la Figura 4.2 se presentan los datos de capturas y el importe de las ventas de los principales moluscos gallegos. Se puede apreciar que aunque el berberecho es el molusco más importante en términos de extracción, las variedades de almeja babosa (*Venerupis senegalensis*), fina (*Ruditapes decussatus*) y japonesa (*Ruditapes philippinarum*) poseen una importancia económica similar a la del berberecho. Se puede indicar que estas cuatro especies, junto con la coquina (*Donax trunculus*) y el percebe (*Pollicipes pollicipes*), representan las seis especies marisqueras más importantes de la costa gallega (Molares *et al.*, 2008).

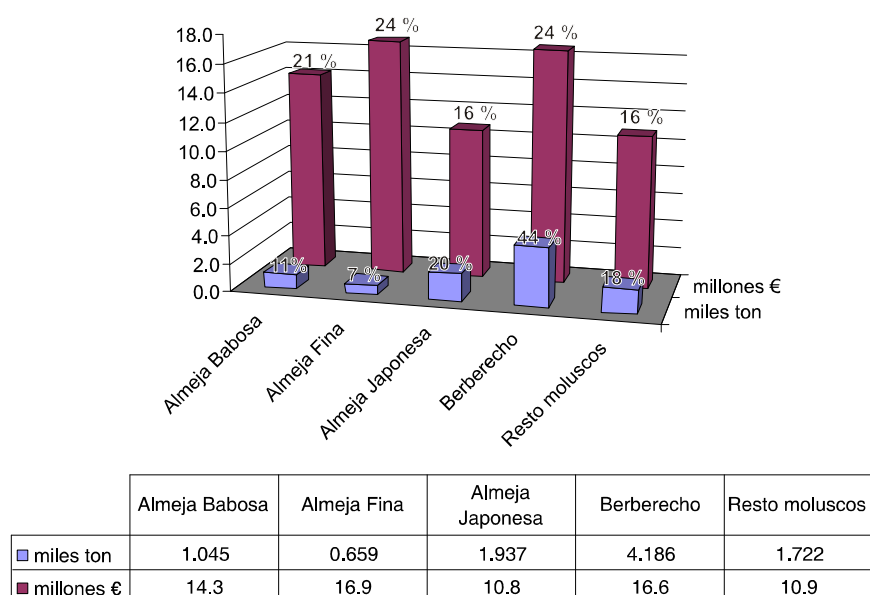


Figura 4.2. Volumen e importe de las ventas medios anuales de los principales moluscos extraídos en los bancos naturales gallegos en los últimos 5 años (2004-2008). Datos extraídos de www.pescadegalicia.com

En este trabajo se analizará la movilización del berberecho *C. Edule* de la Ría de Arousa bajo diferentes velocidades, grados de reclutamiento y para moluscos de tamaño superior a los 15 mm. Este trabajo se puede considerar como una continuación de una primera fase de experimentos de arrastre de berberechos en los que participó el autor de esta Tesis Doctoral en el seno del Grupo de Enxeñaría do Auga e do Medio Ambiente –GEAMA– (ver Anta *et al.*, 2005; Anta, 2006; Anta *et al.*, 2007 y Peña *et al.*, 2008). Los trabajos más relevantes se han incluido en el Apéndice 1.

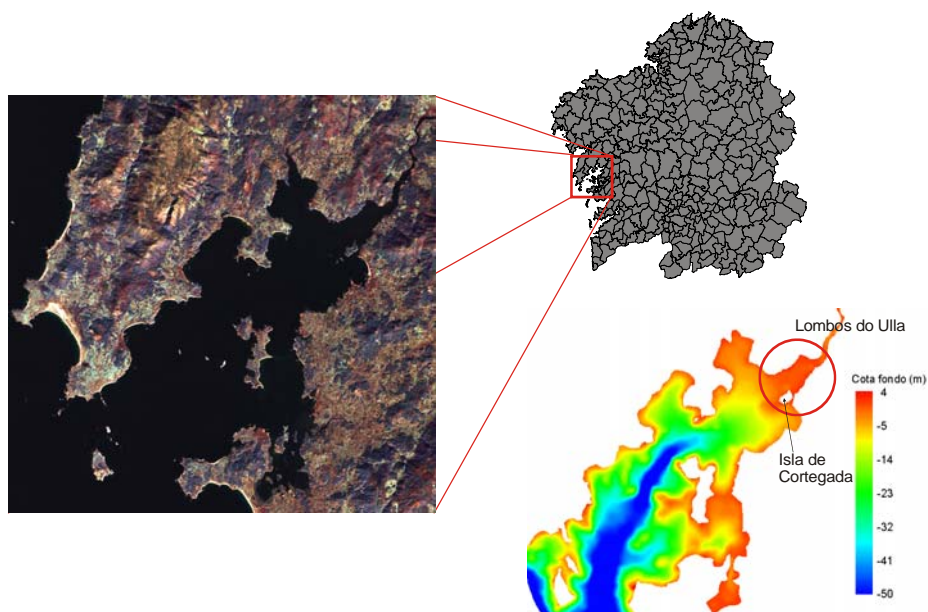


Figura 4.3. Situación y batimetría de la Ría de Arousa. En la desembocadura, conocida como Os Lombos do Ulla, se encuentra uno de los bancos de berberecho más importantes de Galicia.

Cómo se puede apreciar en la Figura 4.1, la zona de la ría de Arousa es una de las mayores productoras de berberecho de Galicia, con unas capturas cercanas al 50% en el período 1997-2008. Esta ría se sitúa entre las provincias de Coruña y Pontevedra, en Galicia, y pertenece a las llamadas “Rías Baixas”, desembocando en el océano Atlántico (Figura 4.3). Se trata de la más extensa de las rías gallegas, con 230 Km², una longitud de 33 km y ancho muy variable, con varias ensenadas e incluso islas interiores que complican el estudio de la hidrodinámica. Los calados son relativamente altos a lo largo del cauce principal, con valores próximos a los 60 metros en la zona cercana al océano, pero hay varias zonas, entre ellas la de la desembocadura, con calados bajos, muy sensibles al efecto de la marea y que se secan periódicamente.

En el contacto río-mar de la ría de Arousa, la desembocadura del río Ulla, se encuentra una zona de sedimentación de arenas conocida como los Lombos do Ulla. Esta zona, caracterizada por la presencia de formas de fondo (ver Figura 4.4), es uno de los bancos de marisqueo más importante del área de Arousa, y por extensión, de Galicia. La hidrología de la desembocadura está dominada por el ciclo mareal, con una carrera de marea CM ~ 4.3 m, y por el régimen de caudales aportado por el río Ulla.

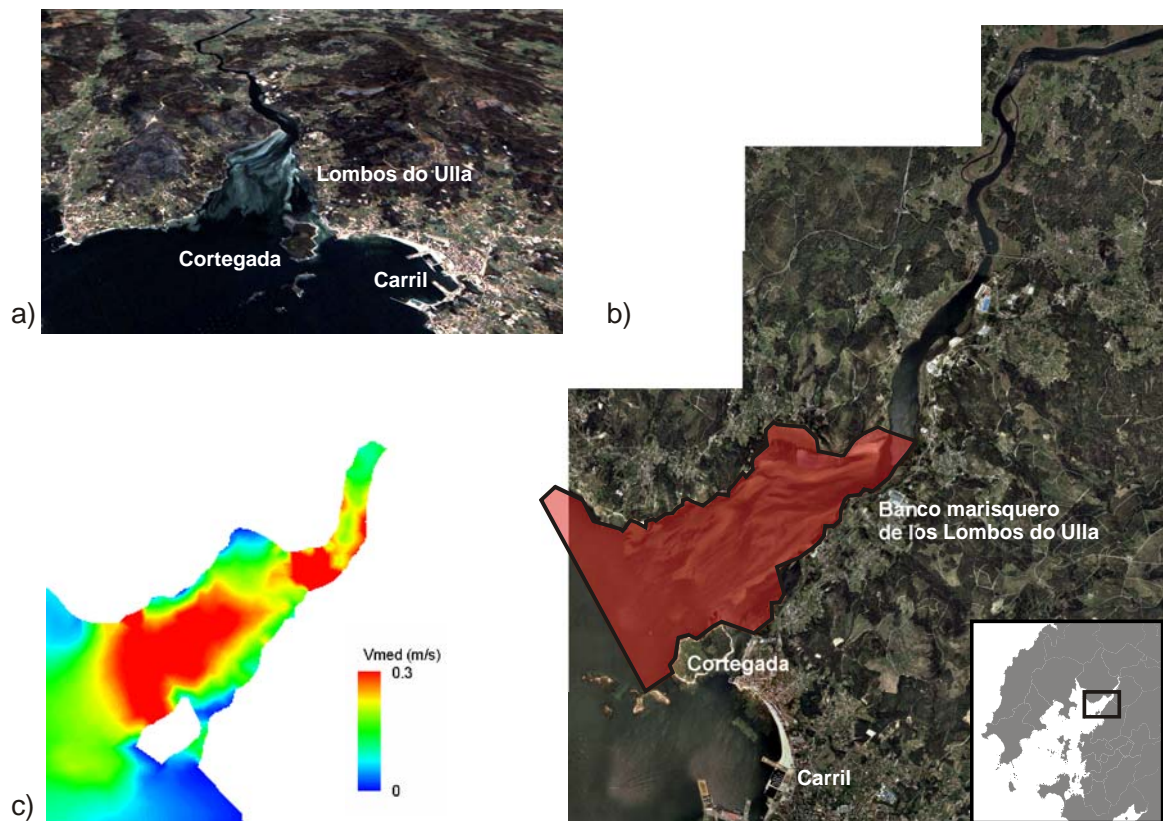


Figura 4.4. a) Perspectiva del banco de berberechos y almeja fina de Os Lombos do Ulla, b) Fotografía satélite del mismo y c) velocidades medias para un caudal de 60 m³/s y bajamar máxima. La fotografías han sido proporcionadas por los laboratorios Videalab y CartoLab de la Escuela de Caminos y los datos de velocidades son de Cea et al. (2009).

El banco marisquero de los Lombos do Ulla cuenta con una superficie de 1134.7 ha y puede dividirse en dos áreas. La zona situada al norte y noroeste de Cortegada presenta fondos

arenosos y una batimetría de +1 a -1 m sobre el NMM en el 91% de la superficie. La zona situada al noroeste de Cortegada presenta fondos de naturaleza fangosa, con profundidades de 2 a 4 m en el 90.4% de su superficie (Parada *et al.*, 2006).

De hecho, la Ría de Arousa es una de las rías más heterogéneas en cuanto a su composición sedimentaria (Vilas *et al.*, 2005). La parte más interna y profunda de la ría está cubierta de fangos con diferentes contenidos en arena y grava. Una característica de los lechos fangosos es que contienen grandes cantidades de biodeposiciones de los mejillones cultivados en el interior de la ría. En la parte más externa, los fangos se encuentran únicamente en el canal de la ría (ver Figura 4.5).

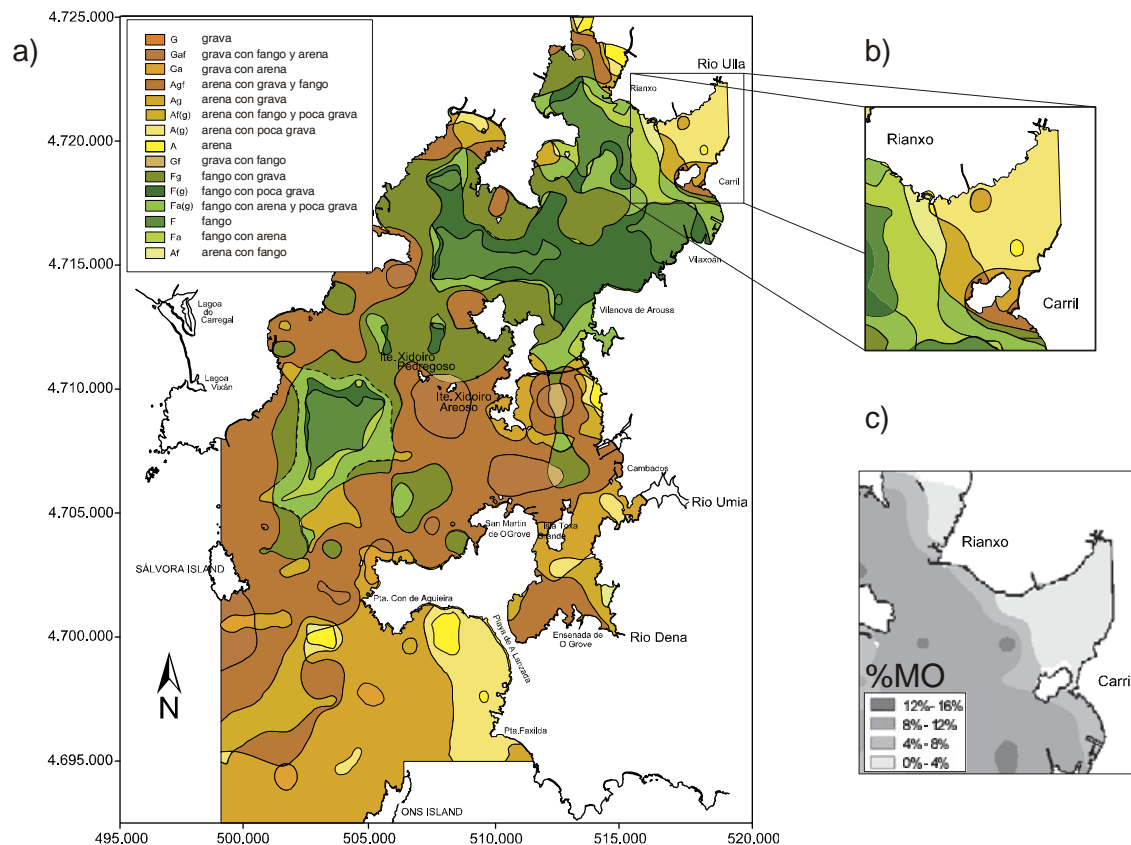


Figura 4.5. a) Distribución de la textura sedimentaria superficial en la ría de Arousa, b) detalle del banco de los Lombos do Ulla y c) distribución del contenido en materia en el mismo (Vilas *et al.*, 2005).

En el banco de los Lombos, en la parte más interior predomina la arena con grava, con bajos contenidos en materia orgánica, $MO \leq 4\%$. En la parte más profunda, la textura es fangosa, con mayores contenidos en MO. Entre las dos superficies, existe una zona de transición arenoso-fangosa.

Si se analiza la serie histórica de capturas desde 1960 del berberecho, representada en la Figura 4.6, se puede observar cómo se han producido un importante descenso a partir de los años 80. Así, en el periodo 1960-1977 el promedio de capturas medio se cifró en 11850 ton/año. En 1978 se produjo un descenso brusco hasta alcanzar unos valores mínimos en 1985. A partir de esta fecha, las extracciones se han estabilizado en el entorno de las 2000 a 4000 toneladas por año

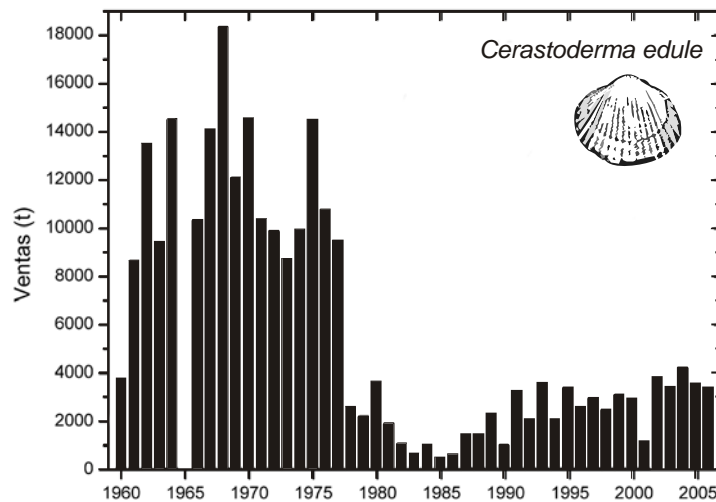


Figura 4.6. Evolución de la venta de berberecho en Galicia según las estadísticas oficiales (Molares *et al.*, 2008).

Como se señalará posteriormente, las poblaciones de berberecho sufren elevadas mortalidades asociadas a los descensos de salinidad. En la Ría de Arousa, cuando las fuertes lluvias asociadas a los vientos de componente Sur coinciden con mareas muertas, que dificultan la mezcla y renovación del agua del mar en la desembocadura, provocan fuertes descensos de salinidad (Casteleiro *et al.*, 2006; Navarrina *et al.*, 2008). En numerosas ocasiones coincide con episodios de mortalidad de moluscos (Parada *et al.*, 2007; Molares *et al.*, 2008). En estos eventos se han producido inundaciones y riadas, como las del año 2001.

Otro factor que afecta a la cantidad de berberechos extraídos son los fenómenos densodependientes. Es decir, grandes densidades de berberechos adultos pueden reducir el asentamiento de las larvas por ingestión y la viabilidad de los juveniles fijados por bioturbación (Andre *et al.*, 1993; de Montaudouin y Bachelet, 1996). En el mar de Wadden (Dinamarca), se han detectado descensos en la producción del berberecho *C. edule* 3 años después de un año con una fuerte fijación de estos moluscos (Beukema y Dekker, 2006; citados por Molares *et al.*, 2008).

La reducción reciente en la extracción de bivalvos, especialmente tras las riadas del año 2001, propició la puesta en marcha de un plan de recuperación por parte de la Xunta de Galicia de Los Lombos do Ulla en el año 2003. Desde entonces, se han realizado varios trabajos para analizar las causas de la elevada mortandad de los bivalvos así como un fuerte programa de muestreo de los stocks de moluscos de la ría (Parada *et al.*, 2006).

Las principales conclusiones de estos trabajos señalan como causantes de este fenómeno los fuertes cambios de salinidad que se producen tras los aguaceros más intensos y los cambios en la hidrodinámica de las zonas de marisqueo. Así, las caídas de producción de berberecho en 2001 coinciden con las grandes riadas producidas en este año, y el descenso de 2006 se puede asociar a fenómenos densodependientes. También se ha constatado que en la ría de Arousa, los fenómenos de descenso de berberechos están inversamente correlacionados con la precipitación caída durante el ciclo de vida del molusco, hasta que este alcanza una talla

comercial⁶³. Además, el descenso de las ventas en los eventos de elevada precipitación parece amortiguarse con la distancia a la desembocadura del río (Figura 4.7).

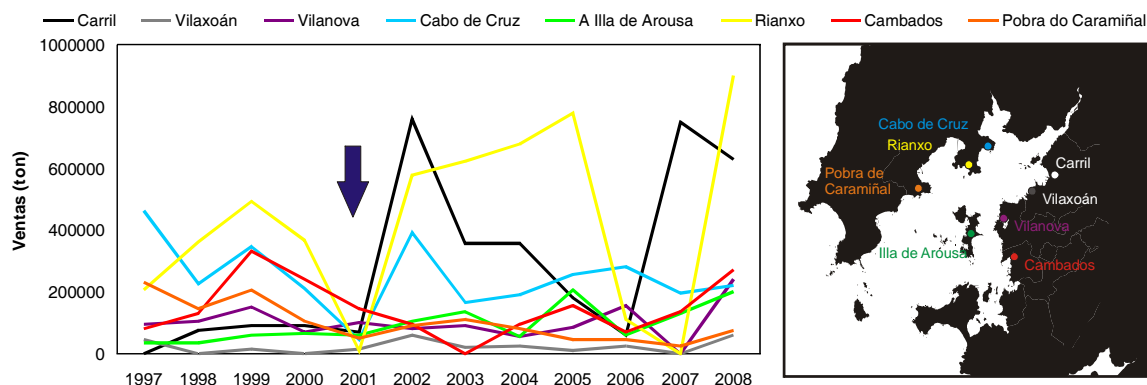


Figura 4.7. Efecto de las riadas de 2000 y 2001 sobre las capturas de berberecho en las principales lonjas de la Ría de Arousa (adaptado de Morales et al. 2008).

La elevada mortalidad de los berberechos en la desembocadura del Ulla es un problema complejo. Existen varios informes internos de la Consellería de Pesca y Asuntos Marítimos y los trabajos de José Molares y José Manuel Parada del Centro de Investigaciones Mariñas, CIMA, que relacionan la mortalidad con los episodios de lluvias extremas y grandes caudales en el río Ulla. Algunos informes han documentado los principales episodios de mortalidad de berberecho y almeja en las últimas dos décadas (Parada et al., 2007; Fismare, 2008).

Parada et al. (2007) elaboraron un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la salinidad en el fondo del banco de los Lombos do Ulla durante la pleamar en función de la precipitación, la dirección y velocidad del viento, y la amplitud de la marea. Para calibrar el modelo emplearon los registros de salinidad de una sonda que ubicaron en los Lombos. Mediante la superposición de los episodios de mortalidad registrados y las fluctuaciones de salinidad definieron dos categorías de episodios: (a) Mortandad severa, que implica una mortalidad total de berberecho y almeja babosa y una mortalidad alta de almeja japonesa y fina, y (b) Mortandad moderada, que implica mortalidad total de almeja babosa, moderada de berberecho y prácticamente nula de almeja japonesa y fina.

Tabla 4.1. Episodios de mortandad severa y moderada en el banco de los Lombos do Ulla Parada et al. (2007).

TIPO	FECHAS
Mortandad moderada	Enero 1994; Abril 2000; Invierno 2002-2003; Marzo de 2007
Mortandad severa	Diciembre 1981 y 1987, Octubre 1987, Diciembre 1989, Enero 1991, Diciembre de 1995, Invierno 2000 y 2001

Los episodios de mortandad severa coinciden con dos bajadas de salinidad hasta valores cercanos a 0 en el fondo al menos durante dos pleamares consecutivas. Los episodios de

⁶³ Ver p.ej. el análisis de correlación entre la mortalidad del berberecho de una zona cercana a los Lombos do Ulla con varios parámetros climáticos como la precipitación y temperatura presentado por Parada y Molares (2008).

mortandad moderada coinciden con niveles de salinidad de entre 10 y 20 ‰, o incluso con valores inferiores pero para episodios de corta duración. Las fechas de los episodios de mortandad documentadas por estos autores se recogen en la Tabla 4.1.

El criterio simple propuesto por Parada *et al.* (2007) para discernir y predecir los episodios de mortandad de los berberechos funciona razonablemente bien, aunque en Marzo de 2006 se produjo un episodio de mortandad severa y la salinidad en el fondo se mantuvo entre 10 y 20 ‰. Por el contrario, en Diciembre de ese mismo año, se registraron persistentes niveles de salinidad cercanos al cero, sin que se registrasen mortandades severas, ver Figura 4.8.

Estos autores también señalan la actividad de la central de Portodemouros, situada a 83 Km de la desembocadura, como un factor externo que puede afectar a la salinidad de agua en la zona. Así, la mortandad severa de Marzo de 2006 podría justificarse, o al menos agravarse, por la suelta de agua que se produjo desde la presa. En las dos semanas de precipitaciones el nivel descendió desde el 74.9 % al 56.4%, según los registros disponibles en la web de Aguas de Galicia (Parada *et al.*, 2007).

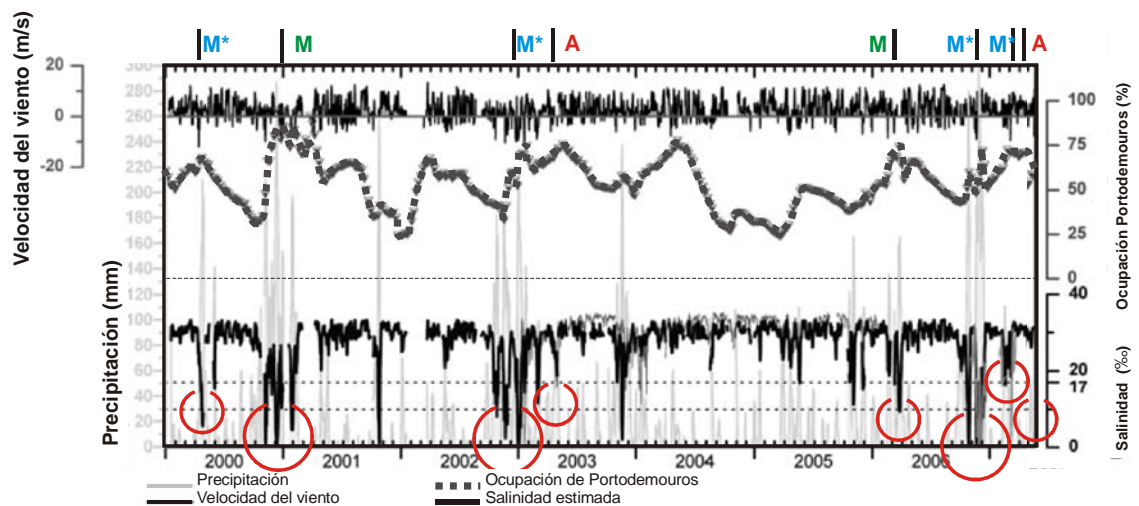


Figura 4.8. Evolución de la velocidad del viento, precipitación, nivel de agua en Portodemouros y salinidad en los Lombos do Ulla. En la figura también se han marcado los episodios de mortandad moderada (M*), mortandad severa (M) y de arrastre del stock de berberecho (A) (Parada *et al.* 2007).

En la Figura 4.8 se pueden apreciar además de los eventos de mortandad severa y moderada, dos eventos de arrastre del stock de berberechos. El primer evento documentado de este tipo se registró en la campaña de Abril de 2003 del Plan de Recuperación dos Lombos do Ulla (Parada *et al.*, 2006). En esta campaña se observó una gran densidad de berberechos en la zona externa del banco (ver Figura 4.9, (b)). Los mariscadores del lugar indicaron que el reclutamiento en la región profunda y fangosa no era habitual, y que no se extraían berberechos desde hacía décadas en esa zona.

En la Figura 4.9 se representa la distribución espacial de los berberechos de talla comercial en el banco de los Lombos do Ulla al inicio de la campaña 2002-2003 y al final de la misma. También se representa el estado del banco al inicio de la campaña de 2003 así como la distribución promedio de las tallas comerciales en el periodo 2002 a 2006. En la figura se puede apreciar como la distribución del reclutamiento al final de una campaña afecta a la distribución inicial al comienzo de la siguiente, Figura 4.9 (a) y (b). Además, de la observación

de la distribución media, se concluye que en promedio, en la etapa en la que se disponen datos, la mayor concentración de berberechos se encuentra al norte de la isla de Cortegada, concretamente en el margen sur del estuario.

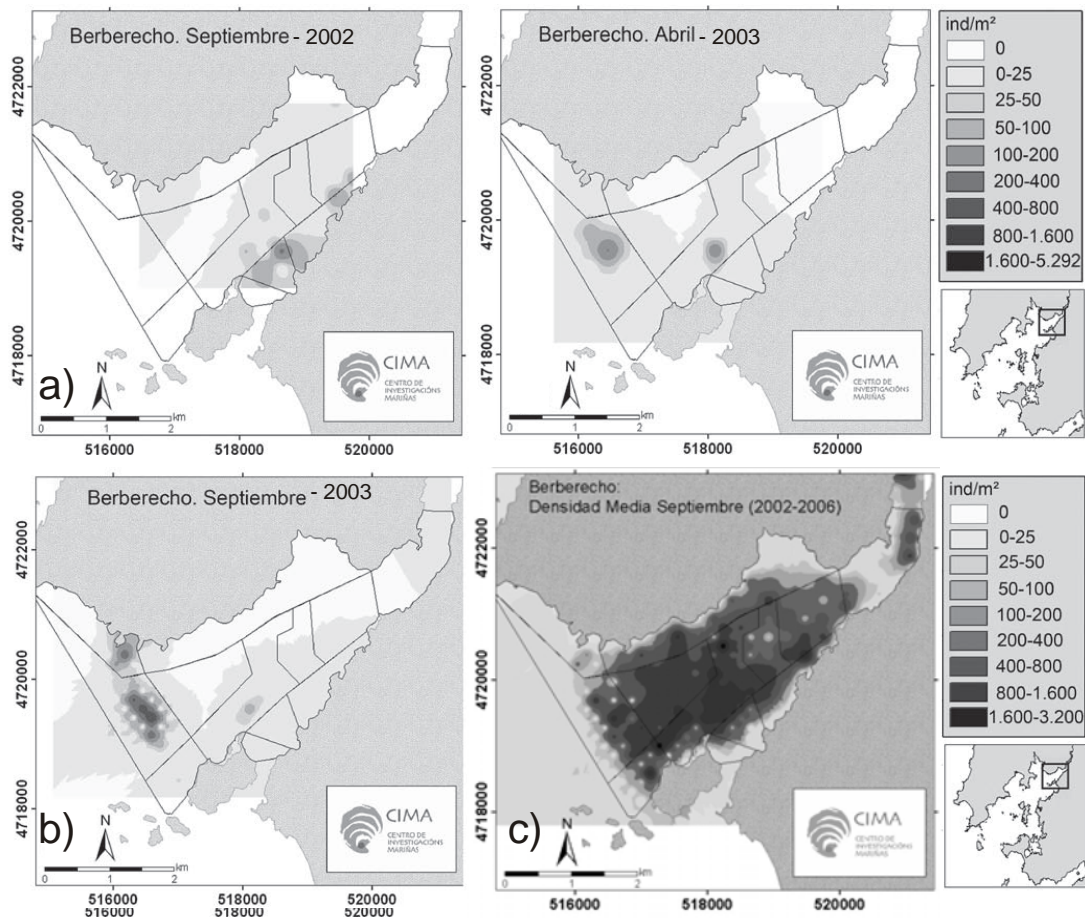


Figura 4.9. a) Distribución espacial de los berberechos de talla comercial durante la campaña de 2002-2003 b) distribución espacial al inicio de la campaña de 2003-2004 y c) distribución espacial promedio durante los años 2002 a 2006 (Parada et al. 2006b).

Por todo lo expuesto, parece que en el banco de los Lombos do Ulla existe una fuerte interrelación entre la hidrodinámica y la dinámica de la población de berberechos, y probablemente de las otras especies de moluscos de interés comercial (almeja fina, babosa y japonesa). Esta relación entre la dinámica de las poblaciones bentónicas y la hidrodinámica del entorno ha sido, y es, un campo de estudio en la biología marina (ver p. ejemplo las revisiones de Butman, 1987 o Snelgrove y Butman, 1994). En el apartado 4.2, se profundizará sobre esta línea de investigación.

Motivados por el problema de la mortalidad y arrastre del berberecho, el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente comenzó a trabajar en el análisis del arrastre de los berberechos de esta zona de Galicia.

Los trabajos presentados aquí continúan esta línea de investigación y forman parte del Proyecto de Investigación “*Afecciones a la fauna de las aguas de transición por las variaciones de caudal originadas por las centrales hidroeléctricas de punta*”, financiado por la Secretaría General e Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, desarrollado por el área de Ingeniería Hidráulica del GEAMA en consorcio con la empresa SOCOIN, SL. Una de las líneas de trabajo de este proyecto consiste en analizar el efecto de las centrales hidroeléctricas de punta sobre las especies productivas de la desembocadura del río Ulla.

En esta Tesis Doctoral se ha realizado un estudio hidrodinámico en laboratorio sobre el arrastre de varios grupos de berberechos adultos con diferentes tamaños y velocidades. Para la realización de los experimentos, se ha construido en las instalaciones del Centro de Investigación Tecnológica en Edificación e Enxeñería Civil (CITEEC) de la UDC, un canal de recirculación de 9 metros de cuerda en forma de circuito de carreras. Para la determinación de los campos de velocidades se ha empleado la tecnología Particle Image Velocimetry (ver Capítulo 3), que permite obtener los campos instantáneos de velocidad así como la posición del lecho cubierto con berberechos.

A continuación, en el apartado 4.2, se presentará una revisión del estado del conocimiento sobre la interacción entre la dinámica de las poblaciones bentónicas, focalizado en el berberecho *C. edule*, y la hidrodinámica de este tipo de ecosistemas. Se recogen los principales trabajos que relacionan estos factores la movilización de esta clase de moluscos. En los apartados 4.2 y 4.4 se describirán respectivamente la metodología experimental y los principales resultados de los ensayos.

Aunque en la literatura existen numerosos trabajos sobre la influencia de la hidrodinámica en los procesos de dispersión de los individuos más pequeños (larvas y juveniles, de tamaño inferior a los ~10 mm), prácticamente no existen referencias sobre poblaciones adultas. Además, en las conversaciones mantenidas con los técnicos del CIMA, no se manifestó ningún problema con la fijación de las larvas de las especies productivas del banco y si con el arrastre de stocks durante algunas riadas (ver episodios de mortandad de tipo (A) en la Figura 4.8).

El objetivo último de la Tesis es el de mejorar el conocimiento sobre los procesos de movilización de los berberechos adultos bajo diferentes condiciones de arrastre, reclutamiento y tamaño. Tanto el estado del conocimiento como los resultados experimentales de este y otros trabajos recogidos en la literatura servirán para desarrollar un módulo ecohidráulico para el código de volúmenes finitos de aguas someras Turbillón, desarrollado por el área de Ingeniería Hidráulica del GEAMA (Cea, 2005).

Este módulo (no presentado aquí, ver avance en Cea *et al.*, 2010) permitirá profundizar en el conocimiento de la dinámica del berberecho en los Lombos do Ulla, así como analizar y predecir situaciones de arrastre del stock en función de variables como el caudal desaguado por el río Ulla o las condiciones de marea. Además, servirá de herramienta para analizar y mejorar la gestión conjunta de las centrales de punta del tramo bajo del Ulla (Portodemouros, Brandariz y Touro), ya que se podrá estudiar la influencia de los caudales turbinados desde estos saltos hidroeléctricos.

4.2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

4.2.1. Introducción

Muchos bivalvos marinos comienzan su vida como una larva en la columna de agua. Tras unas pocas semanas de vida pelágica⁶⁴, las larvas comienzan una transición hacia su etapa bentónica, asentado sobre el sustrato. Tras este proceso, denominado asentamiento primario, las larvas metamorfosean y se convierten en pequeños bivalvos juveniles (postlarvas). El término asentamiento “primario” se emplea habitualmente en la literatura porque numerosos organismos bentónicos sufren una segunda dispersión y posterior asentamiento, “secundario”, que puede producirse semanas o meses después del primario.

Por ejemplo, Baggerman (1953), indicó en sus estudios pioneros sobre el *C.edule* que éste presentaba este tipo de transporte post-larvario o asentamiento secundario en larvas de unos 2 mm, cuando estas sedimentaban en zonas hidrodinámicamente tranquilas. Otros autores más recientes como de Montaudouin y Bachelet, (1996) encontraron algunas evidencias en campo sobre la recolocación postlarvaria del berberecho en la bahía de Arcachon (Francia), y también en una serie de ensayos de laboratorio que se comentarán posteriormente.

Hay que señalar que este proceso de dispersión, o migración vertical, y posterior asentamiento secundario no tiene porque obedecer a fenómenos meteorológicos extremos: p.ej. una riada o un temporal. En algunos casos, se ha demostrado que este proceso de recolocación obedece a un proceso activo por parte del organismo, p.ej., relacionado con la elección de un sustrato más favorable para su desarrollo.

En la literatura existe un gran debate sobre la importancia de los procesos de asentamiento activo y pasivo en la configuración de las estructuras de las comunidades bentónicas. Armonies (1996), en un trabajo de 2 años de duración, señala que en la mayoría de las especies bentónicas de la zona de la isla de Sylt en el mar de Wadden (ver Figura 4.22), las larvas inicialmente se ubican en la zona intermareal baja por procesos hidrodinámicos (pasivos). Tras esta dispersión inicial, los juveniles de la almeja *M.balthica* presentan una migración secundaria hacia las zonas altas mientras que los juveniles de navaja (*E.americanis*) lo hacen hacia las zonas submareales. Otras especies como el berberecho *C.edule*, colonizan de un modo homogéneo la zona intermareal.

Analizando el transporte por fondo en dos zonas del área estudiada encontró que de las especies analizadas, los juveniles de almejas y berberecho, presentan una migración vertical y dispersión correlacionada con la tasa de transporte de sedimentos. Las navajas sin embargo no presentan este comportamiento.

Este trabajo ejemplifica el debate existente en la comunidad científica antes mencionado, ya que parece que la estructura de las comunidades depende de procesos de selección activa (porque sino todos los juveniles terminarían en lugares similares), pero que también los aspectos hidrodinámicos juegan un papel determinante en la distribución de las especies. En este caso particular, Armonies sugiere que la hidrografía tiene un papel fundamental en la distribución inicial de las comunidades a escala de kilómetros. Las diferencias que se dan

⁶⁴ Se aplica a la zona del mar que comprende prácticamente su totalidad, a excepción del fondo y las orillas.

posteriormente en el reclutamiento de los juveniles se deben a procesos de migración vertical activa, a diferencias locales en las condiciones hidrodinámicas y a mortalidades diferenciales (p.ej. zonas con mayor concentración de depredadores).

Estos y otros aspectos que determinan la configuración de la estructura de las comunidades bentónicas serán tratados en esta revisión bibliográfica. Para ello, se presentará en primer lugar en el apartado 4.2.2 una pequeña descripción del ciclo de vida de los moluscos bivalvos. Dado que el objetivo de esta Tesis Doctoral está relacionado con el análisis del arrastre del berberecho *C.edule*, en este, y en el resto de apartados de esta revisión, se presentarán con mayor detalle datos relacionados con este molusco.

Tras la exposición del ciclo de vida de los moluscos, se realizará una descripción general de la dinámica de estas poblaciones en el apartado 4.2.3. Se revisarán los principales procesos y factores que determinan la estructura espacial de las comunidades (§4.2.3.1y §4.2.3.2). En el apartado 4.2.3.3 se hará un especial hincapié en los procesos de selección activos y pasivos.

Después de presentar las evidencias y resultados de algunos trabajos de campo, se analizará con mayor detalle la influencia de la hidrodinámica en el ciclo de vida de los organismos bentónicos, así como las interacciones entre la hidráulica y la ecología (§4.2.4). En el último apartado del estado del arte, el 4.2.5, se presentarán la principales tipologías y resultados de los trabajos realizados en modelo físico para determinar el arrastre de moluscos bivalvos. En este epígrafe también se ha considerado interesante presentar las características de los canales de laboratorio empleados en los trabajos sobre el bentos marino que pertenecen a la red europea *BioFlow*.

4.2.2. Aspectos biológicos: el ciclo de vida de los bivalvos

La mayoría de los bivalvos de las zonas intermareales presentan un complejo ciclo de vida que incluye varias fases: larvaria planctónica, bentónica juvenil y fase adulta. Para comprender y predecir los cambios espaciales y temporales en las distribuciones, ratios de crecimiento y estructura de una población de una especie como el *C. edule* es fundamental conocer la influencia que ejercen individualmente los procesos físicos, químicos y biológicos sobre las fases larvaria y bentónica. Para ello es fundamental conocer, para así poder modelizar, el ciclo de vida de estos animales (Eckman, 1996).

En la Figura 4.10 se representa el ciclo de vida de una especie bentónica con fases larvaria planctónica y bentónica juvenil y adulta. El ciclo comienza cuando los adultos en fase reproductiva liberan los gametos u ovocitos en la columna de agua, donde tiene lugar la fertilización y desarrollo larvario. A partir de aquí comienza un periodo de dispersión de las larvas en el medio marino, que para el caso del *C.edule*, suele finalizar a las 3 semanas. En esta fase se produce el crecimiento y desarrollo de varias fases larvarias (Hendriks, 2004).

Finalmente, la larva asienta sobre el sustrato y es capaz de evaluar la potencialidad del mismo. La larva puede rechazar el lugar, a través de un proceso de migración vertical (o resuspensión) en la columna de agua, o aceptarlo, comenzando así la metamorfosis en la forma bentónica (Hendriks, 2004). A este proceso se le denomina asentamiento primario (*primary settlement*).

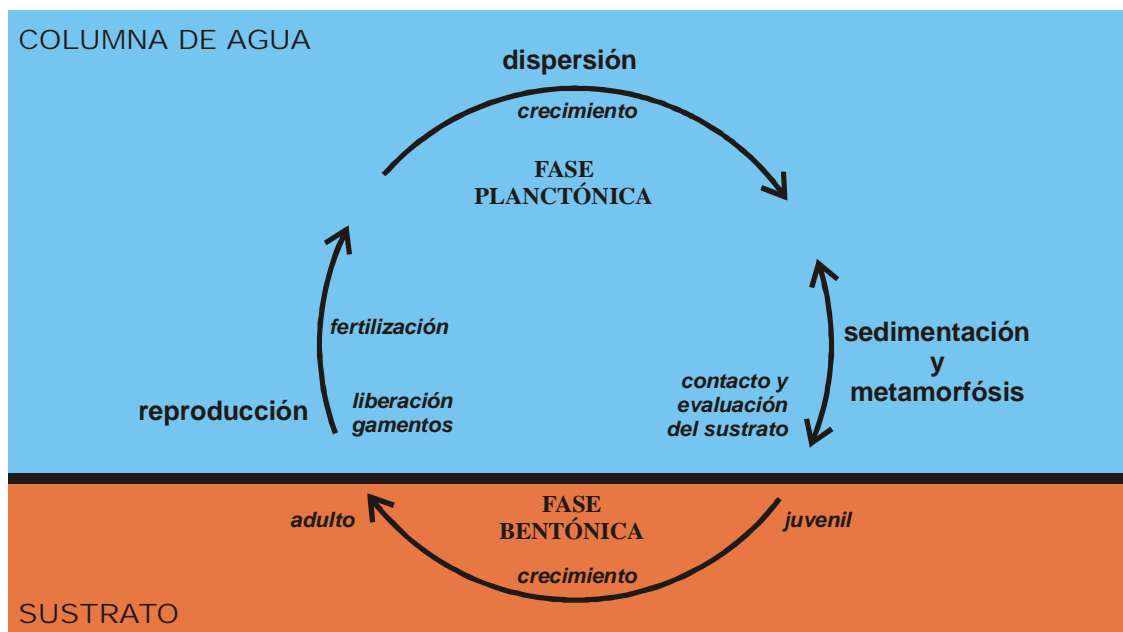


Figura 4.10. Ciclo de vida (idealizado) de un invertebrado marino bentónico con fases planctónica larvaria y bentónica juvenil y adulta (elaboración propia a partir de Eckman, 1996 y Hendriks, 2004).

El crecimiento, desde la fase juvenil hasta la adulta pre-reproductiva y reproductiva, completa el ciclo de vida de estas especies. Cuando las larvas se fijan y prosperan, se habla del proceso de reclutamiento, aunque este término también se puede emplear para indicar la densidad y el número de individuos que se pueden encontrar por superficie de sustrato⁶⁵.

Algunos organismos bentónicos, como algunos moluscos y poliquetos (gusanos de mar), pueden presentar un proceso de migración vertical y posterior asentamiento secundario. Así, y ya en la fase postlarvaria (con tamaños del orden de 1-10 mm), algunos individuos pueden modificar sus propiedades hidrodinámicas y reentrar en la columna de agua para, p.ej., buscar un nuevo asentamiento más propicio para su desarrollo. Este fenómeno es, en este caso, un proceso activo, ya que son los organismos los que de alguna forma *deciden* migrar hacia nuevas ubicaciones.

⁶⁵ En general, el término reclutamiento se define como el momento en que se considera que tiene lugar la incorporación del individuo asentado a la población bentónica. El reclutamiento no se refiere a un momento inherente al ciclo vital del individuo, sino que es fijado arbitrariamente según los objetivos del estudio y de la especie que se trate. Así, p.ej., en biología pesquera se suele utilizar el concepto de reclutamiento al arte, que hace referencia al instante en que el individuo alcanza la talla mínima de captura (determinada por la selectividad del arte) o de comercialización. En esta fase del ciclo vital del berberecho, se puede definir el reclutamiento como el momento en que la larva ha superado la primera fase de mortalidad post-asentamiento. García, B., Pallas, A. y Pan, M. (2002). *Reclutamiento, uso del hábitat y estructura de comunidades bentónicas costeras de crustáceos decápodos*. Trabajo de Investigación Tutelado. Programa de Doctorado de Biología Marina y Acuicultura.

Para el resto de trabajo, como el objetivo es analizar la influencia del número de individuos presentes en el sustrato en el fenómeno de movilización de los moluscos, se definirá reclutamiento como el número de individuos adultos que se pueden encontrar por superficie de sustrato. Es decir, el reclutamiento hará referencia a la densidad de organismos por metro cuadrado (ind/m²).

Este proceso ha sido estudiado por numerosos autores ya desde el primer tercio del siglo XX (ver p.ej. la revisión de Butman, 1987), es dependiente de las características de cada especie y su importancia en el ciclo de vida de estos organismos sigue siendo una fuente de debate en la comunidad científica en la actualidad.

En el apartado 4.2.3 se comentará con mayor profundidad este y otros aspectos de la dinámica de las poblaciones bentónicas. A continuación se pasan a describir brevemente las fases de este ciclo.

4.2.2.1. Producción de gónadas y fertilización de la columna de agua

Cuando los gametos son liberados (ver Figura 4.11), la probabilidad de que un espermatozoide fecunde una hueva es baja, ya que factores como la supervivencia de los gametos o los procesos de dispersión hidrodinámicos pueden dificultar este proceso.



Figura 4.11. Berberecho *C. edule* realizando la dispersión de gametos a través de uno de los sifones. Fotografía de Brian Spencer / JNCC (publicada en MarLIN Web site, <http://www.marlin.ac.uk>).

Respecto al primer parámetro se puede indicar que la viabilidad de los gametos del *C. edule* es corta, reduciéndose la fertilización en un 50% tras 2 h de la liberación de los gametos. La fertilización se paraliza a las 4-8 h (Tyler-Walters, 2007).

Sin embargo, los organismos bentónicos han desarrollado estrategias para incrementar las tasas de reproducción. Algunos ejemplos son la liberación sincronizada de los gametos en cortos periodos de tiempo o la agrupación de los individuos adultos (Levitan, 1995). Además, las estaciones reproductivas se sincronizan con otros eventos de periodos aproximadamente constantes, como variaciones de luz-oscuridad (diarias), lunares (mensuales), mareales (semidiurnas/diurnas) o de la amplitud de la marea (Morgan, 1995).

Otros factores que también afectan al proceso de fertilización como las variaciones en la temperatura del agua, en la insolación, en la hidrodinámica (p. ej. estratificación o dispersión) se recogen en Eckman (1996).

Los estudios realizados en los Lombos de Ulla en un parque experimental de la villa de Carril, indican que la gametogénesis de los berberechos comienza en el mes de enero y desde febrero hasta octubre se encuentran berberechos maduros sexualmente, sin embargo la época de reproducción en esta zona comprende desde marzo, hasta julio (González y Pérez, 1984a). Es en esta etapa cuando los ovocitos alcanzan el tamaño máximo, unas ~ 80 micras. Por último, el período de reposo gonadal abarca el otoño y principios de invierno (Santos, 2001).

4.2.2.2. *Etapa planctónica*

El desarrollo y dispersión de las larvas de los bivalvos intermareales se produce en la columna de agua. La duración del estado planctotrófico de las larvas es variable y depende tanto de la latitud como de las condiciones ambientales del momento. En el caso del berberecho *C.edule*, este periodo dura aproximadamente entre 2 y 4 semanas.

Inicialmente las larvas tienen un tamaño de 120 micras y crecen hasta que asientan, con tamaños no inferiores a las 280 micras (se han encontrado larvas no metamorfoseadas de hasta ~800 μm , Tyler-Walters, 2007). La densidad de las larvas es aproximadamente ~1.1 g/cm^3 (Jonsson *et al.*, 1991) y los ratios de crecimiento oscilan entre las 15 y las 20 $\mu\text{m}/\text{día}$ (Creek, 1960, citados en Huxham y Richards, 2003).

Este proceso de dispersión a gran escala se considera como un *proceso pasivo*, donde las larvas se comportan como sedimentos finos en suspensión (Hannan, 1984; Butman, 1987) y pueden ser transportadas durante largas distancias.

La duración de esta fase pelágica y la escala espacial de la dispersión está relacionada con el tipo de desarrollo larvario. Así, se supone que el grado de dispersión de las larvas planctotróficas⁶⁶, que pueden alimentarse durante un periodo de semanas-meses antes de metamorfosear, es mucho mayor que el de las larvas lecitotróficas⁶⁷, que metamorfosean en horas-días (Todd, 1998).

La dispersión es un proceso fundamentalmente advectivo, en el que fenómenos como la mezcla turbulenta promovida por las corrientes de marea, las corrientes asociadas a viento, las variaciones en la amplitud mareal (p.ej. mareas vivas y muertas) y en general, todos los procesos hidrodinámicos que ocurren en la zona más próxima a la costa (*nearshore hydrodynamics*), juegan un papel fundamental. Otros factores que van a marcar fuertemente este mecanismo será la disposición de las rugosidades del lecho, y la presencia de canales y zonas de recirculación. En definitiva, es un proceso marcadamente hidrodinámico.

Las larvas de los organismos bentónicos suelen tener capacidad natatoria. Sin embargo, en general ésta no es suficientemente grande como para oponerse al flujo o para resuspenderse cuando se asientan en el sustrato⁶⁸.

⁶⁶ Son larvas muy longevas con aparato digestivo funcional y que pueden alimentarse de algas microscópicas, diatomeas o pequeños organismos.

⁶⁷ Las larvas lecitotróficas reducen su etapa planctónica al mínimo porque no disponen de un aparato digestivo funcional y por tanto no pueden alimentarse del plancton en suspensión. Para compensar la carencia de aparato digestivo, disponen de una mayor reserva energética.

⁶⁸ Al menos para los moluscos bivalvos y poliquetos, ya que para algunos crustáceos si se han observado procesos de selección activa del hábitat a través de la natación debido a que su capacidad natatoria es muy superior a la de los primeros organismos (Butman, 1987).

Tabla 4.2. Resumen de los parámetros de ensayo, velocidad libre U_∞ y de corte u_* (media±intervalo de confianza del 95%) y de las velocidades de natación (media±desviación típica) de la larva de *C.edule* en los ensayos realizados por Jonsson et al. (1991).

U_∞ (cm/s)	$u_* (\bar{x} \pm 95\% IC)$ (cm/s)	$u_{larvas} (\bar{x} \pm SD)$ (cm/s)
0	0	Mov helicoidal
2	0.19±0.010	0.045±0.0255 (n=26)
5	0.22±0.018	0.090±0.036 (n=22)
10	0.36±0.031	0.16±0.060 (n=40)

Jonsson et al. (1991) estudiaron la capacidad de natación de la larva del berberecho *C.edule* en laboratorio, bajo diferentes condiciones de flujo (ver Tabla 4.2). En agua quieta el movimiento de la larva es helicoidal, con velocidades de ascenso neto de 0.71 mm/s y un radio de giro de 0.18 mm. Cuando la larva deja de nadar, desciende con velocidades de 1.3 a 1.7 mm/s. El movimiento helicoidal de esta larva es similar al de la larva de otros tipos de organismos bentónicos como los poliquetos, y está motivado por la aparición de un momento torsor originado por la excentricidad que existe entre el centro de masas del organismo (CM) y el centro de flotación (CF). Esta diferencia se atribuye a la diferente densidad de la concha y de la vianda o cuerpo de la larva (ver Figura 4.12).

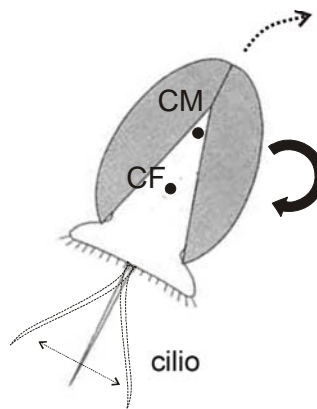


Figura 4.12. Esquema del movimiento helicoidal de la larva de *C.edule* (adaptado de Jonsson et al., 1991).

Con el agua en movimiento, el movimiento helicoidal no es importante, ya que aunque se produce, está totalmente distorsionado por la dirección del flujo. En los ensayos de Jonsson et al., para flujos de entre 5 y 10 cm/s, las larvas se desplazaban sobre el lecho, confinadas en la subcapa límite viscosa, donde la velocidad es nula si se asume que todo el perfil de velocidades es logarítmico⁶⁹. Para la velocidad de 2 cm/s el comportamiento de las larvas está a medio camino entre el agua en reposo y los escalones de 5 o 10 cm/s.

⁶⁹ En realidad, en flujos hidráulicamente lisos, en esta zona el perfil de velocidades se puede asumir lineal, ver Cap. 2 apartado 2.3.2.

Para velocidades mayores (los autores analizaron una velocidad libre U_{∞} de 15 cm/s), el flujo es más rugoso y no hay capa límite viscosa (por donde se movía antes la larva). En esta situación el movimiento es asimilable al de los sedimentos que se transportan por fondo (saltación, básicamente) a mucha mayor velocidad. Sin embargo, estos autores señalan que es muy difícil extrapolar los resultados obtenidos con el flujo de laboratorio, ya que en campo el flujo es claramente variable, tridimensional y sobre una topografía mucho más compleja.

Hay que señalar que las velocidades ensayadas por Jonsson *et al.* (1991) representan el rango habitual encontrado en estuarios y entornos marinos con una hidrodinámica poco energética. En la zona de los Lombos do Ulla, es habitual encontrar rangos de velocidades superiores (hasta ~40 cm/s en un ciclo de mareas vivas⁷⁰), especialmente cuando los caudales del río superan los caudales medios. En estas situaciones se han obtenido con el modelo hidrodinámico realizado para el proyecto “Afecciones a la fauna de las aguas de transición por las variaciones de caudal originadas por las centrales hidroeléctricas de punta” velocidades medias de hasta ~50 cm/s (ver Figura 4.4).

La etapa planctónica está marcada además por los parámetros de mortalidad y alimentación de las larvas. Estos dos aspectos también definirán la dinámica de la población en esta fase del ciclo de vida de los moluscos.

Así, durante el periodo en el que las larvas se encuentran en suspensión, la mortalidad de las mismas es muy elevada. Las poblaciones tienden a mantenerse en equilibrio (al menos a largo plazo) y cada adulto puede llegar a producir millones de ovocitos durante su vida. Como ejemplo, se puede indicar que las tasas de mortalidad de algunos mejillones pueden llegar hasta el 99% (Hendriks, 2004).

Los principales agentes que provocan la mortalidad de las larvas son la disponibilidad de alimento (en cantidad y calidad adecuados), mucho menor en la columna de agua, depredación por otras especies, condiciones hidrodinámicas desfavorables o episodios de estrés provocados por cambios en la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, radiación UV, etc. De todos estos aspectos el más importante es quizás la depredación, aunque en zonas con cambios de temperatura o salinidad muy bruscos también se pueden producir episodios de mortandad importantes (Hendriks, 2004).

Los principales depredadores de las larvas de moluscos son algunas especies de peces, algunos crustáceos e incluso, otros moluscos adultos de otras o de la misma especie. André *et al.* (1993) han reportado en una serie de ensayos en laboratorio descensos en el reclutamiento larvario de *C.edule* de hasta un 33% cuando la sedimentación se producía sobre un lecho de berberechos adultos activos.

4.2.2.3. Etapa de asentamiento larvario

Como se ha comentado, la dispersión se concibe como un transporte pasivo por las corrientes oceánicas, ya que la escala de velocidades horizontales es mucho mayor que la de las velocidades horizontales de natación de las larvas. Durante el asentamiento de las larvas las consideraciones físicas más importantes son la velocidad de caída y el tamaño de la larva.

⁷⁰ Velocidades registradas en la plataforma de Cortegada del Intecmar (www.intecmar.es) y Meteogalicia (www.meteogalicia.es) y con una sonda ADVP Nortek AWAC ASTA fondeada por el GEAMA entre Noviembre y Diciembre de 2008.

Como se ha indicado anteriormente, se definen dos tipos de asentamiento, el primario y el secundario. El asentamiento primario es aquel que se produce cuando la larva toca el sustrato. Si este no es adecuado, los organismos pueden, a través de algún proceso activo que se describirán en el siguiente apartado, realizar una migración vertical en la columna de agua y posponer su metamorfosis hasta encontrar un emplazamiento que considere más propicio para su desarrollo.

En algunas ocasiones, este proceso de rechazo de sustrato se produce tras algún estadio de metamorfosis y algún tiempo de residencia en el emplazamiento inicial. Después la migración vertical, se produce el asentamiento secundario. Hay que señalar que no todos los moluscos presentan fenómenos de migración vertical en la columna de agua y asentamiento secundario activos.

El contexto temporal de la dispersión de las larvas del *C. edule*, así como de otros moluscos bivalvos, se encuentra en general entre los meses de Abril a Junio. En la Ría de Arousa, y en general en Galicia, las poblaciones de berberecho se renuevan mediante un reclutamiento anual que se inicia en los meses de Junio y Julio. Los reclutamientos medios registrados en el banco de los Lombos se pueden cifrar entre ~100 y ~6000 ind/m², y varían fuertemente espacial y temporalmente, especialmente de forma interanual (González y Pérez, 1984b).

La densidad de la semilla fijada en los primeros días es elevada, pudiendo llegar a ser de 10000 individuos por metro cuadrado. Esta semilla parece que es más abundante en los niveles intermareales más bajos, donde el riesgo de estar un largo tiempo de exposición al aire es bajo (Santos, 2001).

Por último, hay que señalar que la densidad del cuerpo de los juveniles es similar a la de las larvas $1.05 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ (de Montaudouin *et al.*, 2003)

4.2.2.4. Crecimiento: etapas de juvenil y adulto

Tras el asentamiento, las larvas y postlarvas metamorfosean y comienzan a crecer hasta desarrollarse como adultos y así cerrar su ciclo de vida. En esta etapa de juvenil y adulto, los moluscos de sustrato blando⁷¹ se suelen agrupar en parches o grupos de varios metros de diámetro. Huxham y Richards, (2003), analizaron la población de *C.edule* y de la almeja *Macoma balthica* en la zona intermareal del estuario de Forth, en Escocia, y a través de análisis de autocorrelación acotaron los parches en esta zona en diámetros de 5 a 10 m.

En el banco marisquero de los Lombos do Ulla (1134.7 ha), los berberechos tienden a agruparse en zonas relativamente pequeñas del mismo, formando grandes parches de ~200 a ~500 ha (Parada *et al.*, 2006). Sin embargo, no se disponen datos sobre la distribución de los mismos a pequeña escala.

Respecto a la estructura de las poblaciones adultas, éstas suelen estar constituidas por 3 grupos de individuos, que se corresponden a los de la clase 0 (los nacidos en el año), clase 1 (con un año de edad) y los de la clase 2 (con dos años de edad). Estos últimos representan un pequeño porcentaje de la población integrada por individuos viejos, cuyo crecimiento es más lento que el de los jóvenes. Raramente se pueden observar individuos de la clase 3 (con 3

⁷¹ El término sustrato blando hace referencia a lechos móviles. Los moluscos que se fijan a estratos rocosos se denominan de sustrato duro.

años de edad), puesto que tendrían que pasar varios períodos de actividad extractiva sin ser capturados (Santos, 2001).

Los ratios de crecimiento de las clases 1 y 2 en los Lombos del Ulla son rápidos y similares, aunque la distribución de la población permanece totalmente separada hasta el mes de octubre, cuando la clase 2 comienza a ser mariscada (se produce una *mortalidad halieútica*). Este fenómeno se reproduce en la Figura 4.13, adaptada de Pérez y González (1984b).

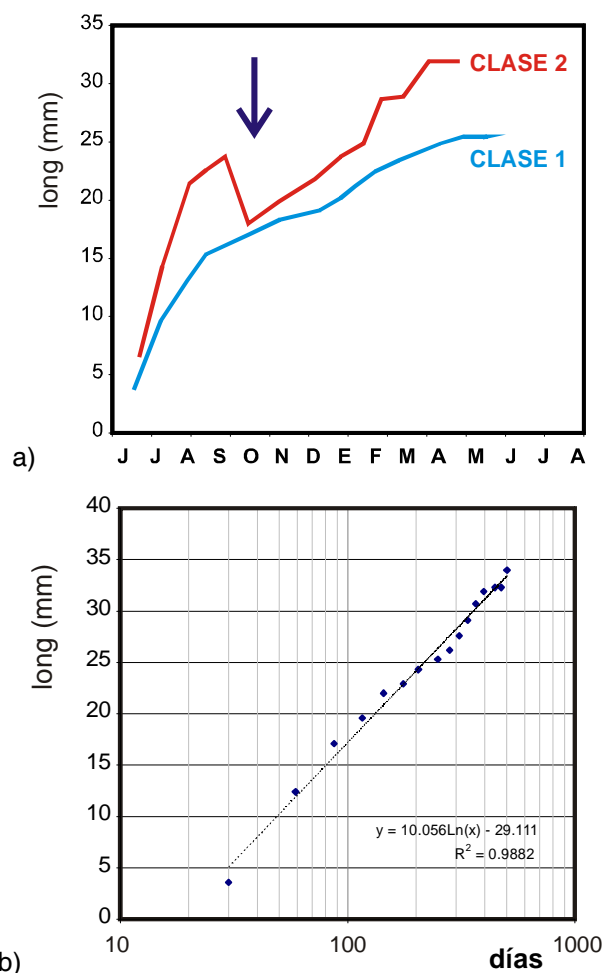


Figura 4.13. a) Crecimiento en longitud de los berberechos de las clases 1 y 2 registrados en una zona explotada en Carril y b) Tasa de crecimiento medio para la clase 1 en el banco experimental explotado por Pérez y González (1984b). En (a) se ha señalado el descenso en tamaño de la clase 2 provocado por el inicio de la etapa marisquera.

Las principales causas de mortalidad del *C.edule* son la depredación, problemas de alimentación, fenómenos de mortalidad densodependientes y, como se ha visto, por la extracción marisquera. Respecto a los depredadores, se pueden señalar que las principales especies que afectan al *C.edule* en zonas intermareales son algunos tipos de ostra, algunas especies de aves, crustáceos, algunos gasterópodos y equinodermos.

Parada y Molares, (2008) realizaron un estudio sobre la mortalidad del berberecho *C.edule* en dos playas de la Ría de Arousa. Estas playas, Barraña y Mañóns, no se encuentran en el banco de los Lombos sino en la cercana península de Abanqueiro.

Las principales conclusiones de este trabajo son que la densidad de reclutamiento influye en la tasa de mortalidad de los moluscos. Así, para densidades superiores a los 500-600 ind/m², la mortalidad crece por un fenómeno densodependiente. Este consiste en una competición intraespecífica, interacción entre adulto-larvas de la misma especie, por el alimento y el espacio de desarrollo de los moluscos. Los valores encontrados por estos autores son ligeramente inferiores a otros citados en la literatura, que sitúa la densidad crítica para la carencia de alimentación en el entorno de 2000 ind/m² (de Montaudouin y Bachelet, 1996).

La competición por el alimento es uno de los principales factores que afectan al desarrollo de las comunidades de berberechos, ya que al ser filtradores necesitan procesar grandes volúmenes de agua para subsistir. Si el reclutamiento es muy elevado la actividad filtradora puede reducir e incluso terminar con el fitoplancton en la región del flujo cercana al lecho (ver p.ej. los experimentos en laboratorio de difusión de plancton sobre lechos de mejillón *Mytilus edulis* Frechette *et al.*, 1989; Butman *et al.*, 1994). En consecuencia, la existencia de competencia suele traer asociado un descenso de los ratios de crecimiento y del índice de condición⁷² de los filtradores.

Además, el efecto del espacio reducido provoca la colisión de los moluscos entre sí, y que estos se desentierren y, por tanto, sean más susceptibles a la acción de las fuerzas hidrodinámicas, y también más vulnerables a los depredadores.

Por último, existen una serie de condiciones ambientales de carácter físico que pueden afectar a la mortalidad de los moluscos. Estas condiciones están relacionadas con los límites de tolerancia de estos organismos frente a los cambios de temperatura y salinidad del medio en el que se desarrollan.

Los principales experimentos sobre los límites de tolerancia del *C.edule* se han realizado sobre individuos recogidos y aclimatados a las condiciones de vida del Mar del Norte. En estos trabajos (ver la revisión de Molares *et al.*, 2008) se establecen los límites inferiores de temperatura admisible por esta clase de molusco entre 5 y 6° C (valor medio diario) y los superiores entre 29 y 36° C (valores para exposiciones de 4 a 6 h en laboratorio).

Además, las poblaciones de la parte alta intermareal son probablemente más vulnerables a las temperaturas extremas debido a que permanecen más tiempo emergidas. El tiempo durante el cual los moluscos están sumergidos también puede afectar a su tasa de crecimiento. Montaudouin y Bachelet (1996) analizaron el crecimiento del *C.edule* en dos zonas intermareales, una cercana al nivel medio y otra a la pleamar, encontrando mayores ratios de crecimiento e índice de condición en la zona mareal baja.

La salinidad es otro de los factores ambientales que más condiciona la mortalidad de los berberechos. Los rangos de tolerancia a este parámetro dependen de la duración de la exposición, de la temperatura y del valor de salinidad alcanzada en el experimento (Molares *et al.*, 2008). En general, los trabajos de la literatura señalan que el berberecho es capaz de soportar ambientes con salinidades en el rango comprendido entre 12.5 y 38.5 ‰.

Como se ha comentado, Parada *et al.* (2007), asocian los episodios de mortalidad severa del berberecho en los Lombos do Ulla con caídas de salinidad cercanas a 0 ‰ para varias pleamares consecutivas, mientras que los episodios de mortalidad moderada coinciden en general con periodos de salinidad de 10 a 20 ‰, pero con una duración más corta.

⁷² El Índice de Condición relaciona el peso seco de carne del molusco con el peso total del mismo.

Otro efecto asociado al descenso de salinidad descrito en la literatura es el ascenso o desenterramiento de los berberechos. Sánchez-Mata *et al.*, (2006) realizaron una serie de experimentos para analizar el estrés que los descensos de salinidad prolongados (24h) producían en una serie de *C. edule* de los Lombos do Ulla. Los principales resultados de este trabajo señalan que para los descensos entre 0–5 ‰ prácticamente no se desenterran moluscos (<10%), y para el rango de salinidad 28.5–35 ‰ el número es similar (10-20%). Sin embargo, para descensos intermedios, salinidades de ~17.5 ‰, se constataron las tasas de desenterramiento más altas: 30-77% al finalizar el ensayo y de 12-45% tras 8 h de ensayo.

Por tanto, los cambios de salinidad además de afectar al descenso de actividad y al “ahogamiento” del molusco, pueden estar relacionados con una mayor exposición o vulnerabilidad frente al arrastre por las corrientes.

4.2.3. Dinámica de las poblaciones bentónicas

4.2.3.1. Introducción

El origen de los trabajos sobre comunidades bentónicas en sustrato blando, como comunidades con un comportamiento más o menos predecible, está en el estudio pionero que Petersen (1918) realizó en el mar báltico.

Aunque el objetivo inicial del trabajo fue el de analizar la cantidad de recurso disponible para poder comercializarlo, acabó desarrollando un informe, basado en 25 años de investigaciones, en el que se centraba en cómo los patrones de sedimentación larvaria y post-larvaria afectaban a la distribución de la comunidad de *Macoma balthica*. Las principales conclusiones del trabajo de Petersen indicaban por una parte que las comunidades de *Macoma* se encontraban dispersas y sin ningún tipo de relación con el tipo de sedimento e inversamente correlacionadas con la presencia de depredadores. Sin embargo, sus trabajos no conseguían explicar cómo en ciertas zonas profundas, con las condiciones ambientales ideales para el desarrollo de la comunidad de *Macoma*, esta no aparecía (Todd, 1998).

A partir de los trabajos de Petersen, numerosos trabajos de campo y laboratorio intentaron buscar relaciones entre las características abióticas (físico-químicas) de algunos hábitats y el tipo de comunidad bentónica que se desarrolla sobre los mismos. Los primeros con proyección fueron realizados por Sanders en 1958 (ver p.ej. Butman, 1987). Este autor propuso la hipótesis de que los organismos filtradores o *suspensívoros* habitarían preferente en sustratos arenosos porque en este ambiente se favorece la suspensión de partículas, mientras que los *depositívoros* se encuentran en fangos debido a la alta concentración de materia orgánica y microorganismos depositada.

Estudios posteriores desarrollaron otras ideas relacionadas con las relaciones funcionales entre los organismos. Así, Rhoads y Young, en 1970, propusieron la hipótesis del “Grupo trófico amensalista”⁷³, que defiende que las actividades de los depositívoros interfieren en el asentamiento y mantenimiento de los suspensívoros. Así, los organismos depositívoros removerían los sedimentos de su entorno y la gran cantidad de finos en suspensión provocaría

⁷³ El amensalismo es la interacción biológica que se produce cuando un organismo se ve perjudicado en la relación y el otro no experimenta ninguna alteración, es decir, la relación le resulta neutra. P.ej., en algunos bosques de la selva amazónica, hay árboles de mayor tamaño que impiden la llegada de luz solar a las hierbas que se encuentran a ras del suelo. Éste es un ejemplo de amensalismo, y se diferencia de la competencia en que las plantas de menor tamaño no afectan en nada la supervivencia de los árboles de mayor tamaño.

la colmatación de las estructuras filtradoras y el enterramiento de las larvas de los suspensívoros (Snelgrove y Butman, 1994). Sin embargo, estas relaciones no consiguen explicar satisfactoriamente la ubicación y dinámica de algunas comunidades bentónicas o la coexistencia de suspensívoros y depositívoros en determinados ambientes.

La principal revisión de trabajos que analizaban la interacción entre el tipo de sustrato y las comunidades bentónicas fue realizada por Snelgrove y Butman (1994). Estos autores señalan que algunos organismos pueden aparecer en varios tipos de ambientes sedimentarios (p.ej. arenas y fangos), y que las evidencias de estas relaciones se asentaron en los resultados de los trabajos pioneros de selección de sustrato realizados a partir de la segunda mitad del siglo XX. Estos trabajos consistían en analizar la preferencia de larvas y juveniles de una especie a sedimentar o asentar sobre un tipo de particular de sedimento de entre una gama de, digamos, 2 a 4 tipos de sedimento que podía encontrar en una placa de Petri. Sin embargo, existen pocas evidencias de que esta selectividad se estimule únicamente con el tamaño del grano ya que otros aspectos como el contenido en MO, el contenido en microorganismos o incluso la hidrodinámica pueden afectar a este proceso.

Además, existirían otros mecanismos que podrían explicar la asociación entre el tipo de sedimento y la comunidad larvaria, como por ejemplo el tipo de de sedimentos que los organismos prefieren ingerir o retener para su alimentación. Así, los depositívoros adultos son capaces de ingerir sedimentos mayores que los juveniles, lo cual puede marcar cierto patrón de distribución espacial. Otros factores son la preferencia por lechos con cubiertas proteicas, con mayor contenido de materia orgánica o angulosidad del grano. Estos factores están relacionados con la alimentación de la especie y no con el tamaño del sedimento directamente.

En varios estudios de laboratorio se ha demostrado que existe selección activa de algunas larvas por sustratos con altos contenidos de materia orgánica, y que esta predilección desaparece a medida que el individuo se hace adulto y pierde afinidad. En trabajos de campo se ha comprobado que muchos depositívoros se encuentran en mayores concentraciones en zonas con mayor contenido en MO, aunque el tamaño de sedimento sea similar (Snelgrove y Butman, 1994).

Otro proceso que puede afectar a la distribución espacial de algunas comunidades bentónicas está relacionado con la “estabilización” de un sustrato se puede producir por efecto de la actividad de algunos organismos que fijan el suelo y mejoran su capacidad. Así, existen evidencias físicas de estabilización local de lechos de arena que impiden la formación de formas de fondo por parte de algunos poliquetos. Esta estabilización, que se atribuye a la generación de una película de mucus sobre el sedimento por parte de los organismos, puede modificar los patrones de aparición de otros organismos como algunas diatomeas que sólo se encontrarían en lechos más profundos, poco afectados por el transporte de sedimentos y la acción del oleaje (Snelgrove y Butman, 1994).

Por todo esto, en la actualidad se trabaja con otros tipos de interacciones más complejas entre la alimentación, la dispersión y estructura de las comunidades bentónicas y la hidrodinámica de los sistemas acuáticos. Así, factores como la rugosidad del lecho, los niveles de turbulencia, el transporte y la sedimentación de partículas, o la estructura de la capa límite pueden interactuar con la dinámica de las poblaciones de los organismos bentónicos, como se explicará a continuación.

4.2.3.2. Procesos y factores involucrados

Durante prácticamente el siglo de diferencia entre los trabajos de Petersen y la actualidad, los biólogos marinos conocen mucho más sobre el ciclo de vida de los invertebrados bentónicos, su desarrollo larvario o sobre la dinámica de estas poblaciones, especialmente para las fases planctónica de los organismo de sustrato duro (Todd, 1998).

Aunque sin duda, el conocimiento de las fases pelágicas de los organismos bentónicos es fundamental para el desarrollo de herramientas que permitan analizar y predecir la dinámica y estructura de las poblaciones, conocer cómo se produce la sedimentación larvaria y postlarvaria, también lo es ya que el ciclo de vida de los invertebrados se produce a lo largo de todos estos procesos.

Para el desarrollo de herramientas que permitan analizar la estructura de las comunidades bentónicas sería necesario contemplar un gran número de factores y procesos. Un resumen de los mismos se encuentra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resumen de los procesos y factores implicados en la estructura de las comunidades bentónicas producidos durante las etapas previas a la sedimentación, durante la sedimentación y las etapas posteriores a la misma. (Todd, 1998).

PROCESOS Y FACTORES		
ANTES SEDIMENTACIÓN (segundos – meses)	DURANTE LA SEDIMENTACIÓN (minutos – horas)	DESPUÉS DE LA SEDIMENTACIÓN (segundos – décadas)
Depredación de la larva (en la columna de agua)	Sedimentación / fijación adecuada en el sustrato	Competición inter- o intra-específica
Oceanográficos (corrientes, afloramientos, etc)	Interacción con propiedades del sustrato (tamaño partículas, existencia bacterias, biofilms, textura del sustrato,..)	Existencia de amensalismo en sustratos blandos
Factores hidrodinámicos locales (mareas, escorrentía hiposalina,..)	Existencia de organismos gregarios	Interacciones bióticas (depredación, compensación mortalidad, ...)
Calidad de las lavas	Existencia de predadores	Parasitismo y enfermedades
Comportamiento larvario (migración vertical, respuesta a la salinidad)	Respuesta ante agentes aleloquímicos ⁷⁴	Alteraciones físicas (ej. hidrodinámicas)
Capacidad de escoger sustrato (asentamiento primario)	Producción de una metamorfosis completa.	Tasas de reproducción
Depredación bentónica		Estrés abiótico
		Inmigración/emigración de otros juveniles y adultos.

Abordar todos los parámetros incluidos en la Tabla 4.3 en un único modelo parece a día de hoy una utopía debido a la complejidad de los fenómenos e interacciones que se deberían incluir en el algoritmo. Sin embargo, en la literatura se pueden encontrar trabajos que intentan reproducir

⁷⁴ Una sustancia producida por una especie que influencia el comportamiento o el crecimiento de miembros de otras especies (P. ej. algunas plantas emiten aromas que atraen a insectos predadores).

el comportamiento de alguna de etapas del ciclo de vida de los organismos bentónicos (ver p.ej. entre otras las revisiones de Eckman, 1996 y Tood 1998).

La etapa planctónica

La etapa más estudiada de la vida de los organismos bivalvos es la fase larvaria planctónica, y una revisión de las principales estrategias de modelización se puede encontrar en Eckman (1996). Además, existen otros trabajos parciales en los que se analiza la fase de sedimentación y asentamiento larvario desde una perspectiva física, es decir, tratando a las larvas como sedimentos en suspensión que poseen una velocidad de caída y un diámetro característico.

Algunos ejemplos de este tipo de trabajos son p.ej. el modelo numérico 2DV desarrollado por Gross *et al.* (1992) para flujos ondulatorios, que permite evaluar la concentración de larvas en suspensión y el flujo de larvas que sedimentan en el lecho de un modo similar al que lo hacen los modelos de transporte de sedimentos en suspensión.

Crimaldi *et al.* (2002) realizaron un estudio experimental en el que analizaron, para dos velocidades de flujo, las tensiones de Reynolds sobre tres densidades (ind/m²) y dos rugosidades (altura sobre el lecho) formadas por almejas “hincadas” verticalmente en un lecho fijo. El objetivo del trabajo era analizar la probabilidad de que las larvas se fijen al sustrato una vez estas lo alcanzan. Para ello, y sin entrar en consideraciones sobre si la larva es capaz de seleccionar el sustrato, definieron la probabilidad de que una larva se fije en función de una tensión crítica de arrastre y de un tiempo mínimo t_a para que se produzca la adhesión de la larva. Una vez superado este tiempo, se puede considerar que la larva no va a entrar en suspensión, ya que se adherirá o enterrará en el sustrato.

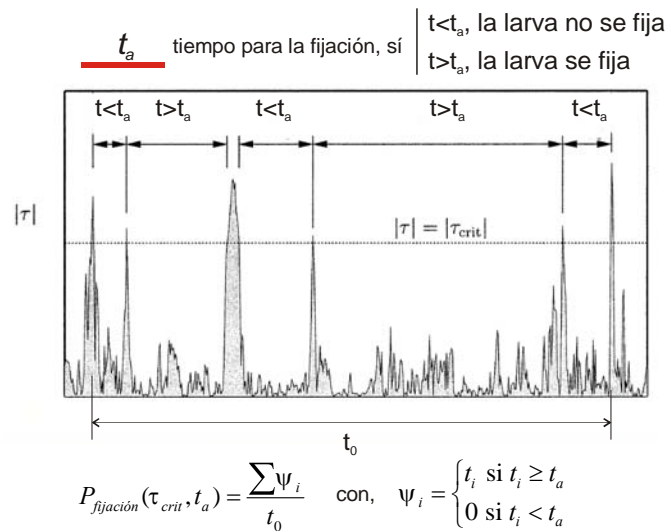


Figura 4.14. Esquema de un registro temporal de tensiones e identificación de la tensión umbral y la separación en episodios de fijación y no fijación de la larva en el sustrato en los experimentos de Crimaldi *et al.* (2002).

Así, con ayuda de un anemómetro láser LDA determinaron la fluctuación temporal del término $-\rho u' w'$ y, definiendo un umbral o una tensión crítica de arrastre de la larva (de un modo más o menos arbitrario), evaluaron la probabilidad de encontrar en el registro de tensiones picos superiores al umbral de arrastre separados intervalos de tiempo superiores a t_a (Figura 4.14).

Los resultados de Crimaldi *et al.* (2000) señalan que para rugosidades características mayores y menores densidades de reclutamiento, la probabilidad de fijación de la larva aumenta. Estos resultados concuerdan con lo que cabría esperar en la realidad ya que para estas condiciones, los moluscos generan más estelas y zonas de recirculación cerca del lecho. Otro aspecto interesante de este trabajo es que refleja la importancia de la hidrodinámica en la dinámica de las poblaciones bentónicas.

Siguiendo esta línea de trabajo, y empleando el modelo de sedimentación de partículas propuesto por McNair *et al.* (1997), Iris Hendriks (2004) presenta en el Capítulo 7 de su Tesis Doctoral un modelo probabilístico para analizar la probabilidad de que las larvas permanezcan en el lecho en función de la velocidad de sedimentación de las mismas, la distribución de los esfuerzos de corte (a través de la velocidad u_*) y el tiempo que tardan las larvas en sedimentar. Lo más relevante de este trabajo es que permite analizar de un modo cuantitativo la influencia de los cambios en la velocidad de sedimentación de las larvas (p.ej., si estas nadan o no) así como cambios en la tensión de arrastre de las mismas en la probabilidad de fijación de las larvas al sustrato. En definitiva, permite estimar el rango o la capacidad que tienen las larvas para poder escoger un sustrato de forma activa (van Duren, 2008).

La fijación en el sustrato

Una vez que la larva entra en contacto con el sustrato se puede producir el reclutamiento de la misma, si esta prospera y se convierte en un juvenil. Desde que la larva entra en contacto con el lecho hasta que se produce el reclutamiento se puede desarrollar la siguiente secuencia temporal, esquematizada en la Figura 4.15 (Jonsson *et al.*, 2004; van Duren, 2008):

- La larva entra en contacto con el sustrato y se produce una adhesión inicial de tipo pasivo o un despegamiento de la superficie por las fuerzas de arrastre y sustentación que ejerce el fluido sobre la larva, o porque el tiempo de contacto no es suficiente.
- Si la larva supera la adhesión inicial, ésta puede reorientarse y adherirse de forma temporal y activa al sustrato. En esta fase, el organismo no está exento de la acción de las fuerzas de arrastre que pueden ponerla nuevamente en suspensión.

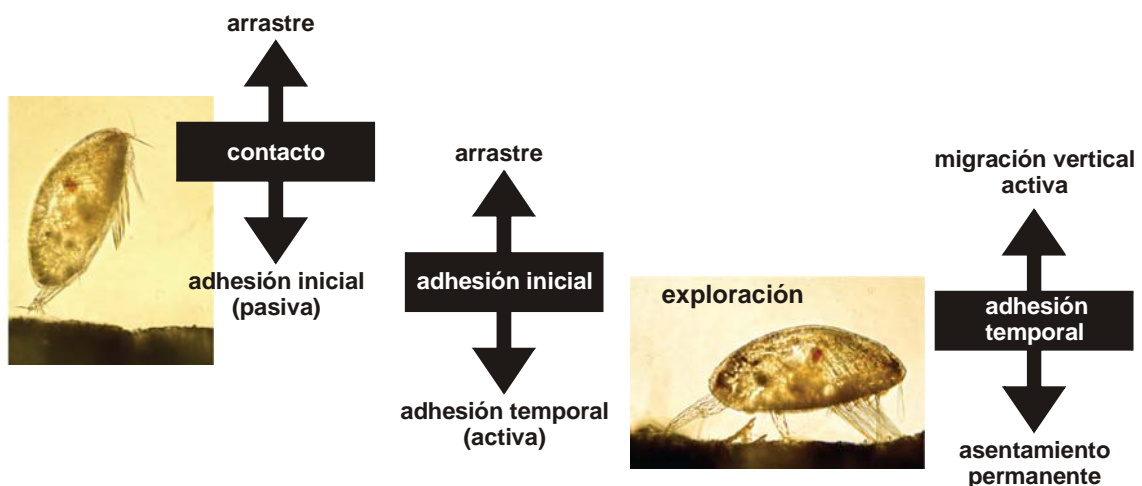


Figura 4.15. Modelo de los procesos que suceden entre la sedimentación y el reclutamiento de las larvas de organismos bentónicos. La larva presentada es un tipo de percebe del Mar del Norte, *Balanus improvisus* (adaptado de van Duren, 2008).

- La adhesión inicial permite a la larva explorar el territorio y analizar la idoneidad del sustrato. Ante los posibles estímulos que reciba, podrá seleccionar activamente la zona como óptima y realizar la metamorfosis, o rechazarla, y buscar una nueva ubicación.
- La fijación al sustrato permite a la larva crecer y permanecer en este sustrato. Si los bivalvos son de sustrato duro, aquí se termina el ciclo. Sin embargo, si el organismo es de sustrato blando, en algunos casos podrá intentar migrar verticalmente en la columna de agua de un modo activo, o pasivo si es arrastrada.

Es indudable que la etapa planctónica, previa al asentamiento y a la metamorfosis de las larvas, así como el proceso de fijación de las larvas al sustrato está íntimamente relacionada con factores de tipo hidrodinámicos, ya que cómo se ha señalado la capacidad de natación de las larvas es muy limitada. En la literatura, se reconoce la existencia de procesos activos que permitirían escoger a las larvas, y también juveniles, en cierta medida el sustrato (ver p.ej. la revisión de Butman, 1987).

En el siguiente apartado se discutirán estos aspectos, y la importancia de los mismos en varios trabajos realizados sobre diferentes ambientes y comunidades bentónicas. Otros factores importantes que condicionan el asentamiento de las larvas es la presencia de otros organismos de la misma o distinta especie.

Desde el punto de vista de las comunidades, las relaciones de competencia y depredación entre los organismos que pueden determinar la estructura de la misma. Estos fenómenos se escapan del ámbito de esta tesis doctoral, pero los aspectos más importantes se recogen en la revisión realizada por Wilson (1991). Desde una perspectiva más hidrodinámica, se pueden producir una serie de interacciones entre adultos y larvas que pueden afectar al proceso de fijación de los organismos planctónicos.

Así, los berberechos, por ejemplo, se consideran como “ingenieros del ecosistema” (Hendriks, 2004), ya que aunque probablemente no actúen como elementos biogénicos de rugosidad, los chorros emitidos por sus sifones si pueden interactuar con la estructura de la capa. Ertman y Jumars (1988), analizaron el flujo bombeado por el sifón del berberecho *Clinocardium nuttallii* y concluyeron que la interferencia de este era similar a la originada por un cilindro en el flujo.

Además, estas interacciones pueden modificar los patrones de flujo y afectar a los patrones de sedimentación de los individuos en estado larvario. Lindegarth *et al.* (2002) demostraron que la acción de un único berberecho *C. edule* puede reducir la sedimentación de las larvas hasta un 20% en su entorno (en una superficie de 2.5 cm²).

Andre *et al.*, (1993), realizaron estudios similares y comprobaron que la presencia de adultos de este tipo de berberecho reducían la probabilidad de sedimentación hasta un 33% en un área de 5 cm². También comprobaron que la reducción de larvas, cuando estas eran ingeridas por los adultos, podía alcanzar hasta un 75%. Otro efecto de la interacción-larva adulto está relacionado con la posibilidad de que la actividad de los adultos pueda enterrar y ahogar a las larvas recién sedimentadas (Woodin, 1976; citado por de Montaudouin y Bachelet, 1996).

Esta interacción a pequeña escala podría también afectar en los procesos de dispersión de las larvas a mayor escala (decenas-centenas de metros), explicados en la literatura por procesos de sedimentación activa y pasiva.

4.2.3.3. *Las hipótesis de la selección activa y pasiva*

La selección pasiva

En sentido estricto, la hipótesis de **la selección pasiva** implica que las larvas asientan en los mismos lugares que lo hacen los sedimentos que posean la misma velocidad de caída. Hay que señalar que esta hipótesis no excluye que una vez asentadas, las larvas se movilicen sobre el lecho por una serie de mecanismos activos.

El primer trabajo que postuló la importancia sedimentación pasiva lo realizó Baggerman (1953) que encontró que los patrones de distribución del berberecho *C. edule* en el Mar del Norte se correspondían con la de sedimentos de las mismas propiedades. Para ello determinó que la velocidad de caída de las larvas de berberecho es similar a la velocidad de caída de los sedimentos del entorno. Otros autores de esta época comenzaron a indicar que las corrientes fuertes mantienen las larvas en suspensión, mientras que las débiles permitían la deposición de las mismas sobre el fondo (Butman, 1987). Estudios más recientes (Hannan, 1984; Butman, 1990) también presentan conclusiones similares.

Otros autores, como Birkeland y Chia (1971, citados por Butman, 1987) observaron que el asentamiento de un tipo de estrella de mar en arenas con parches de guijarros era mayor que en zonas de arena plana, debido a la rugosidad y su relación con las velocidades desarrollados sobre los parches. Otros informes ofrecen más indicios indirectos del asentamiento pasivo ya que se han encontrado grandes acumulaciones de juveniles y adultos en depresiones y en praderas marinas.

Respecto a la resuspensión o migración vertical en la columna de agua pasiva de las larvas, por efecto de las corrientes, existen algunas evidencias indirectas de algunos estudios que han muestreado la composición y el número de organismos sobre el lecho marino antes y después de un temporal. Palmer y Gust (1985, citados por Butman, 1987) registraron las variaciones de las tensiones tangenciales sobre el lecho marino en un ciclo de marea y el contenido de organismos sobre el lecho y en la columna de agua. Su trabajo señala que la abundancia de organismos en los primeros centímetros de agua es mayor cuando la tensión superaba un valor crítico.

Un fenómeno similar también ha sido sugerido por Parada et al. (2007) para explicar la migración, o mejor dicho recolocación, de las poblaciones de berberechos adultos en la desembocadura del Ulla tras fuertes avenidas (ver apartado 4.1).

La selección activa

Respecto a los procesos de **selección activa**, éstos se han justificado en base a los ensayos de asentamiento larvario. Estos ensayos se pueden dividir en dos grandes grupos: 1) los estudios de selección de hábitat y 2) los estudios sobre los factores ambientales o biológicos que inducen la metamorfosis de la larva (Butman, 1987).

El **análisis de los factores ambientales y biológicos** que inducen la metamorfosis de las larvas comenzó con los primeros trabajos de Wilson en la década de 1930 (Butman, 1987). Este autor comenzó a realizar estudios sistemáticos que consistían en introducir larvas competentes (capaces biológicamente de asentarse) en placas de Petri con diferentes tipo de sustrato y agua. Después de cierto tiempo, se recuentan las larvas metamorfoseadas y con la ayuda de métodos estadísticos como el Análisis de la Varianza o ANOVA (ver descripción en el

apartado 4.3.6 y Apéndice 2), se pueden inferir que tratamientos inducen significativamente la metamorfosis.

Los trabajos de esta línea revelan que ciertos compuestos orgánicos (agentes aleloquímicos) pueden inducir la metamorfosis, siendo específicos para cada especie. La ausencia de los mismos podría retrasarla, y así impedir el asentamiento larvario en sustratos no adecuados. También se ha descubierto que existen larvas que pueden alimentarse durante la fase planctónica, lo que amplifica el periodo de competencia de la larva, y también se han encontrado larvas de algunos corales con metamorfosis reversibles (Butman, 1987).

En la actualidad, para reproducir con más fidelidad la respuesta de las larvas frente a la acción de los agentes aleloquímicos se están desarrollando nuevos experimentos en laboratorio que reproducen las condiciones hidrodinámicas naturales. Un ejemplo, es la serie de trabajos realizados por Koehl y Hadfiel (Hadfiel y Koehl, 2004; Koehl y Reidenbach, 2007; Koehl *et al.*, 2007) en los que se analiza cómo un metabolito generado por un tipo de coral hawaiano afecta a la sedimentación de las larvas de un tipo de nudibranquio que habita en los mismos.

En estos trabajos se visualiza con la ayuda de la técnica Laser Induced Fluorescence (LIF), la difusión del metabolito en el flujo, Figura 4.16. Estos autores, han desarrollado y validado un modelo numérico para predecir la tasa de transporte de larvas hacia el coral en función del porcentaje de metabolito presente en el entorno (Koehl *et al.*, 2007). Los ensayos fueron realizados con calados, velocidades y oleaje similares a los encontrados en la realidad (Koehl y Reidenbach, 2007)

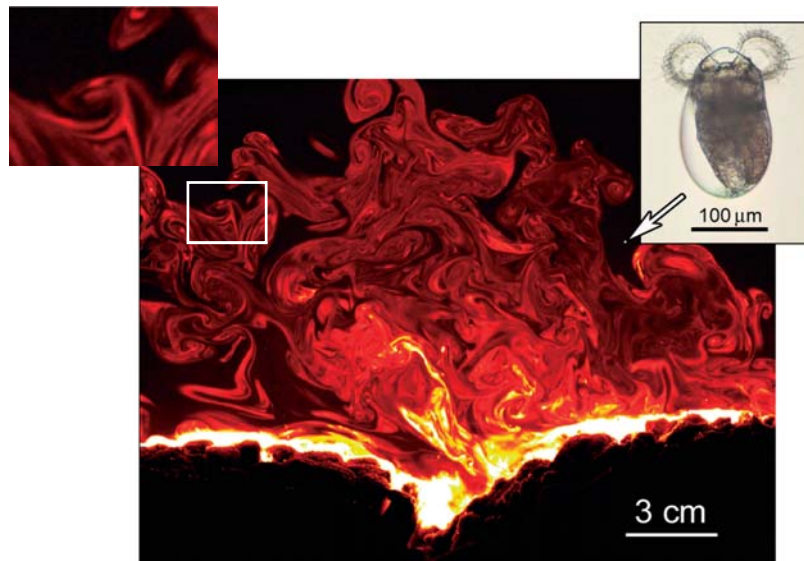


Figura 4.16. Mapa instantáneo de concentraciones del metabolito expulsado por el coral *Porites compressa* y detalle del tamaño y forma de la larva de *Phestilla sibogea* inducida por este agente aleloquímico. La imagen se corresponde aun flujo ondulatorio en laboratorio visualizado con LIF (Koehl *et al.*, 2007).

También realizaron unos ensayos en un microcanal de pocos centímetros de espesor que disponía de un microscopio electrónico. Los resultados señalan que con el paso de los filamentos que contenían el metabolito, las larvas retraían el velo y dejaban de nadar, para así facilitar el proceso de asentamiento (Figura 4.17).

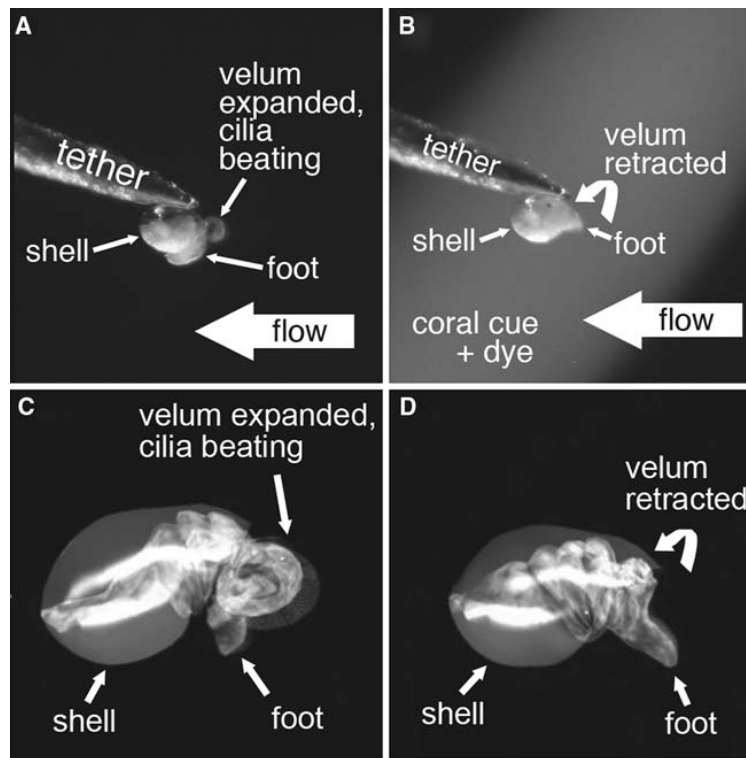


Figura 4.17. a) y b) Vista lateral de una larva de *P. Sibogae* sujeta a las mismas condiciones de flujo, c) y d) representan diagramas de la larva en las posiciones a) y b). En a) el agua circulante no contenía el inductor de la sedimentación, el pie y el velo están extendidos y el cilio se mueve. En b) pasa un filamento de metabolito y la larva retrae el velo y el pie y deja de nadar (Koehl y Reindenbach, 2007).

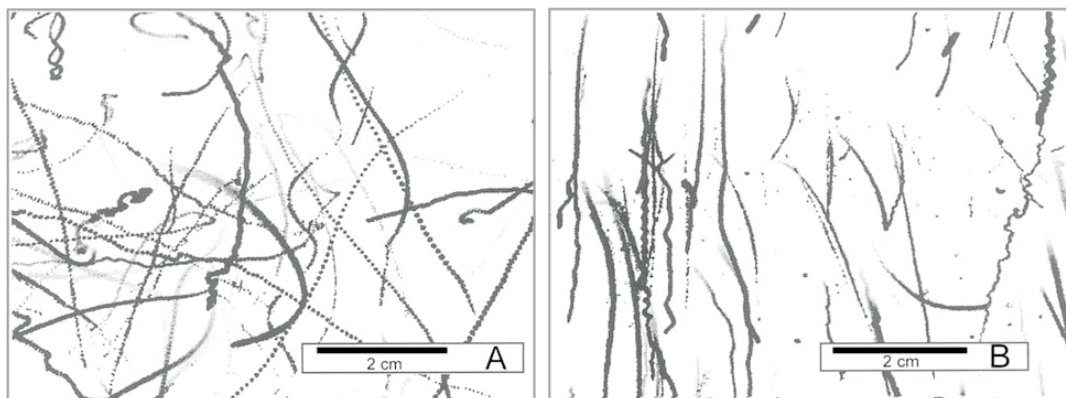


Figura 4.18. Trayectorias del movimiento de la larva de *P. sibogae* digitalizados a partir de una grabación realizada en un ambiente sin flujo: a) movimiento en agua de mar filtrada y b) movimiento en agua de mar saturada con el metabolito generado por el coral *P. compressa* (Hadfield y Koehl, 2004).

Este comportamiento también fue constatado en una serie de experimentos sin flujo en los que pudieron apreciar como en un entorno libre de agente aleloquímico el movimiento de las larvas era errático, Figura 4.18 (a). Sin embargo, al añadir metabolito, el patrón de sedimentación de las larvas es similar al de partículas inertes, Figura 4.18 (b).

Respecto a la línea de **trabajos de selección de hábitat o sustrato**, se puede señalar que también los primeros estudios se deben a Wilson, aunque estos comenzaron a realizarse un poco más tarde, en la década de 1950 (Butman, 1987). Éste, y otros trabajos, se realizaron en placas Petri de entre 3 y 9 cm de diámetro, donde las larvas debían seleccionar entre varios montones de sustrato de unos 0.75 a 1.5 cm de diámetro. Las conclusiones de estos trabajos van en la línea de demostrar que los organismos prefieren asentarse en un tipo de sedimento más que en caracterizar su hábitat natural en fases adultas.

Además, en estos estudios, las larvas tenían que seleccionar el tipo de sustrato nadando unos pocos centímetros ya que los experimentos se desarrollaron en placas de Petri de pocos centímetros de diámetro (Huxham y Richards, 2003). En los trabajos más recientes de selección activa se han empleado acuarios de pocos centímetros (p.ej. Sidgursson *et al.*, 1976; Yankson, 1986), columnas de sedimentación (Beukema y de Vlas, 1989; Olivier y Retière, 2006), o canales con áreas de ensayo para realizar la selección activa no superiores al metro de longitud (de Montaudouin, 1997; de Montaudouin *et al.*, 2003).

El principal problema de los primeros ensayos de selección de hábitat es se realizaban en pequeña escala y en escenarios de flujo poco realistas. La importancia de reproducir el medio natural fue constatada por Snelgrove *et al.*(1998) en una serie de ensayos de elección de hábitat realizados en un canal de recirculación en forma de circuito de carreras o hipódromo (ver Figura 4.29).

Estos autores hicieron unos ensayos con una larva de un tipo de almeja, *Spisula solidissima*, que habitualmente viven en sustratos arenosos, en condiciones de flujo y en agua en reposo. Sus conclusiones indican que en condiciones de flujo ($u_* = 0.26$ cm/s), la larva si presenta selección activa de sustrato, prefiriendo los sustratos arenosos, aunque en condiciones de aguas tranquilas, el proceso de selección no funciona y sedimenta más en lechos fangosos.

Además, hay que señalar que al contrario que en los sustratos duros, donde la macrofauna es más sedentaria, es habitual que las poblaciones de juveniles no se encuentren en las zonas donde inicialmente se produjo el asentamiento de las larvas (Armonies, 1992; Armonies y Hellwig-Armonies, 1992; Armonies y Hartke, 1995; de Montaudouin y Bachelet, 1996; de Montaudouin, 1997; Hiddink *et al.*, 2002; Huxham y Richards, 2003). Este fenómeno se produce porque algunas especies de sustrato blando presentan varias etapas de asentamiento a lo largo de su vida. Esto les permitiría migrar entre zonas con diferentes tasas de depredación o de disponibilidad de comida (Beukema y de Vlas, 1989).

El mecanismo de selección de hábitat de los moluscos bivalvos se apoya en la capacidad que estos tienen de cambiar sus propiedades hidrodinámicas a través de la secreción de un filamento con su glándula de biso, denominado *byssus thread*, Figura 4.19 (a). Este filamento, que puede ser varios ordenes de magnitud superior a la larva o al juvenil, incrementa la fuerza de arrastre viscoso ejercida sobre el bivalvo de forma que éste es resuspendido con velocidades de corte inferiores a las que provocarían su resuspensión para escenarios en los que no segregase el biso. Este fenómeno se conoce como en la literatura como *byssus drifting*, o dispersión por biso, y fue descrito por primera vez por Sigurdsson *et al.* (1976) en un trabajo realizado sobre 20 especies marinas publicado en la revista *Nature*.

Yankson (1986) realizó una serie de experimentos sobre las glándulas de generación de biso de dos tipos de berberecho: el *C. edule* y el *C.glaucum*, analizando la forma de los filamentos secretados por organismos juveniles de entre 1 y 6.5 mm (Figura 4.19 (b)). Los juveniles de *C.edule* segregan un biso transparente, elástico, no esclerotizado que puede ser empleado

para arrastrarse, modificar su coeficiente de arrastre y dispersarse horizontal, o incluso para escalar por las paredes del acuario donde se realizaron las pruebas.

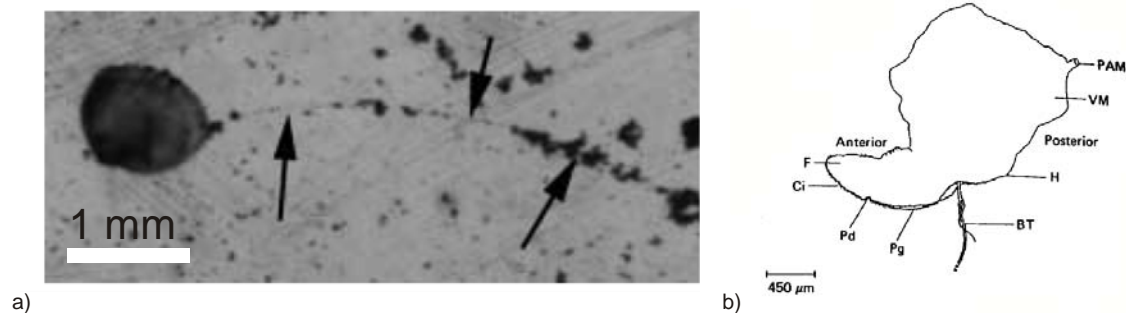


Figura 4.19. a) Secreción de bisco de un juvenil 0 de *Macoma balthica* coloreado con alcano azul (Hiddink et al., 2002) y b) disección de la vianda de un juvenil un *C.edule* con su pie (F), secreción de bisco (B), cilio (Ci), talón (H), depresión y surco pedal (Pg y Pd), músculo abductor posterior (PAM) y masa visceral (VM), adaptado de Yanksson (1986)

El bisco es similar al hilo de las telas de araña. El tamaño de las secreciones está entre 2 y 4 mm tiene un diámetro de unas 10-15 micras. El bisco del *C.glaucum* es más resistente y tiene varias ramificaciones. Para los juveniles más grandes, los filamentos sedimentan rápidamente y se entierran en los primeros centímetros del lecho, por lo que capacidad “exploratoria” y de dispersión horizontal se reduciría con el tamaño del molusco.

Si una especie en su fase postlarvaria funciona de forma pasiva, se podría estimar su hábitat asimilando que se comportan como sedimentos con la misma velocidad de sedimentación. Sin embargo, si son organismos capaces de segregar bisco, su velocidad de sedimentación decrece considerablemente y podrían migrar verticalmente en la columna de agua en condiciones hidrodinámicamente desfavorables, a través de procesos de selección activa.

Algunos estudios en laboratorio demuestran que las larvas de algunas especies pueden reducir su velocidad de sedimentación a través de la secreción de bisco. Por ejemplo, Beukema y de Vlas (1989) estudiaron la influencia de la secreción de bisco en juveniles de hasta 6 mm de *M.balthica* y encontraron que los tiempos de sedimentación se pueden duplicar y hasta triplicar, en función de la longitud del filamento. Estos autores también señalan que este filamento es muy sensible, y que incluso en bajas condiciones de flujo, el movimiento del agua puede romperlo incrementándose nuevamente la velocidad de sedimentación. Hiddink et al. (2002), confirman la fragilidad de las secreciones, indicando además que son difíciles de analizar porque son transparentes y cuando el organismo percibe un toque, cierra bruscamente las balbas y corta el filamento.

Olivier y Retière (2006) estudiaron los patrones de sedimentación y la puesta en suspensión del gusano marino *Pectinaria koreni* en una columna de sedimentación y en canal de recirculación Hycobenthos, del Laboratorio de la Estación Marina de Dinard (Francia). En los ensayos de sedimentación analizaron la velocidad de caída de los poliquetos en función de su estado (vivo o muerto). Sus conclusiones indican que las velocidades de sedimentación para los organismos muertos (entre 1 y 6 cm/s) se correlacionan bien con la velocidad de caída de partículas troncocónicas con una densidad similar. Las velocidades de sedimentación de los gusanos vivos se reducía sólo si estos segregan bisco (asentamiento activo). Si no lo hacían, éstas eran comparables a los de los moluscos muertos (asentamiento pasivo).

Además, el porcentaje de organismos que segregaban bisco era inversamente proporcional a su tamaño. De hecho, para gusanos superiores a los 5 mm la secreción de bisco era prácticamente inapreciable y las relaciones entre $W_{s,pasivo} / W_{s,activo}$ se reducía de ~ 3.8 para el menor tamaño hasta $\sim 1.22 - 1.03$ para las dos clases mayores, como se puede apreciar en la Figura 4.20.

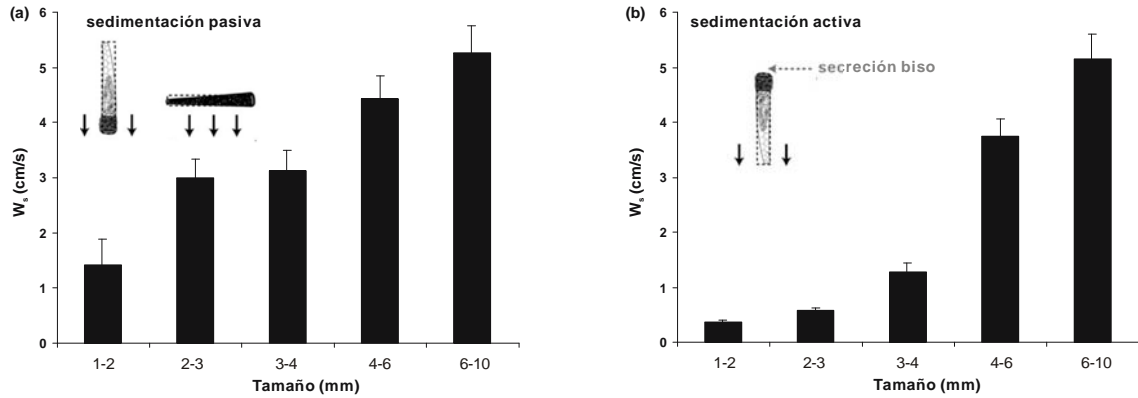


Figura 4.20. Velocidad de sedimentación (media \pm SE) de las larvas de poliqueto *Pectinaria Koreni* en función de su tamaño y estado de segregación de bisco: a) asentamiento pasivo y b) asentamiento activo, con filamento de bisco (Olivier y Retière, 2006). En la figura se presenta también un esquema del patrón de sedimentación de los poliquetos.

Estos autores también señalan que el patrón de sedimentación era diferente cuando existía el filamento de bisco, ya que en estos casos el descenso era vertical con la cabeza del gusano hacia arriba (hablan de un patrón tipo paracaídas). Cuando el poliqueto no segregaba bisco, el cuerpo caía irregularmente (ver Figura 4.20).

Para analizar la influencia de la secreción de bisco en la movilización de las larvas de este gusano marino, Olivier y Retière colocaron individuos aislados (vivos y muertos) en un lecho de sedimento y midieron la velocidad de corte que los movilizaba (de un modo similar a los trabajos realizados desde el GEAMA con berberechos muertos, ver 4.2.5 y Apéndice 1). Los resultados señalan que las velocidades de corte correspondientes al umbral del movimiento para los poliquetos vivos son significativamente (estadísticamente) inferiores que para los organismos muertos: $u^* = 1.12 \pm 0.03$ cm/s vs $u^* = 1.27 \pm 0.02$ cm/s. Por tallas, la velocidad de corte media para los organismos de longitud inferior a 5 mm presentaba mucha dispersión y las diferencias entre estados no fueron significativas. Los autores intentaron representar el umbral de movimiento de las larvas a través del número densimétrico de Shields, pero el ajuste presentaba la dispersión habitual que se puede encontrar en algunos trabajos de transporte de sedimentos ($R^2 = 0.41$)

Los resultados de Olivier y Retière (2006) son cualitativamente similares a los descritos en varios trabajos de X. de Montaudouin (de Montaudouin y Bachelet, 1996; de Montaudouin, 1997; de Montaudouin *et al.*, 2003) realizados con juveniles de *C.edule* de hasta 6 mm de tamaño (tamaño medio ~ 2 mm). Estos autores realizaron una serie de experimentos sobre el asentamiento secundario de este organismo en el canal Hycobentho. En estos ensayos estudiaron qué influencia poseía el tipo de sustrato, la interacción con otros adultos, el tamaño y el estado: vivo o muerto (que asociaron con la capacidad de secreción de bisco), en el asentamiento de los bivalvos.

La metodología de los experimentos de selección de hábitat fue similar en los tres trabajos. Los autores colocaron en una sección situada habitualmente aguas arriba de la zona central del

canal los juveniles, sobre un sustrato de plexiglás (el material con el que está conformado el canal), o al inicio de la sección de análisis de 0.5 x 1 m (ver Figura 4.21). En los experimentos la velocidad de ensayo varió entre 10 y 24 cm/s, con velocidades de fricción entre 0.51 y 0.99 cm/s. En las referencias señaladas se pueden encontrar más detalles del montaje experimental.

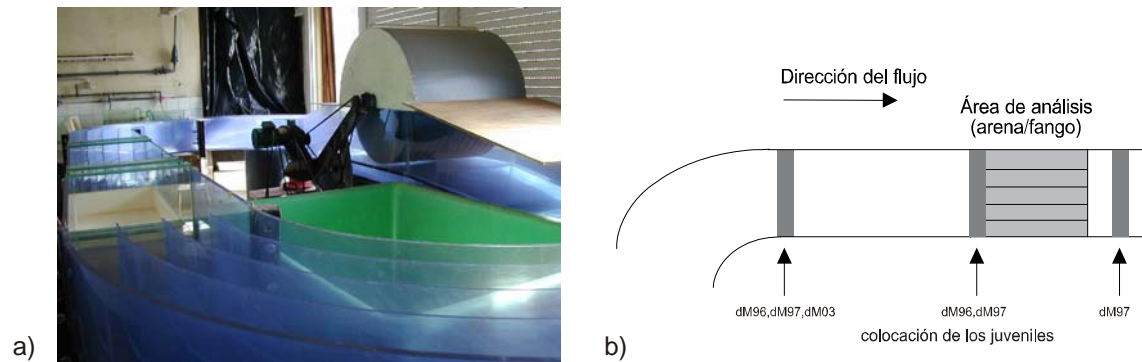


Figura 4.21. Canal de ensayos Hycobenthos a) fotografía y b) esquema de los ensayos de selección de sustrato (adaptado de de Montaudouin y Bachelet, 1996; de Montaudouin, 1997; de Montaudouin et al., 2003).

Los resultados de estos trabajos señalan que los juveniles de *C.edule* presentan cierta capacidad de seleccionar el sustrato, ya que una vez que estos abandonan la zona de plexiglás inicial, tienden a quedar retenidos en la zona de arena. Montadouin (1997), cifra este asentamiento en un $42\pm 15\%$ y $79\pm 9\%$ para las velocidades de corte de 0.51 y 0.99 cm/s respectivamente. En experimentos similares con juveniles muertos, sólo el $4\pm 7\%$ y $14\pm 14\%$ se fijan en esta área que representa un $\sim 8\%$ de la superficie del canal.

En este trabajo, el autor comparó el comportamiento de los juveniles de berberecho con el de juveniles de almeja japonesa (*Ruditapes philippinarum*). Los juveniles de esta última especie vivos prácticamente no se movilizaron, ya que una vez situados sobre el plexiglás, se adhirieron a esta superficie (el porcentaje de juveniles en la arena fue de un $\sim 0\%$ y un $\sim 3\%$ para las velocidades ensayadas. Montaudouin *et al.*, (2003) realizaron una serie de ensayos con individuos de tamaños similares y bajo las mismas velocidades de fricción, empleando dos sustratos diferentes: uno arenoso y otro fangoso. Las conclusiones de este trabajo indican que los juveniles de *C.edule* son capaces de diferenciar el tipo de sustrato, asentando de un modo más significativo en el arenosos que en el fangoso: 42% y 76% vs 18% y 16% para $u_* = 0.51$ y 0.99 cm/s respectivamente.

Tabla 4.4. Comparación de las velocidades de sedimentación activa y pasiva para juveniles de *C.edule* (de Montadounouin, 1997).

Tamaño (mm)	$W_{s, activa}$ (cm/s)	$W_{s, pasiva}$ (cm/s)	$W_{s,p} / W_{s,a}$ (-)
~ 0.7	~ 0.08	~ 1.22	~ 15
~ 2.1	~ 0.52	~ 3.46	~ 7
~ 3 - 4	~ 3.3 - 4.9	~ 6.7	~ 1 - 2

En esta serie de estudios, de Montadouin (1997) también estudió la influencia del estado y la secreción de biso de los juveniles de *C.edule* y *R.philippinarum*. Los resultados señalan que los juveniles de almeja no son capaces de modificar su velocidad de sedimentación, mientras que los de berberecho, a través de la secreción de biso, pueden reducir su velocidad de caída hasta 15 veces (Tabla 4.4). En este trabajo también se constataron aceleraciones y deceleraciones en la caída de algunos organismos vivos vinculados a la rotura y generación del filamento de biso.

A medida que el tamaño del molusco crece, la capacidad de regular su velocidad de caída decrece. A partir de ~5 mm, los moluscos vivos se comportan como los muertos. La velocidad de caída se puede asimilar a la velocidad vertical necesaria para poner en suspensión a las larvas. Sidgursson *et al.* (1978) señalan que las corrientes verticales oceánicas, del orden ~1 cm/s cerca del lecho, podrían movilizar juveniles de aquellos organismo que de forma activa, “redujesen” su peso específico a través de la secreción de biso.

Como conclusión de este epígrafe se puede indicar que existen evidencias que confirman que algunos tipos de organismos bentónicos pueden presentar en su fase larvaria y postlarvaria cierta capacidad de selección de hábitat ante ciertos estímulos externos como los agentes aleloquímicos o la presencia de un determinado sustrato. Sin embargo, a la hora de extrapolar los resultados a campo se debe ser cauto ya que las escalas involucradas o la complejidad del flujo en un medio natural no se pueden reproducir fielmente en escala de laboratorio.

Por ejemplo, en los experimentos de selección de sustrato de de Montadouin, los juveniles de *C.edule* presentaban predilección por un sustrato arenoso frente a uno fangoso o a una superficie de plexiglás. Sin embargo, en una situación real, los flujos son hidráulicamente mucho más rugosos que los analizados en estos y en la mayoría de los trabajos a escala de laboratorio (§4.2.5). Cómo se ha visto ya en el Cap. 2, y se retomará en el apartado 4.2.4, la rugosidad del lecho afecta a la estructura del flujo y de las tensiones de arrastre, incrementándose las fuerzas de arrastre de tipo dispersivas o de forma sobre los elementos del lecho.

Las evidencias en los trabajos de campo

Como sucede en otros campos de la ciencia y la ingeniería, es habitual realizar trabajos en campo para comparar los resultados con los obtenidos en laboratorio y comprobar hasta que medida estos son extrapolables. En otras ocasiones, los trabajos de campo son indispensables porque la realidad es demasiado compleja para reproducir experimental o numéricamente en entornos controlados.

Por este motivo, la principal ventaja que poseen los trabajos de campo es que ofrecen, si están bien desarrollados y analizados, resultados reales. Sin embargo, debido a la complejidad de los fenómenos reales, estos trabajos cuentan con la limitación de la instrumentación empleada para caracterizar, por ejemplo, los procesos de asentamiento y fijación. Para realizar estos análisis es habitual emplear trampas de sedimentos colocadas a cierta altura sobre el lecho (p.ej. Butman, 1987, 1990; Armonies, 1992; Commito *et al.*, 1995), con bombas sumergibles fondeadas desde una embarcación (Snelgrove *et al.*, 1999), o sobre el propio lecho (ver p.ej. Armonies y Hellwig-Armonies, 1992; Commito *et al.*, 1995; Armonies, 1996; Huxham y Richards, 2003; Hunt *et al.*, 2007)

Independientemente del método de recolección de muestras, es imposible determinar de un modo distribuido (no agregado) las diferentes fases de la migración vertical y asentamiento

larvario: asentamiento primario, mortalidad, migraciones verticales en la columna de agua (ya sean debidas a procesos de selección activos o pasivos) y recolocaciones (Butman, 1987). Por este motivo, es difícil inferir la verdadera importancia de la capacidad de selección de hábitat de las especies estudiadas (Snelgrove *et al.*, 1999).

Otra limitación de los trabajos de campo es que se deben seleccionar escalas (temporales y espaciales) adecuadas para poder analizar los fenómenos que realmente se desean estudiar. Así, hay procesos como el asentamiento secundario (de tipo pasivo) o la depredación que pueden necesitar escalas cortas (del orden de días, Snelgrove *et al.*, 1999) y otros como, la dispersión por efecto de bise que suceden 10 o 15 después de que las larvas asienten (Armonies y Hellwig-Armonies, 1992; Bouma *et al.*, 2001). También la escala espacial debe ser adecuada, ya que la mayoría de los trabajos se focalizan en áreas del orden del km² y en algunos ecosistemas se han detectado variaciones en las poblaciones del orden de la decenas de km, sin que estén involucrados climas extremales (Armonies, 2000).

En los trabajos de campo, los movimientos migratorios de los juveniles de muchas especies han sido registrado en la literatura en numerosas ocasiones: p.ej Armonies (1992) o Armonies y Armonies y Hellwigig-Armonies (1992) estudiaron los movimientos migratorios de juveniles de *C.edule* y *M.Balthica* en el mar de Wadden. En esta región también se pueden citar los trabajos de Armonies y Hartke (1995), que estudiaron el proceso de migración en época estival del caracol de mar *Hydrobia ulvae*, o el de Armonies(1996) que analizó los patrones de migración anuales de cinco especies: *M.balthica*, *C.edule*, la almeja *Mya arenaria*, el mejillón *Mytilus edulis* y la navaja *Ensis americanis*..

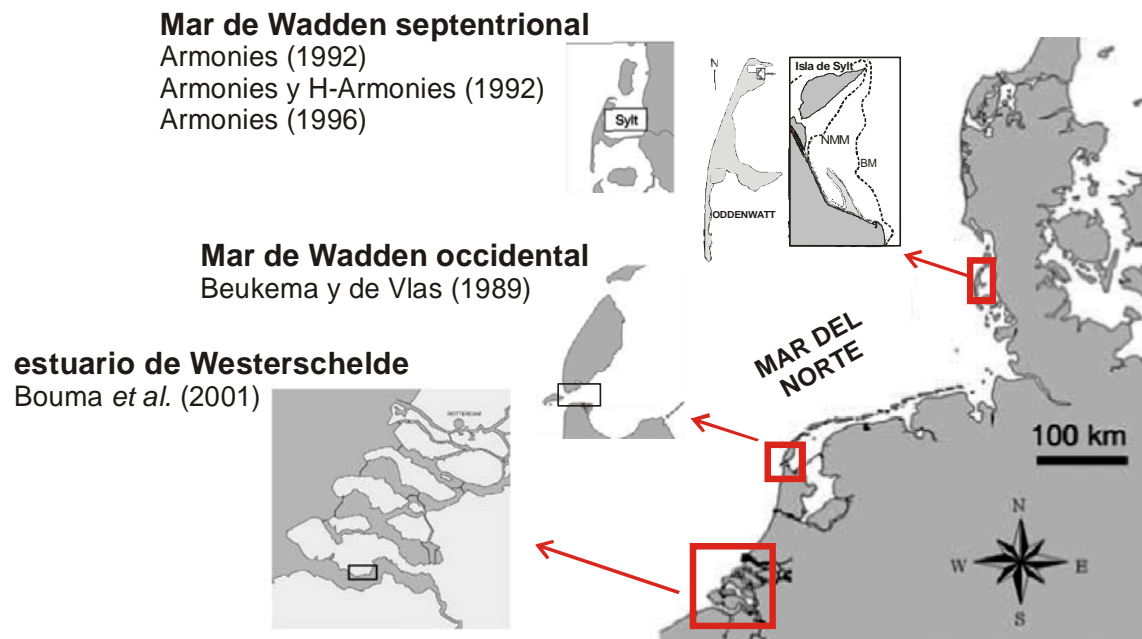


Figura 4.22. Situación de las áreas estudiadas en las principales referencias bibliográficas del Mar de Wadden / Norte.

Beukema y de Vlas (1989) descubrieron un movimiento migratorio de la *M.balthica* desde la zona más occidental del mar de Wadden (§Figura 4.22) hacia el mar del Norte a través de una de las bocanas que existen en las islas barrera del cordón litoral que encierra al mar de Wadden. Este movimiento migratorio se produce en otoño-invierno, cuando las larvas que asentaron inicialmente en primavera-verano, sufren un asentamiento secundario. Esta

migración está producida por las corrientes de marea, que en esta época presentan un reflujo de mayor intensidad que el flujo asociado a la marea llanante, pero también por un mecanismo activo que incrementa el coeficiente de arrastre a través de la secreción de biso (estos mismos autores lo demostraron en ensayos de columna de sedimentación).

Según Beukema y de Vlas, para los juveniles de *M.balthica* esta migración hacia zonas intermareales bajas y submareales es beneficiosa porque reducen los riesgos de acción de parásitos y también incrementan su capacidad de filtración de alimento. Por el contrario, para la *M.balthica* recién nacida en primavera-verano, las zonas mareales altas del abrigado mar de Wadden, son más beneficiosas porque el sedimento es de menor diámetro (en las zonas submareales son del mismo orden de magnitud que las larvas) y además es más estable (se mueve menos por la acción del oleaje). En estas condiciones, las larvas tienen más tiempo para comer al estar en un ambiente más tranquilo. Además, en las zonas intermareales altas la presencia de los depredadores como crustáceos es mucho menor que en las zonas intermareales bajas y submareales. Beukema y de Vlas (1989) también señalan que otras poblaciones de *M.balthica* en la bahía de Hudson, Canadá, o en la costa este de Norte América también presentan una migración similar.

Los trabajos desarrollados por el grupo de W.Armonies en la zona intermareal de Odenwatt, cerca de la isla de Sylt, en el norte del mar de Wadden (§Figura 4.22), han proporcionado mucha información sobre la dinámica de varias poblaciones de organismos bentónicos como el *C.edule* y principalmente, la *M.balthica*. En los primeros trabajos consultados de Armonies (1992), este autor analizó la presencia de larvas y juveniles de estas especies en la columna de agua en una zona intermareal baja. Los resultados de este trabajo señalan la existencia de varios patrones en puesta en suspensión de estos bivalvos.

Así, la presencia de juveniles en la columna era mucho mayor por la noche que por el día, encontrándose hasta ~3 y ~2 veces más berberechos y almejas durante la noche. Armonies también describe un patrón de variación estacional para el *C.edule*, con un máximo de individuos en la columna de agua a finales de Junio y valores mínimos en Septiembre. Analizando la autocorrelación de la serie también se señala que el berberecho presenta un patrón de variación lunar, con picos en la cantidad de juveniles en suspensión que coinciden aproximadamente con las mareas vivas. El análisis de la serie temporal de *M.balthica* indica que este molusco no presenta patrones regulares como el *C.edule*, aunque su presencia en la columna de agua se reduce de forma gradual desde Junio a Octubre. Otros parámetros, como la velocidad de viento y el oleaje asociado al mismo, interactúan con los patrones estacionales y lunares descritos.

Armonies y Hellwig-Armonies (1992) analizaron la variación de la cantidad de gametos, larvas y juveniles presentes en el sedimento a lo largo de un transecto perpendicular a la línea de costa en la zona intermareal situada enfrente de la isla de Sylt (en la misma playa que el estudio anterior). En Mayo, y coincidiendo con la etapa de producción de gónadas y liberación de gametos de *Macoma*, la mayor densidad de larvas se concentra cerca de la zona intermareal baja, reduciéndose su número hacia la zona intermareal alta.

El análisis de la población de juveniles de esta especie en Septiembre-Octubre revela la existencia de una migración de los mismos hacia las zonas intermareales altas. Esta migración es atribuible a un proceso activo de secreción de biso que favorecería la migración vertical en la columna de agua de los juveniles de *Macoma*. Como se recoge en el trabajo de Armonies (1992), la mayor cantidad de juveniles de esta especie migrarían en Junio, y el ritmo decrecería con los patrones señalados anteriormente.

Por tanto, la *M. balthica* en el mar de Wadden presenta dos migraciones durante su fase bentónica. La primera migración de primavera se produce entre los meses de Mayo a Junio. En ésta, las larvas que acaban de ser dispersadas por los adultos en la zona intermareal baja, migran verticalmente inducidas por un mecanismo activo de secreción de bisco, y se movilizan hacia las zonas intermareales altas (Armonies y Hellwig-Armonies, 1992). La segunda migración, de invierno, se produce unos 7 u 8 meses después, entre Diciembre y Marzo. En esta fase, los juveniles de 3 a 7 mm de tamaño, retornan a las zonas intermareales bajas (Beukema y de Vlas, 1989), como se representa en la Figura 4.23.

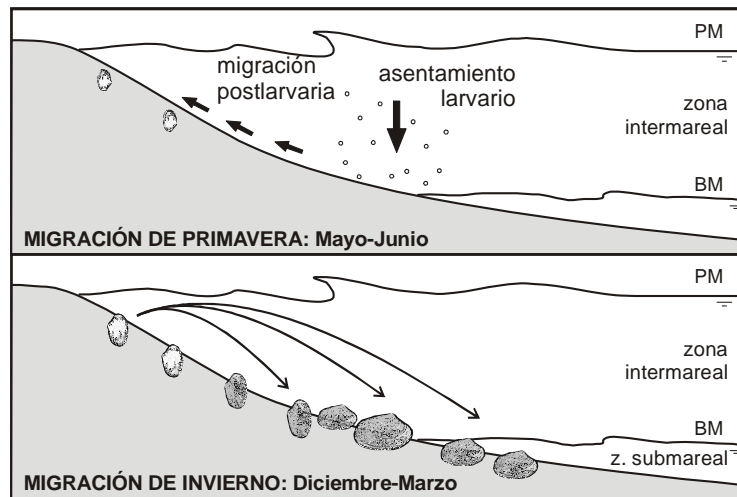


Figura 4.23. Migraciones durante la fase bentónica de la *Macoma balthica* en el mar de Wadden (adaptado de van Duren, 2008).

Ambas migraciones están motivadas por procesos de secreción de bisco, y, entre otras, permiten a los organismos reducir la posibilidad de ser ingeridos por depredadores (p.ej. crustáceos y pájaros, respectivamente). Sin embargo, durante los movimientos migratorios se produce una alta desaparición de individuos.

Hiddink *et al.* (2002), señalan que este fenómeno puede estar relacionado con la ingestión de las larvas y juveniles por la fauna pelágica. Estos autores realizaron una serie de experimentos en un canal-acuario circular en los que analizaron el efecto de la iluminación (día/noche) y del movimiento de agua (quieta/corriente) en la capacidad de depredación de varios peces comunes en la zona del mar del Norte/ de Wadden sobre dos poblaciones de *Macoma*: una con tamaño larvario, para representar la migración de primavera, y la otra con tamaño postlarvario, representando la población de la migración de invierno.

Los resultados obtenidos por estos autores señalan que bajo condiciones de iluminación la ingesta de *Macoma* en suspensión es mucho mayor que en condiciones de flujo tranquilo. En condiciones de oscuridad, las tasas de depredación se reducen notablemente y no existen diferencias significativas con el factor corriente. Según Hiddink *et al.* (2002), este fenómeno explica por qué la dispersión de *M. balthica* se producen fundamentalmente por la noche (Armonies, 1992).

Desafortunadamente, los resultados obtenidos en el entorno de la isla de Sylt en el mar de Wadden sobre la dinámica de las poblaciones bentónicas no son extrapolables a otras latitudes y/o a otros ambientes marinos más expuestos con una hidrodinámica más energética.

Por ejemplo, Bouma *et al.* (2001) estudiaron el asentamiento primario de los gametos de *C.edule* y *M.balthica* (300 a 1000 micras) en la zona intermareal de Plaat van Baarland, en el estuario de Westerschelde (Holanda, §Figura 4.22). En esta zona intermareal fangoso-arenosa, la hidrodinámica está dominada por las corrientes de mareas (la carrera de marea es de unos ~4.5 m, mientras que en la zona de la isla de Sylt es de ~2 m), que adquieren velocidades del orden de ~1 a ~1.5 m/s.

En este trabajo los autores analizaron la variación de larvas reclutadas en función del transporte de sedimentos, medido en términos de erosión y/o acreción máxima del lecho intermareal, del reclutamiento de adultos, del contenido de finos y del diámetro medio del sedimento. Para ello, hicieron un análisis de regresión lineal múltiple de Pearson sobre los datos recogidos en una malla rectangular de 700 x 800 m² (puntos cada 100 m) tras la gametogénesis de estas especies, entre Mayo y Junio.

Los resultados del estudio señalan que la presencia de individuos está inversamente correlacionada con la dinámica sedimentaria (en concreto, con los ratios de erosión) y con el diámetro medio del sedimento. Existe una correlación directa con la cota del lecho, es decir, mayor cantidad de individuos en la zona intermareal alta. Hay que señalar que los coeficientes de correlación determinados (Producto Momento de Pearson) tienen significancia estadística pero su valor no es muy elevado (~0.45 – 0.55). Los autores no encontraron ninguna relación entre el contenido de finos o la densidad de adultos reclutados y la cantidad de larvas fijadas.

Por tanto, en este trabajo, el reclutamiento temprano se produce en las zonas intermareales altas, al contrario de lo que se refleja la literatura de la isla de Sylt del mar de Wadden. En el Plaat van Baarland, en las zonas de menor reclutamiento el diámetro de sedimento es mayor, existe más proporción de arena, y en general, las corrientes y las fluctuaciones del lecho son más importantes.

Hunt *et al.* (2007) analizaron el transporte de bivalvos juveniles de *Gemna gemna* en el estuario del río Navesink en New Jersey, EE.UU. En esta zona, dominada por las corrientes de marea, la velocidad a 50 cm del lecho puede alcanzar valores de hasta 1 m/s y las velocidades de fricción son del orden de 0.02 a 0.05 m/s. En el trabajo llevado a cabo por estos autores se señalan correlaciones elevadas entre la hidrodinámica (velocidad a 50 cm del lecho) y el transporte de sedimentos de fondo ($R^2 \sim 0.78$ a 0.81) y entre la hidrodinámica y el transporte de bivalvos retenidos en la trampa de sedimentos ($R^2 \sim 0.74$ a 0.84).

Como en el estudio de Bouma *et al.* (2001), no se encontró una correlación entre la tasa de transporte de individuos y la densidad de reclutamiento como sucede p.ej. en otro trabajo realizado por Heather Hunt en el entorno del puerto de Barnstable, Massachussets (Hunt y Mullineaux, 2002). En este trabajo, Hunt y Mullineaux estudiaron la dispersión de los juveniles de almeja *Mya arenaria* (< 2mm) y encontraron que el transporte de juveniles está relacionado con el flujo, el transporte de sedimentos y la densidad de reclutamiento de los organismos.

Comminto *et al.* (1995) realizaron un trabajo una zona intermareal arenosa, con fuertes corrientes de marea, cercana a Manukau Harbour (Auckland, Nueva Zelanda) en el que recogieron ejemplares en trampas de sedimentos en el lecho y a diferentes alturas la fauna bentónica. En su estudio correlacionaron el caudal sólido y la cantidad de juveniles de la especie dominante, *Macoma Liliana*, con el viento en condiciones extremales o de temporal.

Para uno de los sucesos analizados, los autores señalan que un incremento en la velocidad del viento de 12 veces el valor medio, provocaba grandes incrementos en el transporte de sedimentos (ratios de hasta 285) y en el número de individuos (95 veces) recogidos en las

trampas de sedimentos colocada en el lecho. Además, la mayoría de individuos eran bivalvos y gasterópodos, lo que sugiere que los individuos con concha pueden tener propiedades hidrodinámicas similares a las de los sedimentos.

En este entorno tan marcado por la hidrodinámica, *Commuto et al.* (1995) encontraron correlación positiva muy fuerte entre las condiciones de viento con la velocidad del agua, con el caudal sólido ($R^2=0.88$) y la dispersión de las postlarvas ($R^2=0.73$ a 0.95), especialmente cuando se analiza el transporte de fondo.

Respecto a los estudios de preferencia o elección de sustrato en campo, el número de referencias es más limitado que el de trabajos en laboratorio, aunque parece que el proceso de elección de sustrato es muy dependiente del tipo de especie y de las condiciones hidrodinámicas.

Snelgrove (1999) analizó la capacidad de selección de las larvas de un tipo de almeja del Atlántico oriental (*Spisula solidissima*) y de poliquetos capitélidos. En los experimentos, que consistían básicamente en contar los organismos que se fijan a un disco de 100 cm^2 con sedimento defaunado al cabo de 3 o 4 días, las larvas de almeja demostraron preferencia sobre arena y las de los poliquetos sobre fangos, mostrando una capacidad de selección consistente con los sustratos donde viven las poblaciones adultas y con los ensayos de laboratorio realizados anteriormente (Snelgrove *et al.*, 1998).

En estos ensayos Snelgrove también determinó que la variación espacial de la intensidad de sedimentación de las larvas de *S. solidissima* estaba relacionada con la cantidad de plancton disponible en la columna de agua. Esto indica que los patrones de sedimentación son también función de la circulación y del transporte pasivo (como el que sufre el plancton, Lucas *et al.*, 1999), pero que el fenómeno de selección de hábitat por parte de las larvas también juega un papel importante.

Huxham y Richards (2003) realizaron un trabajo sobre el reclutamiento de juveniles de *M. balthica* y *C. edule* en un área intermareal fangosa del estuario de Forth. Estos autores colocaron una serie de discos de Petri de $\sim 60\text{ cm}^2$ con diferentes composiciones de sedimento y tras un periodo de dos días no encontraron evidencias sobre la capacidad de selección de sustrato de estas especies. En las campañas de campo, los autores señalan que los juveniles tempranos (300-1000 micras) no se ubican preferente sobre arena o fango, aunque los adultos (a escala de $\sim 1000\text{ m}^2$) de berberecho y almeja si aparecen preferente sobre arena y fango respectivamente. Por tanto, en este trabajo no se encuentran evidencias de que el proceso de colocación se origine en fases larvarias, sino que se debe a factores fundamentalmente hidrodinámicos de fases posteriores (postjuveniles) o a la interacción con depredadores. Conclusiones similares para estas especies han sido descritas en Armonies y Hellwig-Armonies (1992), Armonies (1996) o Bouma *et al.* (2001).

Por lo tanto, en algunas especies, el proceso de selección del hábitat puede estar determinado por los procesos de asentamiento secundario (puede existir más de uno, como se ha visto con la *Macoma*) que se producen en las fases postlarvarias y juveniles. Cuando la dispersión secundaria sea importante, el proceso de asentamiento primario puede no tener importancia en la determinación de la estructura de la comunidad bentónica (Huxham y Richards, 2003).

Recapitulación

Cómo recapitulación se puede indicar que, en general, el impacto de los procesos biológicos comparados con los físicos es mayor en sistemas intermareales de baja dinámica.

En sistemas con gran dinámica litoral, los factores biológicos son de menor importancia (Bouma et al., 2001)

Así, algunos trabajos sugieren que en algunos casos la hidrodinámica domina el proceso de dispersión de juveniles. Bajo estas condiciones es necesario un buen conocimiento de la hidrodinámica y de los procesos de transporte de sedimentos. Para ello es fundamental disponer de un modelo numérico calibrado (Armonies y Hartke, 1995; Armonies, 1996; Bouma et al., 2001; Hunt et al., 2007). En algunas ocasiones, cuando existan interacciones significativas entre los adultos y los juveniles, será necesario también conocer la distribución de la poblaciones bentónicas (Armonies y Hartke, 1995)

En cualquier caso, parece que existe una interacción entre los procesos físicos o pasivos y los procesos de sedimentación y dispersión activa. Ambos fenómenos deben estar involucrados en la variabilidad espacial y temporal de las comunidades de invertebrados bentónicos.

Los procesos de selección activa y asentamiento pasivo no son excluyentes. Ambos procesos pueden operar, pero a diferentes escalas de espacio y tiempo. La importancia relativa de cada proceso es dependiente de cada especie, del entorno y su energía hidrodinámica, y de la duración de la etapa planctónica de cada individuo (Butman, 1987).

Así, los organismos situados más cerca o sobre la superficie pueden entrar en la columna de agua periódicamente durante temporales o avenidas (Commito et al., 1995), o también regularmente durante los ciclos parciales de mareas vivas o muertas (Armonies, 1992)

Las distribuciones locales de las larvas pueden estar determinadas por fenómenos físicos de pequeña escala como cambios inducidos por la micro topografía del lecho. Además, algunas larvas podrían seleccionar activamente el sustrato en grandes escalas espaciales, adhiriéndose o rechazando una zona (p.ej. a través de la segregación de bisco o nadando para, intentar escapar de la capa límite viscosa). Sin embargo, se ha detectado que a medida que una larva pasa más tiempo en seleccionar su sustrato, la probabilidad de que ésta prospere se reduce, por lo que a partir de cierto tiempo la selección dejaría de ser activa (Butman, 1987).

Los procesos de selección pasiva podrían explicar la variabilidad interanual de las zonas de reclutamiento de las larvas y posibles "incoherencias" con las características de lecho sedimentario, ya que los sedimentos se ordenan en escalas temporales más grandes que las de las larvas.

Las evidencias de la literatura señalan que las larvas pueden ser depositadas en las escalas espaciales más grandes (decenas de metros y kilómetros), mientras que pueden emplear procedimientos de selección activa en hábitats más reducidos (escalas de centímetros y metros). Así, los procesos hidrodinámicos de mayor escala son los causantes de distribuir las larvas a lo largo del fondo marino y de que estas encuentren un sustrato determinado, pero es cada tipo particular de organismo el que decide si lo elige o rechaza.

Lo que todavía está por determinar es la escala a la cual la importancia de estos procesos cambia y la importancia de los flujos ambientales en el proceso de transición entre ambos estados (Snelgrove et al., 1999).

4.2.4. La hidrodinámica y las poblaciones bentónicas

En los apartados anteriores se ha descrito el importante papel que juega la hidrodinámica en los procesos de dispersión y migración vertical de larvas y juveniles, así como en los fenómenos de recolocación de algunas especies adultas. Esta fuerte interacción entre los

ecosistemas acuáticos y la hidrodinámica (ver introducción en el Cap. 1), es especialmente intensa cerca del lecho, al menos para las comunidades bentónicas. Por este motivo, los investigadores de ámbito biológico y ecológico, han comenzado paulatinamente a incorporar aspectos de la dinámica de fluidos en varios estudios de ecosistemas para mejorar el conocimiento de las teorías ecológicas (Statzner *et al.*, 1988).

La importancia del papel de la hidrodinámica de la capa límite en los procesos de configuración de la estructura de los ecosistemas bentónicos marinos comenzó a calar en la comunidad científica después de la revisión realizada por Anne Butman (1987), aunque son fundamentalmente los primeros trabajos de Novell y Jumars (1984; 1987) los que revisan los principales conceptos sobre la estructura del flujo y de la capa límite, y los acercan a los biólogos y ecólogos marinos.

En primer lugar, se puede hablar de la importancia de la hidrodinámica de la capa límite en la **etapa del asentamiento larvario**. La estructura de la capa límite viene marcada por el tipo de flujo (liso, rugoso o intermedio) y es importante porque hasta que la larva la alcanza, desciende con una velocidad horizontal neta prácticamente constante. A partir de la capa límite, la larva entra en una zona donde se amplifican los esfuerzos cortantes y se reducen las velocidades, hasta llegar muy cerca de la superficie, la subcapa viscosa, donde la larva prácticamente puede maniobrar a velocidad nula o prácticamente nula.

Cuando la larva se encuentra fuera de esta región de flujo, prácticamente no puede hacer nada por decidir su ubicación, ya que el orden de magnitud de las velocidades del flujo es una o dos veces superior al de la velocidad de las larvas (~ mm/s). En flujos rugosos, aunque las velocidades cerca del lecho son más reducidas por efecto de la fricción, es difícil saber como va a funcionar la capacidad de natación los organismos, ya que en la capa límite turbulenta rugosa existen grandes fluctuaciones de velocidad que pueden hacer salir a la larva de una zona de velocidades medias favorables. Cuando la larva nada en capas límites laminares y viscosas no es previsible que existan fluctuaciones importantes en las velocidades (Butman, 1987).

Dentro de la región viscosa, las larvas podrían emplear su capacidad de natación para salir de esta zona (migración vertical) y ser arrastrada por la corriente hacia otras ubicaciones. Otros mecanismos de escape presentes en los moluscos son los de generación de bisco. También es posible que las larvas no sean capaces de seleccionar de este modo mixto (activo + pasivo) su hábitat, sino que sencillamente puedan arrastrarse para poder escoger entre varios microhábitats, de modo que la escala de longitudes de la selección activa es muy pequeña (Butman, 1987).

En cualquier caso, y como ya se ha señalado en el Cap. 2, la forma de la capa límite canónica dista mucho de la realidad del flujo (Nikora, 2009): (i) las capas límites en cauces fluviales y en estuarios están a menudo limitadas por el calado, es decir, no se desarrollan por completo; (ii) habitualmente se encuentran varias capas límite generadas por la fricción con el lecho y con el aire; y (iii) pueden aparecer capas límites superpuestas originadas por zonas con diferente rugosidad cómo áreas con organismos bentónicos o formas de fondo. En entornos marinos, se pueden desarrollar capas límites asociadas a diferentes tipos de fuerzas generadoras: oleaje de fondo, mareas o, a mayores escalas, provocadas por la rotación planetaria (Butman, 1987).

El efecto que produce la rugosidad del lecho sobre la estructura de la capa límite y la desviación con respecto a una capa límite canónica será inferior si el flujo es menos turbulento, esto es, si su número de Reynolds es menor (van Duren, 2008). Sin embargo, y como se ha

comentado ya en el capítulo 2, la estructura de las rugosidades también juega un papel fundamental y, aún para Reynolds reducidos, los esfuerzos dispersivos dependerán de parámetros como la rugosidad característica del lecho Δ , el grado de sumergencia del flujo Δ/H , la forma y separación relativa de las rugosidades λ/Δ (ver Figura 4.24).

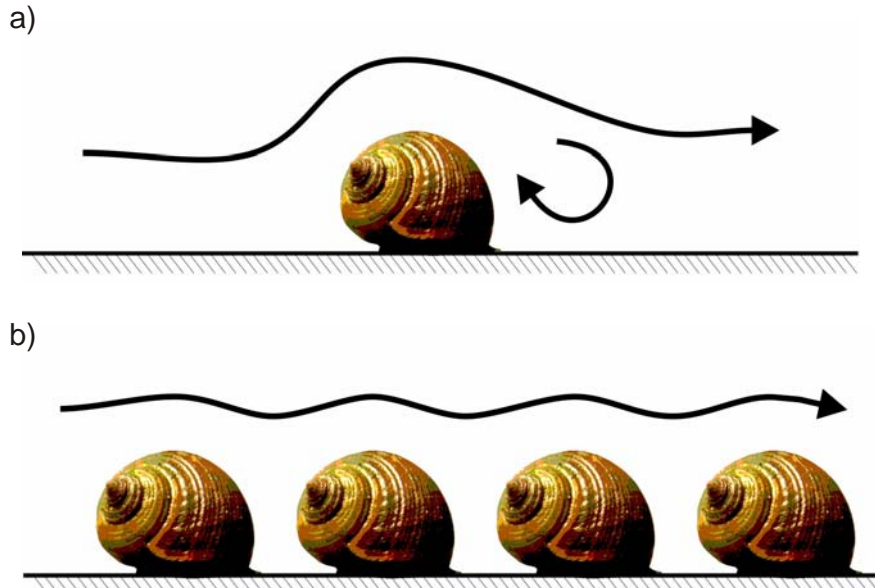


Figura 4.24. Efecto de la separación de los individuos en la estructura del flujo: a) flujos sobre un "obstáculo" aislado con una estela aguas abajo y b) flujo rasante sobre una sucesión de individuos (adaptado de Van Duren, 2008). En estas condiciones se produce un desacople entre el flujo rasante y el que actúa sobre los organismos y se reducen los esfuerzos de corte sobre los mismos.

Otro factor que puede afectar a la estructura de la capa límite y de esfuerzos cortantes es la actividad de los organismos filtradores, ya que los pequeños chorros producidos por los sifones pueden actuar incrementando la rugosidad del lecho. Este efecto ha sido determinado por van Duren *et al.*, (2006) estudiando en laboratorio las características del flujo sobre un lecho de mejillones *Mytilus edulis* con ayuda de un equipo doppler ADV.

Estos autores determinaron la estructura de las velocidades, esfuerzos de Reynolds y energía cinética turbulenta bajo tres velocidades y con tres configuraciones de lecho: liso, con los moluscos inactivos y con los moluscos con las valvas abiertas y en actividad filtradora (este escenario se estimuló con aportación de alimento).

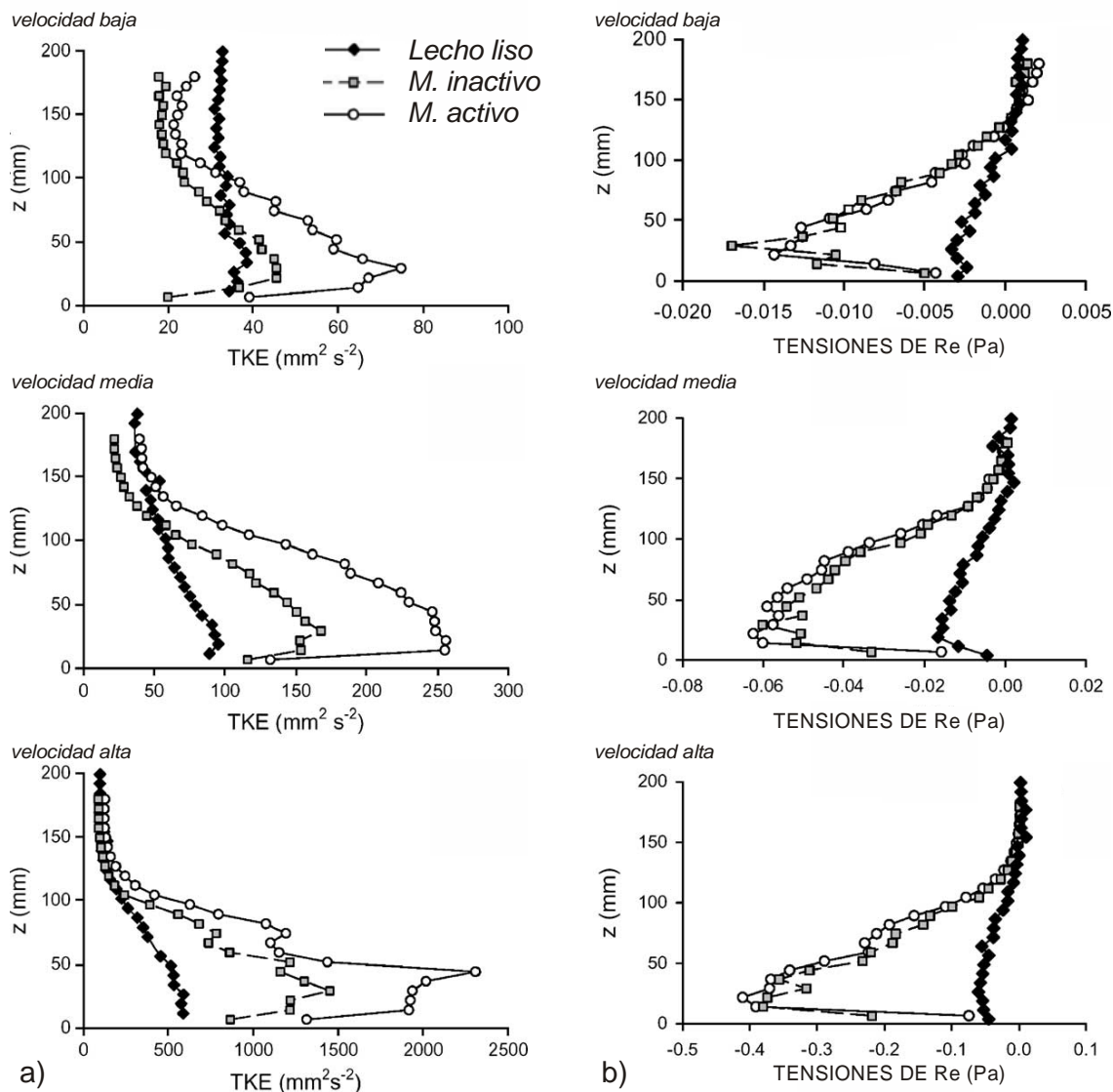


Figura 4.25. Efecto de la actividad filtradora del *M.edulis* sobre la estructura de la energía cinética turbulenta (a) y sobre las tensiones de Reynolds (b), ((van Duren et al., 2006).

Los resultados del trabajo indican que bajo el lecho inactivo las velocidades de corte (determinadas a partir de la ley logarítmica de velocidades), y en consecuencia los esfuerzos de cortes, son menores que cuando los mejillones están alimentándose (Tabla 4.5). Además, los chorros producidos durante la actividad filtradora también afectan a la estructura de la energía cinética turbulenta mientras que sobre las tensiones de Reynolds la influencia es más reducida, como se puede apreciar en la Figura 4.25. Los autores también apreciaron que a medida que el flujo es más turbulento, el efecto de la actividad del *M.edulis* se reduce.

Tabla 4.5. Resumen de los principales parámetros de los ensayos para determinar la influencia de la actividad filtradora en la estructura de la capa límite desarrollada sobre un lecho de *Mytilus edulis* (van Duren et al., 2006).

Velocidad	Configuración del lecho	\overline{u}_* (cm/s)	z_0 (mm)	τ_0 (Pa)
BAJA ~5.5 cm/s	Fondo liso	0.22	0.02	0.005
	Mejillón activo	0.68	3.55	0.04
	Mejillón inactivo	0.51	1.79	0.03
MEDIA ~10 cm/s	Fondo liso	0.59	0.12	0.04
	Mejillón activo	1.59	5.19	0.24
	Mejillón inactivo	1.35	4.09	0.20
ALTA ~35 cm/s	Fondo liso	1.53	0.06	0.24
	Mejillón activo	4.07	4.45	
	Mejillón inactivo	3.92	3.82	

Los procesos de mezcla turbulentos también afectan a la sedimentación larvaria. Por ejemplo, si se analiza el flujo de partículas o larvas sedimentadas, se puede definir la probabilidad de que una partícula sedimente como (Crimaldi et al., 2002):

$$\Phi = \int_0^H \frac{c(z)}{t_{hit}(z)} dz \quad (4.1)$$

donde Φ es el flujo de partículas que sedimentan ($\text{ind}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) en una vertical dada, $c(z)$ es la concentración volumétrica (ind/m^3) y $t_{hit}(z)$ representa el tiempo que tarda una partícula en sedimentar desde una altura z . Este tiempo de sedimentación obviamente está relacionado inversamente con la velocidad de sedimentación o caída w_s .

En flujos turbulentos, los fenómenos de mezcla turbulentos actúan incrementando los tiempos de golpeo o sedimentación t_{hit} de las partículas más densas y pesadas (con mayor w_s). El efecto en las partículas que tienen una densidad cercana a la del medio es el contrario, es decir, la turbulencia empeora la decantabilidad de las partículas manteniéndolas más tiempo en suspensión (van Duren, 2008).

Las variables que determinan la transición entre la suspensión o la sedimentación son la velocidad de sedimentación de la larva, la velocidad de la corriente, y la mezcla turbulenta en la columna de agua. Para determinar la importancia relativa entre los procesos de advección vertical (sedimentación) y de mezcla turbulenta se emplea el número de Peclet, definido para este tipo de flujos como (Lucas et al., 1999):

$$Pe = \frac{w_s H}{K_z} \quad (4.2)$$

donde K_z es el coeficiente de mezcla vertical turbulenta (m^2/s).

El número de Peclet representa la relación entre las escalas de tiempo de mezcla $\tau \approx H^2 / K_z$ y el tiempo de sedimentación $\approx H / w_s$. Para valores por encima de la unidad, la sedimentación controla el flujo de larvas presentes en la columna de agua, mientras que valores por debajo de la unidad, implican que la mezcla turbulenta domina el proceso, y la distribución de partículas en prácticamente constante en la vertical.

Bouma *et al.* (2001) realizaron una estimación del orden de magnitud del número de Peclet en la zona intermareal del *Plaat van Baarland* (§4.2.3.3, Figura 4.22). Tomando una velocidad de caída para las larvas de *Macoma* y *Cerastoderma* de 1.7 mm/s (Jonson *et al.*, 1998), un calado medio de 2 metros y un coeficiente de mezcla turbulenta de $\sim 10^{-3}$ m²/s, orden de magnitud para zonas estuáricas someras (ver p.ej. McCardell y O'Donnell, 2009), se obtiene un número de Peclet en el orden de 1, por lo que ninguno de los procesos domina la dinámica de la larva la columna de agua.

La importancia de la turbulencia generada en los estudios en modelo físico en los procesos de sedimentación larvaria ha sido analizada por Hendriks (Hendriks, 2004; Hendriks *et al.*, 2006). En estos trabajos, se analiza la probabilidad de sedimentación larvaria empleando el número de Rouse:

$$Ro = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad (4.3)$$

El número de Rouse relaciona los esfuerzos gravitatorios de sedimentación con los esfuerzos de corte horizontales, y se emplea habitualmente en los estudios de transporte de sedimentos para delimitar la barrera entre transporte en suspensión ($w/\kappa u_* < 0.75$) y de fondo ($w/\kappa u_* > 0.75$). Realmente el número de Rouse y el número de Peclet proporcionan información similar sobre el fenómeno de sedimentación de las partículas, y están relacionados ya que el valor de la difusividad turbulenta o de remolino vertical se puede aproximar como $K_z \sim u_* \kappa H / 4 \sim 0.1 \cdot u_* \cdot H$ ⁷⁵ (ver p.ej. Jirka, 2008; van Rijn, 2008). Empleando esta aproximación en la ecuación (4.2) se llega a que $Pe \propto Ro$.

Como se ha señalado, la hidrodinámica también juega un papel fundamental en los **procesos de asentamiento secundario y recolocación de juveniles y adultos**. En estas situaciones, los esfuerzos ejercidos por el fluido sobre los organismos se traducen en una serie de fuerzas de arrastre y sustentación que tienden a transportar a los organismos bentónicos (ver Figura 4.26, Peña *et al.*, 2008). Las fuerzas que se oponen al movimiento son el peso propio sumergido y los esfuerzos de fricción con el lecho (Olivera y Wood, 1997; Amos *et al.*, 2000; Thompson y Amos, 2002; Olivier y Retière, 2006).

Si los organismos están situados sobre el lecho, la fricción se puede determinar a partir del ángulo de rozamiento interno entre el molusco y la arena (Thompson y Amos, 2002; Anta *et al.*, 2008; Peña *et al.*, 2008), aunque puede que los organismos se encuentren formando parches, apareciendo así fuerzas de interacción entre los mismos que serán más difíciles de evaluar de forma determinista. En algunos casos, los organismos podrán anclarse al sustrato a través de algún mecanismo biológico, incrementando así el valor de las fuerzas de fricción.

⁷⁵ Este valor se corresponde con el máximo ($z=H/2$) de la distribución parabólica de la difusividad turbulenta del agua en un flujo 2D uniforme. Las hipótesis habituales son: ley logarítmica de velocidad, hipótesis de Boussinesq y distribución de tensiones lineal con el calado (ver con detalle p.ej. en van Rijn, 2008).

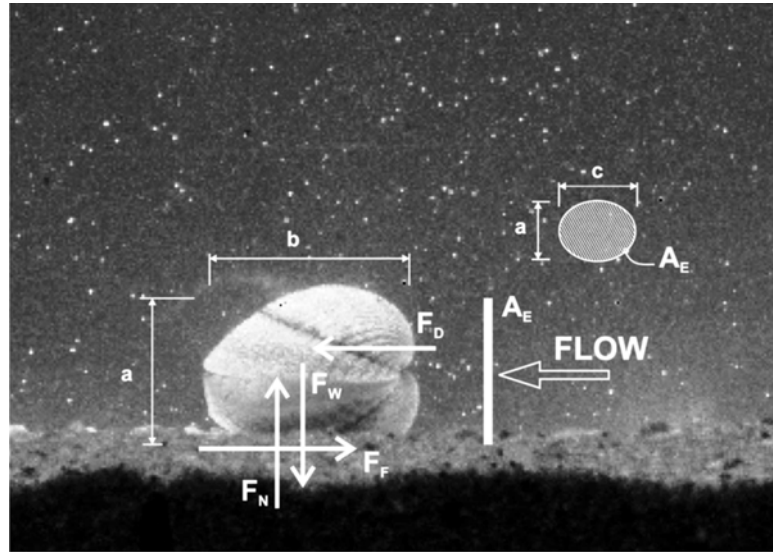


Figura 4.26. Esquema de fuerzas actuantes sobre un berberecho aislado en el umbral de movimiento: F_D : fuerza de arrastre, F_W : peso sumergido y F_F : rozamiento (Peña *et al.*, 2008). En este esquema no aparecen las fuerzas de sustentación F_L porque se consideraron despreciables (ver apartado 4.2.5.).

Cuando se analiza la movilización de partículas u organismos bentónicos a partir de esta aproximación la determinación de las fuerzas de arrastre y sustentación a través de una parametrización cuadrática del tipo:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D u |u| \quad (4.4)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A_L u |u| \quad (4.5)$$

donde C_D y C_L son los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente, y A_D y A_L son las áreas expuestas al flujo en las direcciones de estas fuerzas. El valor de las fuerzas de arrastre y sustentación depende del valor de los coeficientes de arrastre y sustentación, así como de la velocidad empleada para estimar dichas fuerzas.

Los estudios previos desarrollados desde el GEAMA fueron en la línea de determinar el coeficiente de arrastre de berberechos de talla comercial ($d \sim 28$ mm) de los Lombos do Ulla. En estos trabajos también se recogen los coeficientes de arrastre para otros moluscos encontrados en la literatura (ver Tabla 4.7, Anta *et al.*, 2006; Peña *et al.*, 2008).

Respecto a la velocidad empleada para determinar F_D y F_L , no existe un consenso claro en la literatura sobre qué valor utilizar (Coleman *et al.*, 2007a), aunque en las referencias de transporte de sedimentos se manejan parámetros como la velocidad media, la velocidad medida a $0.15H$, la velocidad sobre la partícula o incluso la velocidad de corte (Hoan, 2008).

Como la velocidad presenta fluctuaciones es previsible que los esfuerzos de arrastre y sustentación también fluctúen. Además, cerca del lecho las fluctuaciones son, en términos relativos, altas, por lo que $|u|$ podría ser del mismo orden que $|u'|$, de modo que los términos de fluctuación de las fuerzas de arrastre y sustentación podrían ser importantes en el fenómeno de resuspensión.

En la literatura sobre el estudio de estabilidad de lechos de grava o de escollera es habitual emplear este tipo de parametrizaciones cuadráticas para estimar las fuerzas de arrastre y existen formulaciones que contemplan las fluctuaciones de la velocidad en la determinación de los coeficientes de arrastre y de los parámetros de estabilidad de los sedimentos (ver p.ej. las Tesis Doctorales de Hofland, 2005; Detert, 2008; Hoan, 2008).

En Peña *et al.*, (2008) también se presenta un análisis sobre la influencia de la elección de la velocidad característica en la determinación del coeficiente de arrastre de adultos de *C.edule* y en Coleman *et al.*, (2007a) se presenta una metodología para incorporar el procedimiento del doble promediado en la estimación de las fuerzas de arrastre en un lecho de dunas.

El comportamiento fluctuante de las fuerzas de arrastre y sustentación está relacionado con las estructuras coherentes del flujo, y en particular, con los movimientos de eyección e inyección de paquetes de agua hacia el lecho. Estos movimientos, denominados *bursts* o *ejections* y *sweeps*, se corresponden con los cuadrantes Q2 y Q4 del espacio $u' - w'$, respectivamente.

Estas estructuras coherentes pueden afectar además a la distribución de las partículas en el lecho, ya que las partículas con mayor inercia tenderán a acumularse en aquellas regiones del flujo con menores velocidades y tensiones de corte. Así, en las zonas de eventos Q2 se produce la inyección de paquetes de flujo con gran cantidad de movimiento o *momentum* desde la región intermedia del flujo hacia la región de la pared mientras que en los eventos Q4 se producen eyecciones de paquetes de flujo con baja cantidad de movimientos desde la región del lecho hacia la región intermedia.

Soldati (2004), analizó la estructura de de una capa límite a través de una simulación numérica completa de las ecuaciones de N-S (DNS) y la interacción de las estructuras coherentes y los eventos Q2 y Q4 con los patrones de sedimentación de partículas.

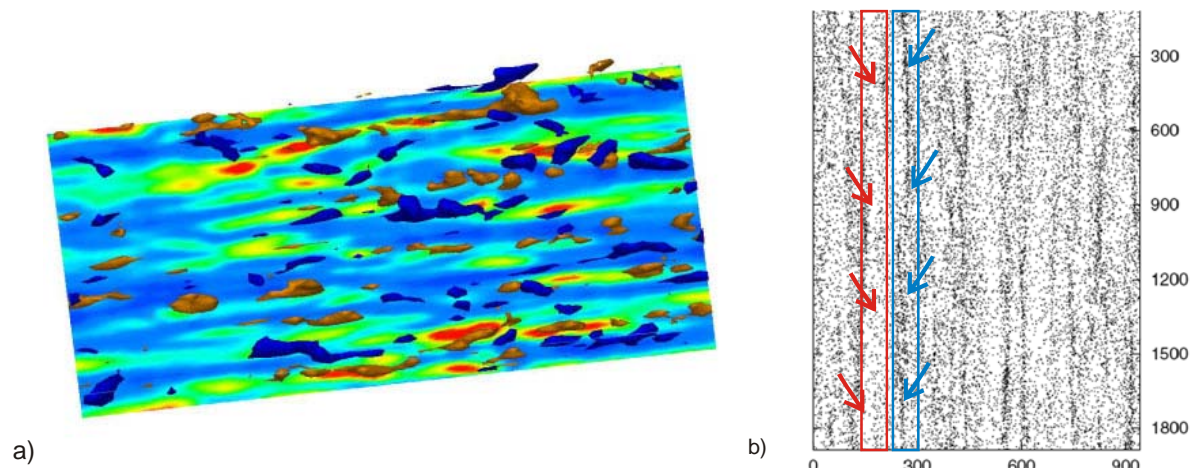


Figura 4.27. Resultados de la simulación DNS de un flujo en capa límite y su interacción con el transporte de partículas cerca de lecho. (a) Distribución instantánea de las tensiones de Reynolds, las zonas de mayor tensión se representan en rojo y están correlacionadas con los eventos Q2-sweeps-, representados en color dorado, y las zonas de menor tensión se representan en azul y están correlacionadas con los eventos Q4-ejections-; b) Representación de la distribución de partículas en el lecho y su correlación con las zonas de menor tensión tangencial (Soldati, 2004).

Soldati señala que por efecto de las fuerzas de inercia, la distribución de partículas no es homogénea en el lecho por la formación de estructuras coherentes y la existencia de regiones con inyecciones y eyecciones, ver Figura 4.27 (a). En las zonas donde las vorticidades y velocidades son menores se tienden a concentrar las partículas formándose patrones rayados o *streaks*, como se puede ver en la Figura 4.27 (b).

4.2.5. Estudios en modelo físico

Los estudios en modelo físico en canal de laboratorio se han convertido en los últimos años, especialmente, en una herramienta de investigación en el campo de la ecología acuática ya que permiten relacionar y analizar en ambientes controlados las interacciones entre los procesos biológicos e hidrodinámicos.

En el ámbito de la ecología marina bentónica, los estudios en canales hidráulicos han ido incrementando en número, calidad e importancia. Como se ha visto a lo largo de este apartado, existen diversas aplicaciones en las que se han utilizado canales para estudiar el comportamiento de alguna comunidad bentónica o al menos, de alguna de sus etapas de su ciclo vital.

Los principales trabajos revisados tenían como objetivo analizar las hipótesis de la selección activa a través del estudio de factores ambientales y biológicos que induzcan la metamorfosis de las larvas (ver p.ej. Hadfiel *et al.*, 2006), o a través de trabajos de selección de hábitat. El número de trabajos presentados en esta última línea es más elevado y variado, y en ellos se analizan aspectos como la capacidad de selección de sustrato de las especies en estado larvario (p.ej. Snelgrove *et al.*, 1998), la capacidad de generación de biso de larvas y juveniles en columna de sedimentación (de Montaudouin, 1997; Olivier y Retière, 2006) o en canales de recirculación (de Montaudouin y Bachelet, 1996; de Montaudouin, 1997; de Montaudouin *et al.*, 2003; Olivier y Retière, 2006).

Los flujos en modelo físico también han sido empleados por los investigadores para analizar otros aspectos relacionando por ejemplo, la reducción de la capacidad de alimentación de algunos organismos filtradores con el incremento de las velocidades del flujo (Frechette *et al.*, 1989; Butman *et al.*, 1994). Este provoca que algunas especies de percebe no se fijen en zonas con velocidades locales sobre sus cilios superiores a los 5-10 cm/s, ver (Larsson y Jonsson, 2006).



Figura 4.28. Las deformaciones excesivas de los cilios de los juveniles del percebe *Balanus improvisus* provocan una reducción de su capacidad de alimentación y un fenómeno de selección activa hacia entornos con velocidades locales sobre el organismo (U_x) inferiores a los 5-10 cm/s (Larsson y Jonsson, 2006).

Otros trabajos en modelo físico se han empleado para determinar la capacidad natatoria de las larvas (Jonsson *et al.*, 1991), o para analizar las interacciones de depredación intraespecíficas (Andre *et al.*, 1993; Lindegarth *et al.*, 2002) o interespecíficas (Hiddink *et al.*, 2002).

Las características comunes más notables de los estudios realizados en modelo físico hasta la fecha son: (i) que en los últimos años los trabajos han ido incrementando en complejidad y también se han mejorado las técnicas experimentales para determinar los parámetros hidrodinámicos, popularizándose tecnologías como las LDV, ADV, PIV o LIF; y (ii) que aunque no existen muchos canales específicos para el estudio de organismos bentónicos a nivel mundial, las instalaciones recogidas en la literatura son variadas y de tipologías diversas.

En los trabajos sobre el bentos marino, se suelen emplear canales de recirculación de flujo con desarrollos rectos, anulares o en forma de circuito de carreras (Jonsson *et al.*, 2006). Un esquema con estas tipologías se presenta en la Figura 4.29.

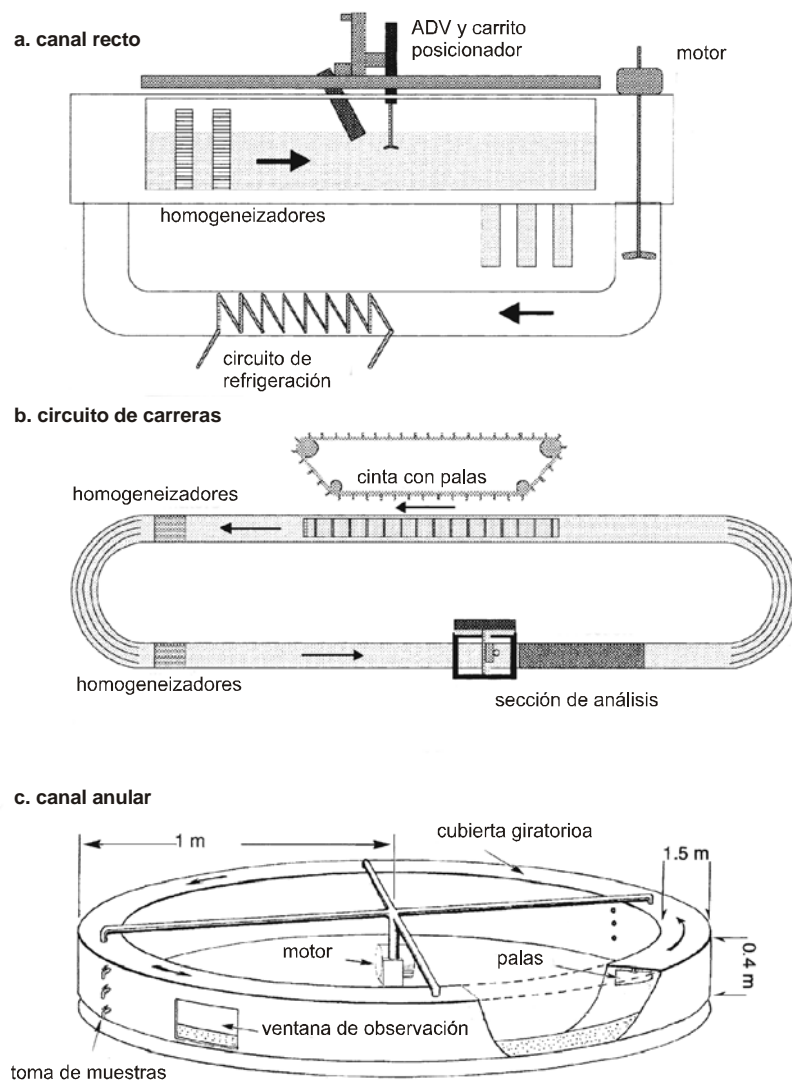


Figura 4.29. Esquema de los principales tipos de canal para el estudio del bentos marino (Jonsson *et al.*, 2006)

En la literatura se pueden encontrar recomendaciones y reglas de buena práctica para la construcción de este tipo de canales. Es especialmente interesante el trabajo realizado por Nowell y Jumars (1984; 1987) así como otros ejemplos reales desarrollados en Muschenheim

et al. (1986). En estas referencias se pueden encontrar recomendaciones sobre la longitud de las instalaciones para el correcto desarrollo de la capa límite, se dan relaciones entre el ancho:calado B/H de 5:1, o mejor 10:1, para evitar la aparición de corrientes secundarias (§2.4.2.) y sobre la correcta disposición de deflectores y dispositivos para homogeneizar el flujo y desarrollar una capa límite adecuada.

Si se analizan las características de los canales recogidos en la literatura, se puede observar como en muchos casos se ha tenido que llegar a una solución de compromiso entre la optimización hidráulica y las limitaciones económicas asociadas a la construcción de una infraestructura de este tipo.

Este hecho se puede constatar en Jonsson *et al.*, (2006) que presentan las características de los 17 canales que pertenecen a un grupo de 17 instituciones europeas dedicadas al estudio de las relaciones entre la hidrodinámica y la ecología de las comunidades bentónicas marinas. Este grupo de instituciones forman la red europea BioFlow: *Flume Facility Co-operation Network for Biological Boundary Layer Research*. El objetivo de esta red es compartir el conocimiento y las instalaciones del grupo de Instituciones presentes.

Con objeto de comparar el flujo desarrollado en los canales de esta red de trabajo, los miembros de la misma realizaron una serie de ensayos con condiciones de flujo similares. Los detalles de este estudio se pueden consultar en Jonsson *et al.* (2006), pero se ha considerado conveniente recoger algunas detalles en este texto, con objeto de poder comparar el canal de recirculación en forma de circuito de carreras construido para realizar los experimentos de esta Tesis Doctoral (ver detalles en apartado 4.3.2).

Tabla 4.6. Descripción de los canales de la red BioFlow. El resto de características se pueden encontrar en Jonsson *et al.* (2006).

Instituto o Centro de I+D		Tipo de canal [*]	Material del lecho	Longitud (m)	Ancho (m)	B/H (-)
GML	Gatty Marine Lab., Univ. of St. Andrews (UK)	Recto	Acero	7.0	1.3	1.3
TMBL	Tjärnö Mar. Biological Lab. (Suecia)	Recto	Plexiglás	5.5	4.0	4.0
MPI-MM	MAx Planck Inst. for Mar. Microbiol., (GER)	Recto	Arena 200 μm	5.4	2.5	2.5
CREMA	C. de Rech. en Ecol. Mar. et Aquacult. (FR)	Recto	PVC	3.0	2.7	2.7
ROSTOCK	Mar. Biology Station, Univ. of Rostock (GER)	Recto	Arena 200 μm	3.0	2.0	2.0
KUCORPI	Klapeida Coastal Res. And Plann. Inst. (LIT)	Recto	Cristal	2.3	3.4	3.4
LOB	Centre d'Océanologie de Marseille Inst.de Rech. sur les Phen. Hors. Equilibre	Recto	PCV	1.7	4.0	4.0
NIOO	Netherlands Institute of Ecology, (HOL)	Circuito de carreras	Fibra de vidrio	9.0	1.5	1.5
MNHN	Estación Marina de Dinard, Muséum national de l' Histoire Naturelle, (FR)	Circuito de carreras	Plexiglás	6.0	3.3	3.3
SOC	Southampton Oceanography Centre, Univ. of Southampton (UK)	Anular	PVC	6.0 ^{**}	0.3	0.3
PML	Plymouth Mar. Lab., (UK)	Anular	Plexiglás	0.5 ^{**}	0.3	0.3

^{*}.No se presentan los canales construidos en campo

^{**}.Hace referencia al diámetro

En la Tabla 4.6 se presentan las características de los canales de laboratorio disponibles en la red *BioFlow*. Como se puede apreciar, existen 12 canales rectos, 2 en forma de circuito de carreras y 2 de tipo anular. Los ensayos presentados en Jonsson *et al.*, (2006) se corresponden con una serie de medidas realizada para dos velocidades de flujo libre de 5 cm/s y 25 cm/s. Cuando se disponían de equipos ADV o LDA, se realizaban al menos 8 medidas en la zona cercana al lecho para poder determinar la velocidad de fricción a partir de la ley logarítmica de velocidades. Además, en el artículo también se presentan los valores de las tensiones de Reynolds y de la energía cinética turbulenta para un calado de 5 cm y de $0.20 z/H$.

Respecto a los perfiles de velocidad, se pueden indicar que la mayoría presentaban una región logarítmica, por lo que se pudo determinar la velocidad de corte a partir de la interpolación de la ley de velocidades. Los perfiles de velocidad determinados en los canales se presentan en las figuras Figura 4.30 y Figura 4.31. En estas figuras se puede apreciar la presencia de corrientes secundarias observando el fenómeno de descenso de velocidad con calados creciente o *velocity dip*. En los canales circulares era previsible la aparición de este tipo de corrientes por el efecto del flujo en curva, y de la inspección visual de los perfiles se puede intuir que los canales rectos GML y CREMA, así como ambos canales de recirculación presentan este fenómeno. Sin embargo, al no disponer de los datos de toda la columna de agua y de las condiciones de ensayo (p.ej. tipo de régimen permanente o acelerado) es difícil extraer unas conclusiones más detalladas.

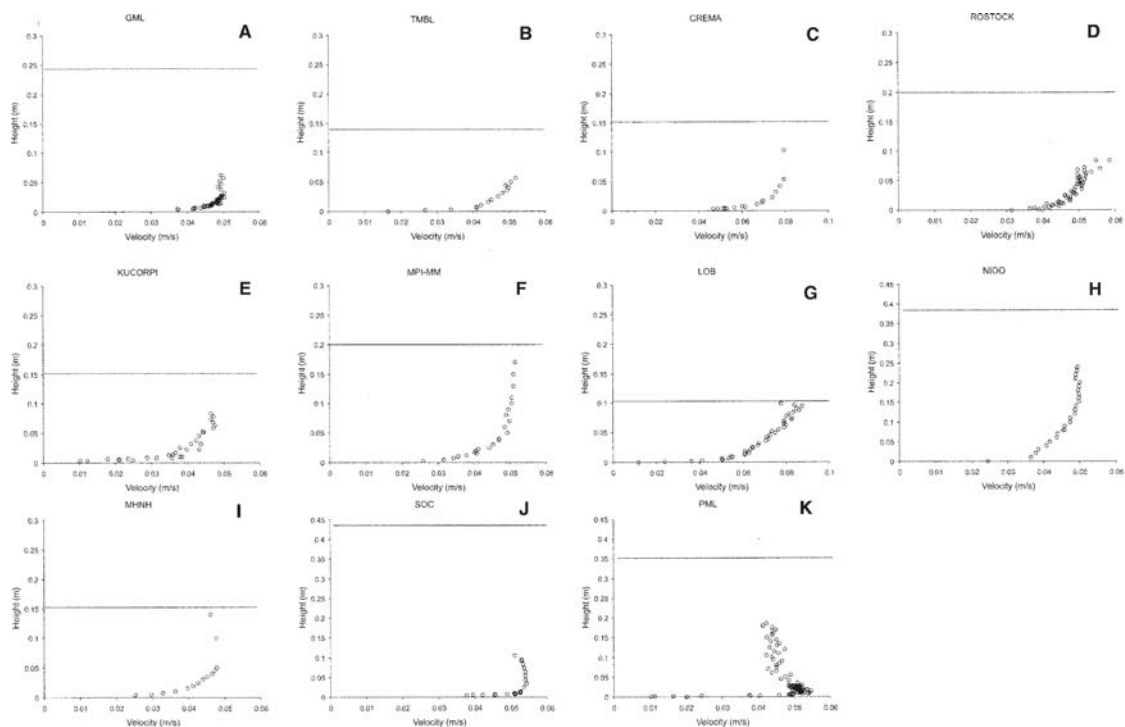


Figura 4.30. Perfil vertical de velocidades para los canales de la red *BioFlow* para una velocidad de la corriente de 5 cm/s. La tipología de los canales es recto: A-G, en circuito de carreras: H-I y anular: J-K, (Jonsson *et al.*, 2006). El nombre de la institución y sus características se recogen en la Tabla 4.6.

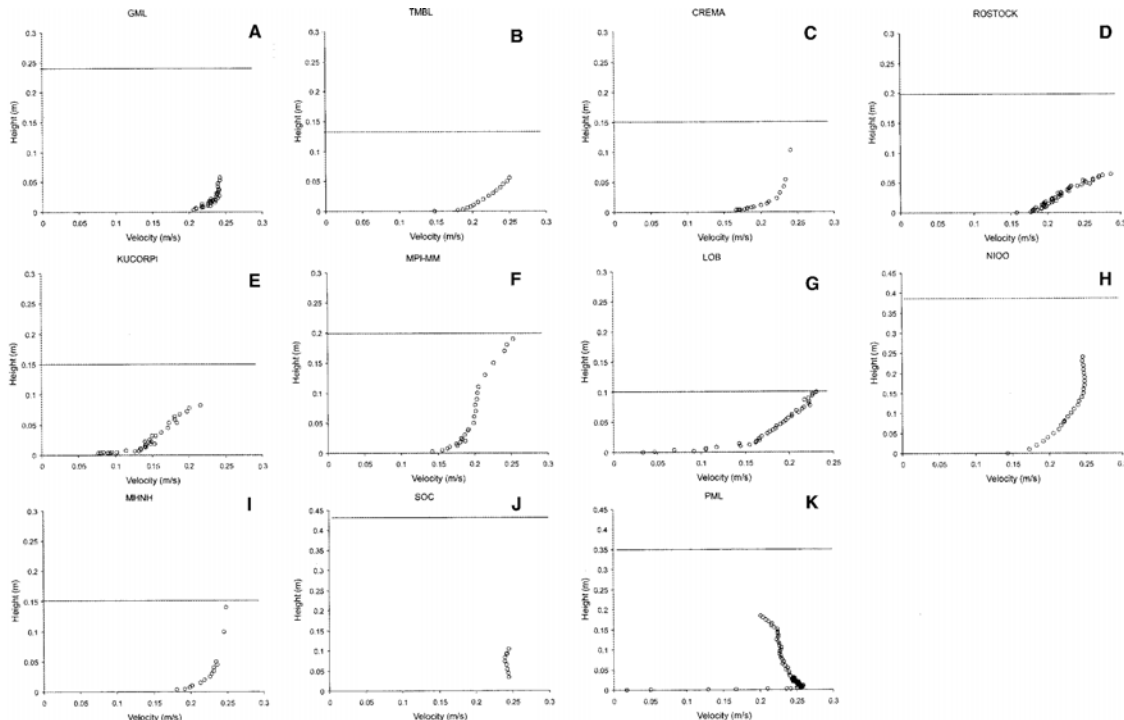


Figura 4.31. Perfil vertical de velocidades para los canales de la red BioFlow para una velocidad de la corriente de 25 cm/s. La tipología de los canales es recto: A-G, en circuito de carreras: H-I y anular; J-K, (Jonsson et al., 2006). El nombre de la institución y sus características se recogen en la Tabla 4.6.

Jonsson et al. (2006) estiman la presencia de flujos secundarios a partir de la covarianza entre las componentes v y w . Para la velocidad de ensayo de 5 cm/s las corrientes secundarias son pocas o nada importantes en todos los canales. Sin embargo, la velocidad de 25 cm/s, los canales anulares (SOC y PML), así como los canales rectos KUCORPI, ROSTOCK y GML, presentan corrientes secundarias. La existencia de estas corrientes en los canales circulares se explica por el flujo en curva, mientras que en los canales rectos se pueden atribuir a las relaciones de aspecto B/H .

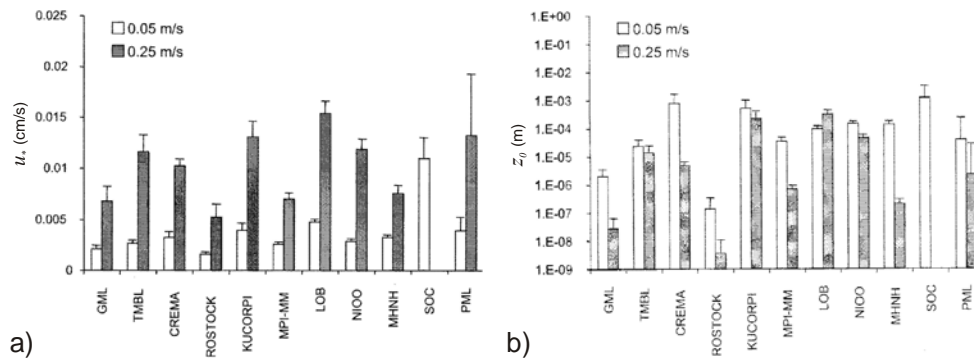


Figura 4.32. Velocidades de corte (a) y rugosidades características (b) obtenidas a partir del ajuste de las leyes de velocidades determinadas en los canales de la red BioFlow. Valores medios \pm 95% IC (Jonsson et al., 2006).

Las velocidades de fricción estimadas a partir del perfil logarítmico de velocidades están en los rangos 0.0016-0.048 m/s y 0.053-0.015 cm/s para las velocidades de 5 y 25 cm/s

respectivamente. En promedio, estas velocidades representaban un ~5% de la velocidad libre de la corriente. La rugosidad característica de la ley logarítmica de velocidades (z_0) varía hasta en cuatro órdenes de magnitud, aunque en todos los casos se puede hablar de régimen turbulento liso ($z_0 \sim < 1\text{mm}$).

Como se ha comentado en la introducción, el principal objetivo de esta Tesis Doctoral es proporcionar información sobre las velocidades y esfuerzos de corte que pueden provocar la recolocación de los stocks de berberechos en la desembocadura del río Ulla. Por este motivo, para terminar con la revisión del estado del conocimiento, se presentarán a continuación los principales trabajos de la literatura encontrados relativos al estudio del arrastre de moluscos bivalvos juveniles o adultos.

La realidad es que en el ámbito de la recolocación de moluscos adultos no existen demasiados estudios ya que la mayoría se focalizan en el análisis de la capacidad activa de selección de hábitat larvas o juveniles (p.ej. los trabajos de de Montadouin) o, fundamentalmente, en el análisis de la sedimentación de los organismos en la fase planctónica (p.ej. Beukema y de Vlas, 1989; Crimaldi et al., 2002; de Montadouin, 1997). En estos estudios no se proporcionan valores de velocidades o tensiones de corte que provocan el movimiento de los organismos, porque, fundamentalmente, no fueron diseñados con este objetivo.

El estudio del arrastre, y en definitiva, del problema de la recolocación de los stocks, se puede acometer desde una perspectiva de trabajo similar al estudio del transporte de partículas parcial o totalmente expuestas a una corriente (Peña et al., 2008). Como se ha comentado en el apartado 4.2.4, un enfoque determinista para estimar el umbral del movimiento de los moluscos es a través del análisis de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo sumergido (ver Figura 4.26). En el ámbito de los moluscos, el origen de estos trabajos está relacionado con el estudio del incremento de la capacidad de erosión del flujo bifásico constituido por arena y partículas gruesas, en este caso fragmentos y conchas sueltas de moluscos, en los lechos marinos, especialmente si estos son cohesivos.

Este incremento en las tasas de erosión ha sido descrito por Amos et al. (1998) y se conoce como *Ballistic Momentum Flux*. Como resultado de la puesta en suspensión de los moluscos, se produce una deformación y posterior erosión del lecho marino. Tras el impacto del molusco contra el suelo, éste rueda por el fondo hasta que nuevamente se pone en suspensión. En la Figura 4.33 se esquematiza este proceso.

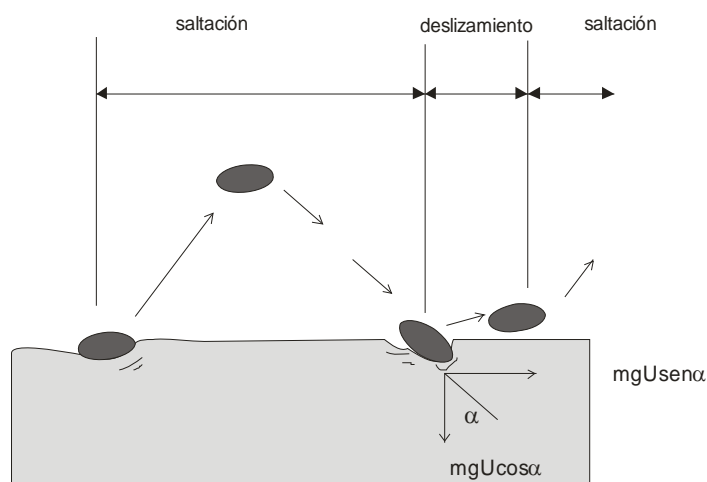


Figura 4.33. Esquema de la puesta en suspensión e impacto de los moluscos en el fondo marino (elaborada a partir de Amos et al., 1998).

La importancia y la influencia del movimiento de las conchas de diversos tipos de moluscos en los procesos de erosión en zonas costeras ha sido objeto de diversos y numerosos trabajos. A continuación se presentan los más importantes así como una pequeña descripción de los mismos.

Olivera y Wood (1997), determinaron las propiedades hidrodinámicas de 11 conchas de distintas familias de moluscos expuestas a una corriente de agua. Hay que indicar en este punto que, al igual como sucede con el trabajo presentado en líneas posteriores (Thompson y Amos, 2002), estos autores estudiaron medio molusco (una concha). Empleando técnicas de visualización de flujo, y a través de la medición de la presión alrededor de la concha, los autores determinaron los coeficientes de arrastre y sustentación de las conchas para las condiciones correspondientes al umbral del movimiento. Además de los coeficientes de arrastre y sustentación, presentados en la Tabla 4.7, una conclusión importante de este estudio es que las fuerzas de sustentación para moluscos con secciones interpuestas al flujo (A_L) inferiores a los 35 cm², como ocurre con los berberechos de tamaño inferior a los 3.5 cm (el tamaño máximo ensayado en este trabajo y otros como Peña *et al.*, 2008), las fuerzas de sustentación son despreciables.

Thompson y Amos (2002), determinaron coeficiente de arrastre de conchas de berberechos depositadas en un fondo cohesivo. Para ello emplearon un anillo cilíndrico en el que se provocaba un flujo radial. Estos autores también determinaron el coeficiente de arrastre de sedimentación de las conchas y la influencia de los procesos de erosión y saltación de las conchas en la erosión de suelos cohesivos. En esta línea también se puede citar el trabajo de Amos *et al.* (2000), que cuantifica los efectos que provoca la saltación de minchas o bígaros (*Littorina littorea*), sobre la erosión de fondos marinos cohesivos. Con este propósito, estos autores determinaron el coeficiente de arrastre de sedimentación de este tipo de organismo.

Por último, también se puede citar los trabajos realizados desde GEAMA (ver Apéndice 1), en los que analizaron los coeficientes de arrastre de puesta en movimiento y el coeficiente de arrastre de sedimentación para berberechos de la zona de estudio de tamaño comercial. En este trabajo se empleó la tecnología PIV para determinar los campos de velocidades sobre el berberecho en el instante correspondiente al umbral del movimiento del mismo.

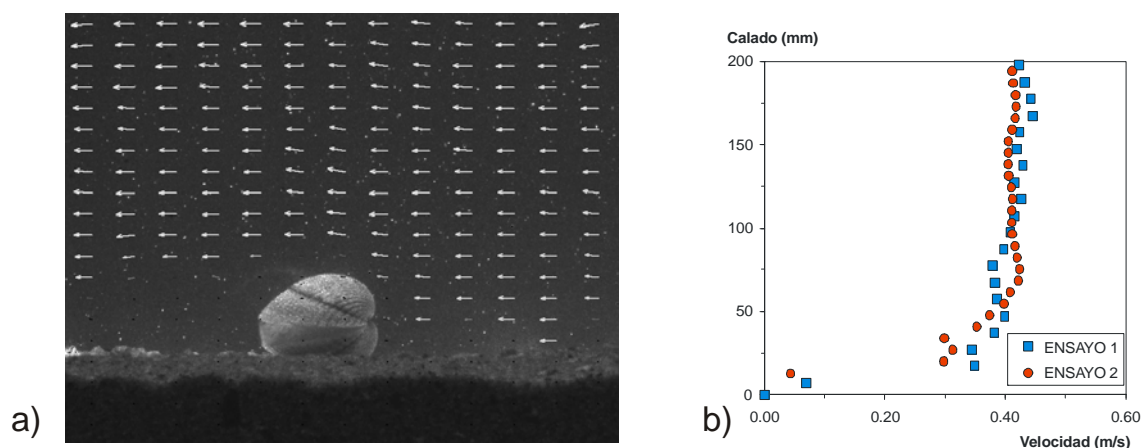


Figura 4.34. (a) Campo de velocidades y, (b) perfil de velocidades correspondientes al umbral de movimiento para un berberecho situado sobre un lecho de arena de los Lombos do Ulla (Peña *et al.*, 2008).

En la Figura 4.34 se presenta un ejemplo del campo de velocidades determinado así como los perfiles de velocidades ($n=2$ repeticiones) estimados para un berberecho de tamaño característico $b=26.3$ mm y factor de forma $SF=0.79$ ⁷⁶. Los valores de los coeficientes de arrastre se calcularon con la velocidad media del flujo y con la velocidad tangencial medida sobre el molusco (ver Tabla 4.7). Otro parámetro importante de este estudio ha sido la caracterización del ángulo de rozamiento interno entre los berberechos y el lecho de arena, estimado como $tg\phi=0.53\pm 0.03$.

Tabla 4.7. Coeficientes de arrastre (media±desviación típica) correspondientes al umbral de movimiento de movimiento de varios cuerpos biogénicos (adaptado de Peña et al., 2008).

CUERPO	LECHO	$C_D (\bar{x} \pm SD)$	REFERENCIA
Bereberchos del Ulla de tamaño comercial	Sedimentos granulares	$0.43 \pm 0.06^*$	Peña et al., 2008
		$0.59 \pm 0.13^{**}$	
Conchas sueltas de moluscos	Canal hidráulico	0.1 – 1.1	Olivera y Wood, 1997
Conchas sueltas de berberechos	Sedimentos cohesivos	0.27 ± 0.15	Thompson y Amos, 2002

*.Valor obtenido con la velocidad media del flujo

**Valor obtenido con la velocidad tangencial sobre el molusco

Otra perspectiva para acometer el estudio de la recolocación de stocks es a través del *análisis de los esfuerzos tangenciales o velocidades de fricción que provocan el movimiento de uno o varios individuos* situados sobre una sección de análisis. Esta metodología es habitual en los estudios de transporte de sedimentos y, aunque existen numerosas aproximaciones y formulaciones, ninguna fórmula está universalmente aceptada.

El análisis del transporte de sedimentos se puede acometer desde varios puntos de vista⁷⁷. Desde un punto de vista determinístico, y hablando únicamente del transporte de fondo, existen fundamentalmente dos tipos de aproximaciones para estimar la movilidad de los sedimentos (Hoan, 2008):

- A partir de la determinación de un parámetro de estabilidad crítico
- A partir de la definición de funciones de transporte de caudal sólido que se relacionan con el parámetro de estabilidad.

El parámetro de estabilidad relaciona los esfuerzos ejercidos por el fluido sobre las partículas con las fuerzas que estabilizan o fijan la partícula al lecho. El más conocido fue el definido por

⁷⁶ La definición geométrica de los moluscos así como la expresión para la obtención de forma se presentan en el apartado 4.4.1

⁷⁷ No es objeto de esta tesis profundizar en los trabajos de transporte de sedimentos. Aquí se introducirá únicamente algunos conceptos fundamentales de los estudios de transporte de gravas, por tratarse de fenómenos que presentan cierta analogía con la movilización de moluscos adultos situados sobre un lecho aluvial. En Peña (2002) se puede encontrar un estado del arte de los estudios de transporte de sedimentos aluviales en ríos. Entre muchas otras, algunas referencias también destacables son p.ej. las *Lecture Notes* de M.H García (2006) o Leo Van Rijn (2008).

Shields (1936) como un ratio entre las fuerzas tangenciales sobre el lecho ($\propto \tau_b \cdot d^2$) y el peso sumergido del sedimento ($\propto g(\rho_s - \rho)d^3$):

$$\Psi_s = \frac{\tau_b}{g(\rho_s - \rho)d} \tag{4.6}$$

Aplicando la conocida relación de la tensión tangencial del lecho con la velocidad de fricción para los flujos 2D uniformes, se llega a la siguiente definición que también se conoce como número densimétrico de Froude.

$$\Psi_s = Fr_{*\Delta} = \frac{u_*^2}{\Delta g d_m} \tag{4.7}$$

Como la turbulencia juega un papel importante en la determinación del movimiento de las partículas, se cuestiona si para determinar el umbral de movimiento sólo se debe emplear la velocidad de corte, especialmente cuando el flujo no es uniforme. Por este motivo, han surgido nuevas definiciones de parámetros de estabilidad que contemplan la importancia de la turbulencia p.ej. a través de la incorporación de la energía cinética turbulenta. Para consultar la definición de estos parámetros de estabilidad se puede consultar p.ej. Hofland (2005) o Hoan (2008).

Para analizar la estabilidad de un lecho, Shields definió en forma de ábaco (Figura 4.35) los valores del parámetro de estabilidad que una vez superados, provocaban el arrastre de los sedimentos, es decir:

$$\Psi_s = \frac{\tau_b}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{u_*^2}{\Delta g d} \leq \Psi_{s,c} = \frac{u_{*,c}^2}{\Delta g d} = f\left(\frac{u_{*,c}^2}{\Delta g d}\right) = f(Re_*) \tag{4.8}$$

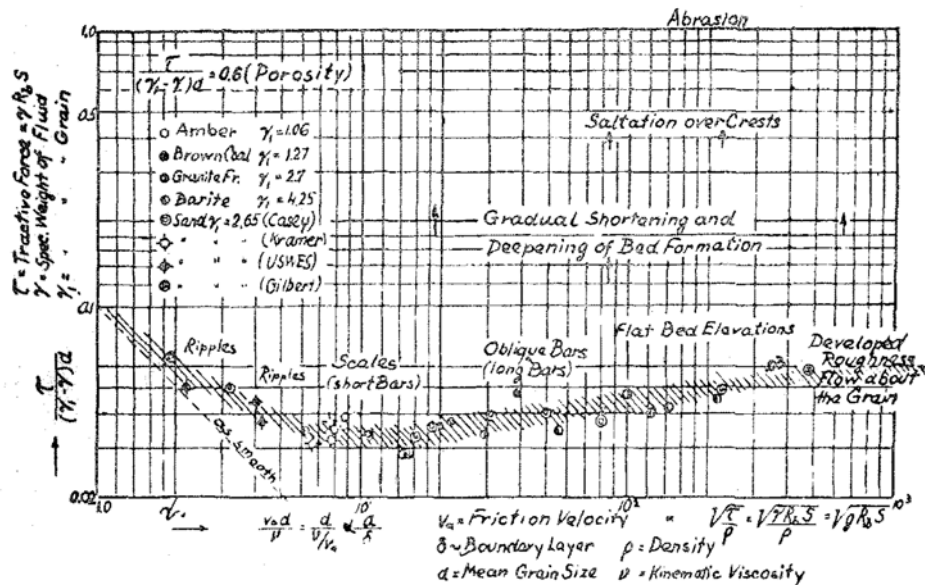


Figura 4.35. Curva original de Shields traducida al inglés (1936). El área rayada representa el valor de la tensión tangencial crítica como función del número de Reynolds granular Re_{*} .

Cuando se emplean el concepto de la función de transporte de sedimentos, el procedimiento habitual consiste en relacionar a través de una relación funcional el parámetro de estabilidad con un parámetro de movilidad del sedimento Φ , (Hoan, 2008):

$$\Phi = f(\Psi) \quad (4.9)$$

Las relaciones funcionales suelen ser de tipo potencial, y fundamentalmente se pueden dividir entre aquellas que contemplan el parámetro de estabilidad crítico y las que no:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= a\Psi^b \\ \Phi &= a(\Psi - \Psi_c)^b \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

El parámetro de movilidad del sedimento debe cuantificar la respuesta del lecho ante el evento de transporte. Nuevamente, el parámetro de movilidad se puede definir de dos formas: (i) a partir de un número de elementos (n) desplazados por unidad de área (A) y tiempo (T) o, (ii) como el número de partículas que atraviesan una sección de análisis por unidad de tiempo. El primer método se denominar ratio de movilización, E (*volume entrainment rate*):

$$E = \frac{nd^3}{AT} \quad (4.11)$$

El segundo ratio es el transporte sólido de fondo, definido como:

$$q_s = \frac{nd^3}{BT} \quad (4.12)$$

donde B es el ancho de la sección de análisis.

Estos parámetros se pueden relacionar a través de la longitud de desplazamiento del sedimento l :

$$q_s = E \cdot l \quad (4.13)$$

Los ratios definidos en las ecuaciones (4.11) y (4.12) se pueden emplear como indicadores de la movilidad del sedimento a partir de las siguientes expresiones adimensionales (Hofland, 2005):

$$\Phi_q = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d^3}} \quad (4.14)$$

$$\Phi_E = \frac{E}{\sqrt{\Delta g d}} \quad (4.15)$$

Algunas relaciones funcionales entre los parámetros de movilidad y de estabilidad para el transporte de gravas se pueden consultar p.ej. en Hofland (2005) y Hoan (2008).

En la línea de *determinar los esfuerzos de arrastre* de los moluscos a partir de la determinación de las tensiones o velocidades de fricción se pueden citar los siguientes trabajos de Roegner *et al.* (1995), Hunt (2004) y St-Onge y Miron (2007).

Roegner *et al.*, (1995), determinaron en un canal recto el porcentaje de larvas (de 240 a 270 μm) de la almeja *Mya arenaria* arrastradas por velocidades de flujo de ~ 7 , ~ 16 , ~ 29 y ~ 35 cm/s.

Las velocidades de fricción, estimadas a partir de la ley logarítmica para estas velocidades, se correspondieron con los siguientes valores: 0.62, 1.03, 1.62 y 1.75 cm/s. Estos valores, un tanto reducidos para la velocidad de corte, se deben a que el sedimento empleado en el trabajo era una arena fina de 175 μm de diámetro medio. El valor del coeficiente de rugosidad z_0 de la ley de logarítmica fue del orden de ~ 0.1 mm.

Los ensayos consistieron en medir la resistencia a la erosión de larvas de *M.arenaria* enterradas en el sustrato en un ensayo de 50 minutos de duración. Una vez transcurrido el ensayo, contabilizaron las larvas y descubrieron que para las condiciones de flujo 7 y 16 cm/s, prácticamente el 90% de las larvas permanecían en la sección de análisis, y que además no existían diferencias significativas entre ambas velocidades. Con la velocidad de 29 cm/s, el porcentaje de larvas retenidas descendía hasta el 65%, y para la máxima velocidad de ensayo, la práctica totalidad de las larvas era erosionada. Los autores relacionan el transporte de sedimentos con la movilización de las larvas, ya que hasta la velocidad de 29 cm/s, prácticamente no observaron arrastre de sedimentos. Para la velocidad de 29 cm/s, los sedimentos se movilizaban por saltación, y para la máxima velocidad, el transporte por fondo era intensivo.

En otra serie de experimentos, Roegner *et al.* (1995), comprobaron el efecto del enterramiento de las larvas con las velocidades de 16 y 25 cm/s. Para estos ensayos emplearon larvas vivas y muertas, y analizaron el número de organismos retenidos en el sustrato. Para la velocidad más baja, prácticamente no encontraron diferencias entre el estado vivo/muerto o larva enterrada/en superficie. Sin embargo, para la velocidad de 29 cm/s, la cantidad de larvas muertas retenidas era prácticamente nulo, entorno al 10-15%, mientras que un 62% de individuos vivos permanecieron en la sección de análisis.

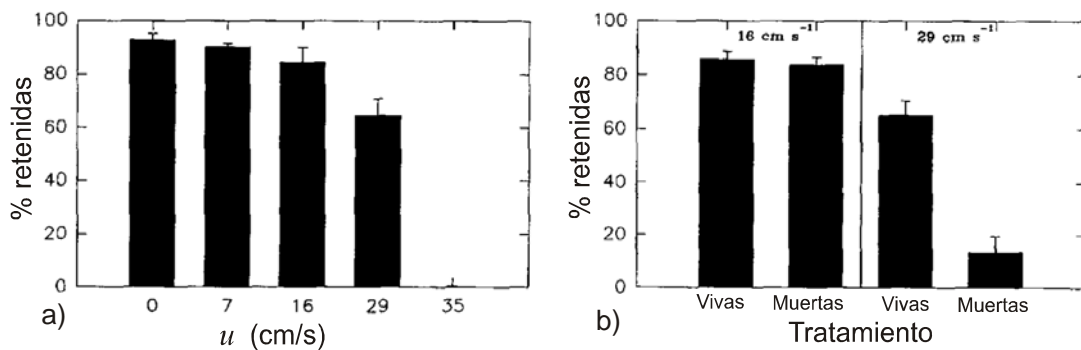


Figura 4.36. a) Proporción (media \pm SD) de larvas de *M.arenaria* retenidas en un sustrato de arena fina en función de la velocidad de la corriente y b) Proporción (media \pm SD) de larvas de la misma especie retenidas en función de la velocidad y el grado de enterramiento en el sustrato (Roegner *et al.*, 1995).

Por tanto, el proceso activo de enterrarse puede reducir las tasas de erosión de las larvas de esta especie, al menos hasta que las velocidades superan la tensión crítica que supera el umbral de movimiento del sustrato.

Hunt (2004) realizó un diseño experimental factorial en el que analizó la erosión de los juveniles de dos especies de almeja, *M.arenaria* y *Mercenaria mercenaria* bajo dos velocidades de fricción ($u_* = 1.1$ y 1.6 cm/s, que se corresponde con una velocidad del flujo de 27 y 36 cm/s) y dos tipos de sustrato (arena muy fina de 180 μm y fina de 325 μm).

La primera serie de experimentos fueron realizados con moluscos de ~1.5 mm, que colocó sobre un lecho de sedimentos en el que previamente se habían enterrado almejas adultas, en una densidad de 2500 ind/m².

Hunt intentó ajustar el arrastre de las larvas de estas especies a las predicciones de las fórmulas de transporte de Shields (determinando la densidad y el diámetro equivalente de los juveniles) pero los resultados obtenidos contradecían a la experimentación. Así, las fórmulas de transporte predecían que la movilización de la *Mya* sería superior que la de la *Mercenaria*, pero como se puede ver en la Figura 4.37, los ensayos dieron el resultado opuesto.

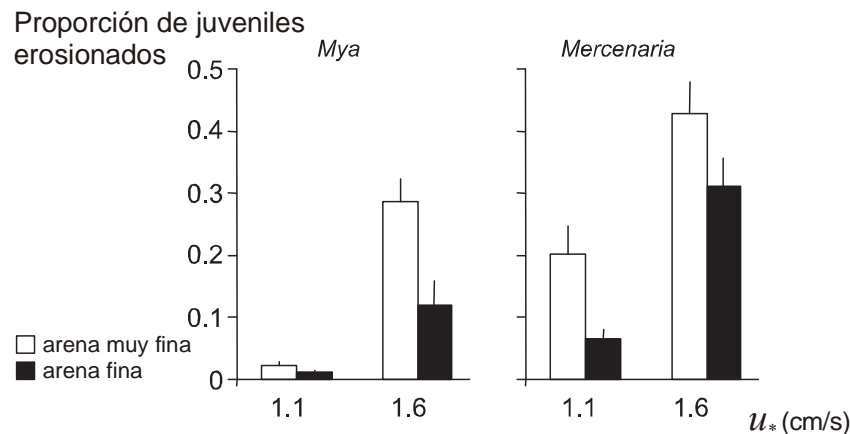


Figura 4.37. Proporción (media ± desviación típica) de juveniles de *M.arenaria* y *M.mercenaria* (~1.5 mm) erosionados para velocidades de fricción de 1.1 y 1.6 cm/s en dos sedimentos de 180 y 325 μ m (Hunt, 2004)

Para analizar estadísticamente que factores afectaban al movimiento, Hunt desarrolló un Análisis de la Varianza de tipo factorial. Los resultados de este análisis señalan que todos los factores principales (velocidad de fricción, especie y sedimento) afectaban significativamente a la media de juveniles movilizados. Además, el efecto combinado de los tres factores también era significativo. En resumen, el trabajo de Hunt indica que la erosión es mayor para velocidades de fricción más altas, para la larva de *mercenaria* y para el sedimento más fino.

En otra serie de experimentos Hunt analizó la influencia del tamaño en la movilización de estas especies, empleando individuos de 4.9 mm, para la *Mya*, y de 3.3 mm, para la *Mercenaria*. En este experimento, también de 50 minutos de duración, se analizó el comportamiento en el lecho de arena más fino y con la mayor velocidad. El porcentaje de larvas movilizadas descendió desde el 28.5% al 4.0% para la *Mya arenaria*, y desde el 42.9% al 14.9%.

Los trabajos anteriores están limitados al estudio de moluscos de pocos milímetros de tamaño. St-Onge y Miron (2007) realizaron un estudio de arrastre en un pequeño canal de recirculación en forma de hipódromo (20 cm de ancho de sección y 75 cm de longitud en el tramo recto) con almejas *Mya arenaria* con tamaños comprendidos entre 0 y 20 mm.

Las almejas fueron clasificadas en 4 grupos de tamaños (0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 mm) y fueron expuestas a velocidades de 7, 16, 29 y 25 cm/s. Para estas velocidades, las velocidades de fricción determinadas con la ley logarítmica fueron de 0.91, 1.05, 2.01 y 2.35 cm/s, ver Figura 4.38. Los ensayos se realizaron enterrando, a mano, las almejas en el sustrato y contabilizando aquellas que eran arrastradas y/o quedaban al descubierto durante la duración del mismo, que fue de 60 minutos.

En este trabajo, St-Onge y Miron, emplearon cuatro tipos de sedimentos para analizar la influencia del sustrato en la movilización de los moluscos. Los sedimentos empleados fueron fangos (<63 micras), fangoso-arenoso, con la mayoría de partículas entre 125 y 250 micras, arenoso, con una composición de tamaños fundamentalmente entre 0.5 y 1mm, y gravas, con más de la mitad de los tamaños por encima de los 2-4 mm. Además, estos autores emplearon los resultados de los ensayos de erosión para desarrollar un modelo estadístico logístico para estimar el porcentaje de moluscos erosionados en función de los factores analizados (talla, velocidad, tipo de sedimento) y sus interacciones (talla x velocidad, talla x sedimento, velocidad x sedimento y talla x velocidad x sedimento).

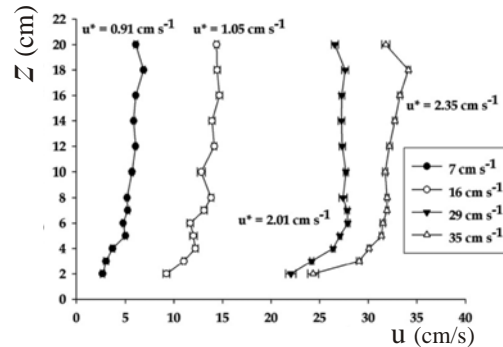


Figura 4.38. Perfiles de velocidad de los ensayos de St-Onge y Miron (2007). Nótese que aunque los autores emplearon 4 muestras de sedimento, únicamente emplean las velocidades de fricción correspondientes a uno de los tipos usados.

Los resultados del análisis de la varianza de los ensayos de St-Onge y Miron señalan que existen fuertes interacciones significativas entre los factores analizados. Los factores principales son todos significativos: a mayor velocidad o menor tamaño mayor porcentaje de erosión, aunque la respuesta variaba en función del tipo de sedimento (ver Figura 4.39).

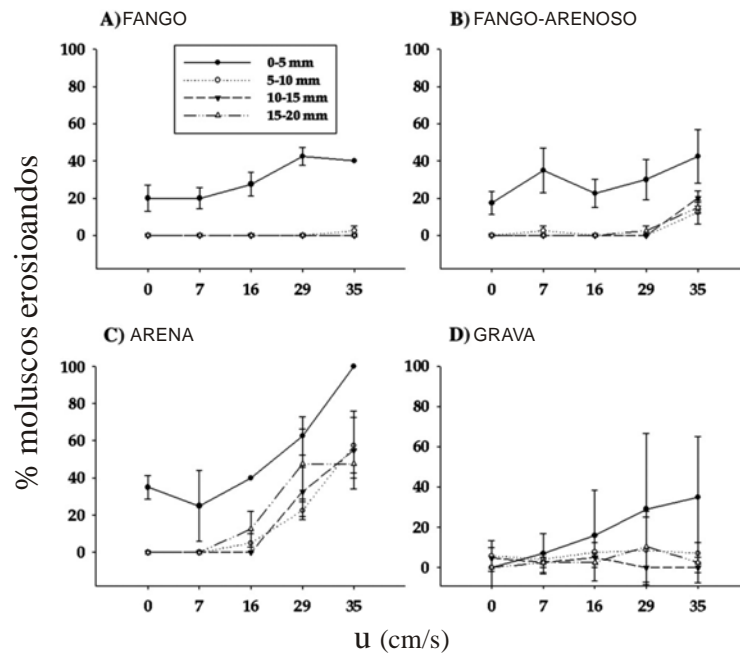


Figura 4.39. Porcentaje de *Mya arenaria* erosionada en función de la velocidad de la corriente, el tamaño y el tipo de ambiente sedimentario en los ensayos de laboratorio de St-Onge y Miron (2007).

Así, p.ej., las almejas de tamaño superior a los 5 mm, no fueron arrastradas en el ambiente fangoso, y para los ambientes arenoso-fangoso y arenoso comenzaron a movilizarse para velocidades de 29 y 16 cm/s respectivamente. Para el ambiente de gravas prácticamente no existe movilización de esta fracción. Si se analiza el comportamiento de las almejas de menor talla, parece que siguen un comportamiento parecido en los ambientes fangoso, arenoso-fangoso y arenoso, con ratios de erosión crecientes con la velocidad y con la rugosidad o tamaño del sedimento. Sin embargo, estas tasas de erosión se reducen en el ambiente de gravas. Este comportamiento tan irregular o “poco lineal” se ajusta a los resultados del ANOVA, que indicaban fuertes interacciones entre los factores del ensayo.

Para comprobar la importancia del estado de las almejas (vivas o muertas), los autores realizaron una serie de ensayos con los cuatro ambientes sedimentarios, las cinco velocidades de flujo y almejas muertas (sin repetición). De los 80 escenarios, en 11 encontraron diferencias significativas en la movilización de los moluscos, 2 de ellos mostrando mayores ratios de erosión en los individuos vivos y 9 en los muertos.

4.3. METODOLOGÍA: DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

4.3.1. Introducción

Como se ha comentado, se han realizado dos fases de experimentos de arrastre de berberechos. La primera fase no es objeto de esta Tesis Doctoral y fue llevada a cabo durante el año 2004. El estudio consistió en una serie de ensayos en el canal del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Caminos (ETSECCP) en los que se analizó el arrastre y puesta en suspensión de berberechos aislados depositados sobre un lecho de arena. Este trabajo ha sido un trabajo de investigación tutelada del autor de esta Tesis Doctoral (Anta, 2006) y ya ha sido publicado en varios congresos y revistas indexadas (Anta *et al.*, 2005; 2007; Peña *et al.*, 2008).

En la segunda fase, llevada a cabo durante el 2008, y que es objeto de esta tesis, se realizaron nuevos ensayos en un canal de recirculación en forma de hipódromo ubicado en el Centro de Investigación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil, CITEEC. En estos experimentos se ha estudiado el comportamiento de grupos de berberechos bajo diferentes velocidades, grados de reclutamiento y distribución de tamaños. En total se han analizado un total de 144 escenarios.

Tabla 4.8. Resumen de los ensayos realizados y sus parámetros más representativos.

TIPO DE ENSAYO (NÚMERO DE REPETICIONES)	TAMAÑOS ANALIZADOS	ESTADO DEL BERBERECHO	RECLUTAMIENTO	VELOCIDAD DE LA CORRIENTE
Grupo de tamaños (4)	15 – 20 mm	Vivo	500 ind/m ²	0.29 m/s
	20 – 25 mm			0.32 m/s
	25 – 30 mm			0.35 m/s
	30 – 35 mm			0.39 m/s
Poblaciones estacionales (3)	Población de Otoño	Muerto	1000 ind/m ²	0.44 m/s
	Población de Primavera			0.47 m/s

Como se puede observar en la Tabla 4.8, se han realizado dos tipos de ensayo en función de la distribución de tamaños de los berberechos. En el primer bloque, denominado de Grupos de tamaños o de tallas, se han analizado grupos de berberechos de tamaños entre 15 y 35 mm, y empleando el símil del transporte de sedimentos, de granulometría "uniforme" en husos de 5 mm. Esta es la metodología empleada habitualmente en este tipo de experimentos encontrados en la bibliografía para juveniles y bivalvos de tamaño inferior a los 15 – 20 mm. Algunos ejemplos de este tipo de trabajos se han recogido en el apartado anterior (ver, entre otros, Beukema y de Vlas, 1989; de Montaudouin y Bachelet, 1996; de Montaudouin, 1997; Snelgrove *et al.*, 1998; de Montaudouin *et al.*, 2003; St-Onge y Miron, 2007)

En el segundo tipo se han empleado dos distribuciones tipo de tamaños similares a las encontradas en la zona de los Lombos do Ulla para una población joven y una adulta. La distribución para la población joven se corresponde con la que se puede encontrar al principio de una campaña de marisqueo (Septiembre), y la adulta que es la que se puede encontrar en el banco al final de campaña (Abril). Esta distribución se presenta en el apartado 4.3.4.2 y ha sido extraída de los datos del Plan de Recuperación Ambiental de los Lombos do Ulla desarrollado por la Xunta de Galicia, ver Figura 4.40 (Parada *et al.*, 2006).

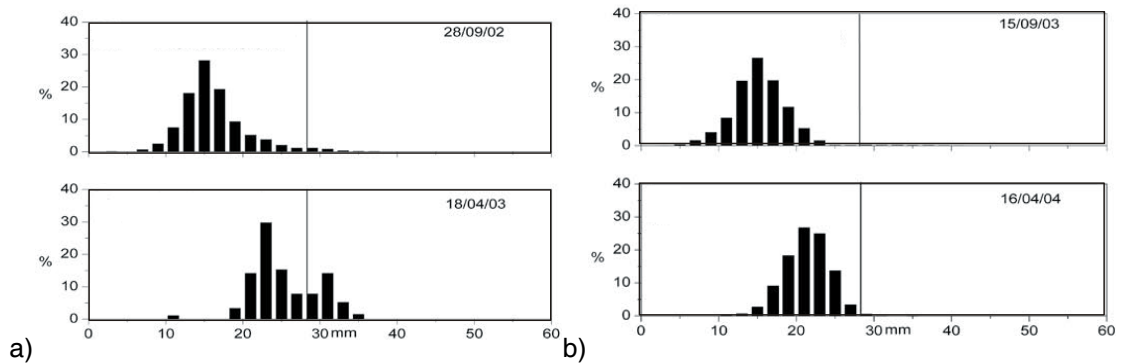


Figura 4.40. Distribución del tamaño de los berberechos en el banco de los Lombos do Ulla a) en la campaña 2002-2003, y b) en la campaña 2003-2004 (Parada *et al.*, 2006)

Hay que señalar que esta última tipología de ensayo es innovadora ya que, desde el conocimiento del autor, hasta el momento únicamente se había analizado el arrastre de moluscos en laboratorio con distribuciones de tamaño "uniformes".

Además del tamaño y distribución de los berberechos se han contemplado otras variables como el «estado» del berberecho o el reclutamiento. El estado hace referencia a si en los grupos analizados los organismos estaban vivos o muertos. En la literatura se recogen ensayos con moluscos vivos o muertos (p.ej. de Montaudouin y Bachelet, 1996; de Montaudouin *et al.*, 2003; St-Onge y Miron, 2007) para analizar si el comportamiento de los molusco afecta a su movilización y también para contrastar las hipótesis de la asentamiento/migración vertical activa y pasiva (Butman, 1987).

El reclutamiento, o densidad de berberechos por superficie, se seleccionó a partir de los datos de poblaciones de la zona de estudio (Parada *et al.*, 2006) y en base a reuniones mantenidas con José Molares y Adoración Sánchez-Mata, investigadores del Centro de Investigaciones Mariñas de Corón (Vilanova de Arousa), responsables del seguimiento del Plan de Recuperación Ambiental dos Lombos do Ulla. Hay que señalar que los valores seleccionados, 500 y 1000 ind/m², están en el rango de variación de otros trabajos realizados con este tipo de

berberecho en otras localizaciones, como por ejemplo el trabajo de de Montadouin y Bachelet en Francia (1996).

En resumen, se puede indicar que la elección de estos parámetros como variables de análisis se realizó en base a la literatura existente revisada en el apartado 4.2 pero particularizados para la zona de los Lombos do Ulla.

4.3.2. Instalaciones

Los experimentos se han realizado en un canal de recirculación en forma de hipódromo construido específicamente para la realización de este proyecto. Como se ha comentado en el apartado 4.2.5, en los estudios del bentos marino es habitual emplear canales de recirculación ya sean rectos, anulares o de circuito de carreras (ver Figura 4.29). Una de las principales ventajas de este tipo de canales frente a los canales con aljibe inferior y depósito elevado en cabecera de nivel fijo, como los que dispone el Área de Ingeniería Hidráulica del GEAMA en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela o en la planta de Hidráulica del CITEEC, es que es el volumen de agua necesario es relativamente pequeño, por lo que es fácil emplear agua salada o salmueras. El principal inconveniente de este tipo de canales de recirculación radica en ofrecer un flujo estable y sin corrientes secundarias ni otro tipo de artificios hidráulicos, especialmente para caudales elevados.

El canal empleado se ha construido con forma de circuito de carreras en acero inoxidable. Para su diseño se han revisado las recomendaciones recogidas en la literatura relativas a las características de los canales empleados en estudios biológicos del bentos marinos y en otros trabajos con canales similares. En especial, se han seguido las recomendaciones generales recogidas en Nowell y Jumars (1984; 1987) así como otros ejemplos reales desarrollados en Muschenheim *et al.* (1986) y en la recopilación de canales de la red de laboratorios europeos de estudios del bentos marino BioFlow (Jonsson *et al.*, 2006).

En la fase de elaboración del canal se contó con la colaboración de Ramón Losada Quevedo, investigador visitante del Instituto de Hidráulica Ambiental IH de la Universidad de Cantabria.

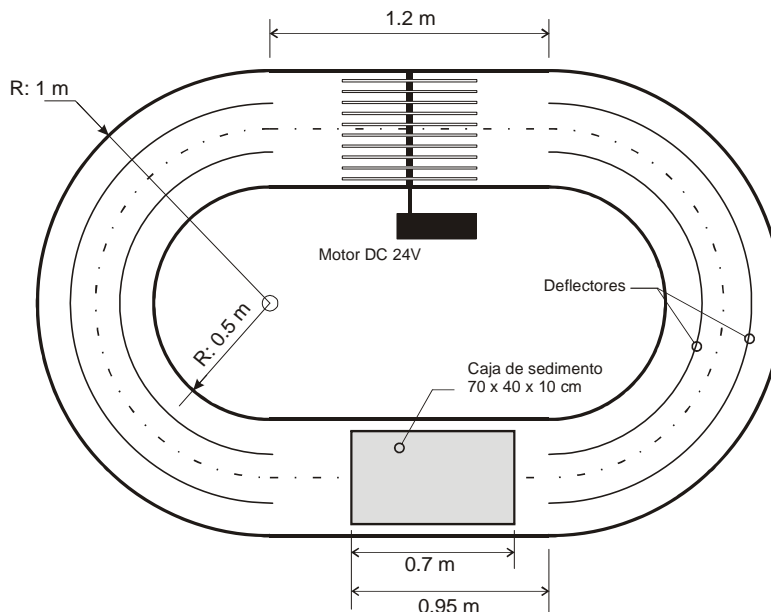


Figura 4.41. Esquema del canal "cockledrome" empleado en la realización de ensayos.

El canal dispone de unas ventanas de plexiglás transparente en la zona donde se realizan los experimentos para facilitar la realización de los mismos y para poder emplear técnicas de visualización de flujo. El desarrollo del canal es de ~9.05 m, y está compuesto por dos alineaciones rectas de 1.2 m y por dos curvas semicirculares de 1.25 m de radio. El ancho del canal es de 50 cm y el calado de 40 cm. En las siguientes figuras (Figura 4.41 y Figura 4.42) se presenta una planta y unas fotografías del mismo.

El movimiento del agua se produce por la fricción de 10 discos de material plástico de 28 cm de radio y 1 cm de espesor. Los discos giran solidariamente con un eje propulsado por un motor reductor PARVALUX de 24 V de corriente continua (134W), con un par máximo de 9 N·m y una velocidad de giro de 98 rpm.



Figura 4.42. Vista general de canal y detalle de las ruedas motrices.

Hay que señalar que en los experimentos correspondientes a las velocidades más bajas (V01 a V03), el motor empleado fue un modelo Crouzet de 24 V de corriente continua de menor potencia (24 W) y par motor (< 4 N·m). Como las velocidades alcanzadas con este motor no superaban los ~35 cm/s, se optó por sustituirlo por el modelo mencionado anteriormente. En ambos casos la regulación de la velocidad de giro se realizó con una señal variable de 0 a 10 V a través de un potenciómetro.

El canal cuenta en la zona de ensayo con una caja de 70 x 40 x 10 cm que se puede enrasar con arena hasta alcanzar el nivel del resto de la solera del canal. Se ha empleado arena de la desembocadura del Ulla ligeramente mezclada con árido uniforme de construcción de diámetro 2 mm. La mezcla obtenida se analizó según la UNE-EN 933 (1998) y tiene un diámetro medio 0.98 mm, un $d_{50}=1.42$ mm y un coeficiente de gradación $Gr = 0.5(d_{84} / d_{50} + d_{50} / d_{16}) = 1.89$. Por lo tanto el sedimento analizado es una arena muy gruesa uniforme ($Gr < 3$). El contenido de materia orgánica determinado según la norma ASTM D-2974 (1987) fue inferior al 1%. La curva granulométrica aparece reflejada en la Figura 4.43.

Además, y con objeto de reducir la aparición de artificios hidráulicos y el efecto del flujo en curva y la generación de corrientes secundarias se instalaron 2 deflectores semicirculares en cada uno de los tramos curvos (Figura 4.41) similares a los de otros canales de la literatura (ver Figura 4.29).

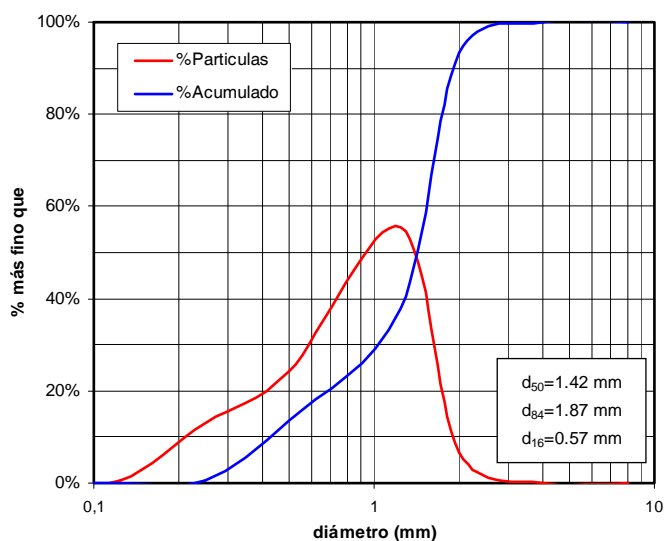


Figura 4.43. Granulometría de la arena empleada en la realización de los ensayos de arrastre de berberechos.

En los ensayos el calado de la lámina de agua fue de 15 cm. De este modo, la relación ancho-calado es de ~ 3.34 , similar a la empleada en otros estudios de arrastre de organismos bénticos a escala de laboratorio: 5 en Snelgrove *et al.* (1998) o Hunt (2004), ~ 3.34 (de Montaudouin y Bachelet, 1996; de Montaudouin *et al.*, 2003) o ~ 2.14 en St-Onge y Miron (2007).

El objetivo de mantener una relación de aspecto alta es el de conseguir un flujo uniforme 2DV, con un desarrollo adecuado de la capa límite y reducir la aparición de corrientes secundarias originadas por la asimetría en la resistencia al flujo ya que existen tres paredes metálicas (el canal) y la lámina libre (Nowell y Jumars, 1987). Sin embargo, y como ya se comentó en el Capítulo 2, las corrientes secundarias dejan de ser importantes en flujos 2D en canales rectos cuando la relación ancho:alto B/H es superior a ratios que oscilan entre 4:1 (Song, 1994), 5.2:1 (Kironoto y Graf, 1994) hasta valores de 10:1 (Nezu y Nakagawa, 1993; Rodríguez y García, 2008; Roussinova *et al.*, 2008).

Como se ha señalado en el Capítulo, la aparición de estas corrientes secundarias influye en la distribución vertical de velocidades (§2.3) y de las tensiones tangenciales (§2.4). Esta circunstancia se discutirá con detalle en apartados posteriores.

Para poder conservar y alimentar a los berberechos empleados en los experimentos se dispuso de un acuario de 240 L (ver Figura 4.44). El acuario empleado disponía de sistema de filtrado (físico-biológico), un regulador de temperatura y un filtro de proteínas.

Para el perfecto mantenimiento de organismos vivos dentro de un acuario, primero hace falta que este “madure”, es decir, que las bacterias del filtro biológico estén perfectamente instaladas y sean capaces de degradar los compuestos nitrogenados presentes en los desechos de los moluscos. El periodo de maduración varía mucho entre acuarios de agua dulce y de agua salada, siendo en estos últimos de uno a tres meses.

Inicialmente en el acuario se introdujo una muestra de sedimento de la zona de estudio con ~ 130 L de agua de la Ría de Arousa, que además de la salinidad aportaba materia orgánica (algas, fitoplancton y materia orgánica disuelta) que al descomponerse acelera el proceso de maduración del acuario. El volumen restante se rellenó con agua de mar sintética elaborada para tal fin.

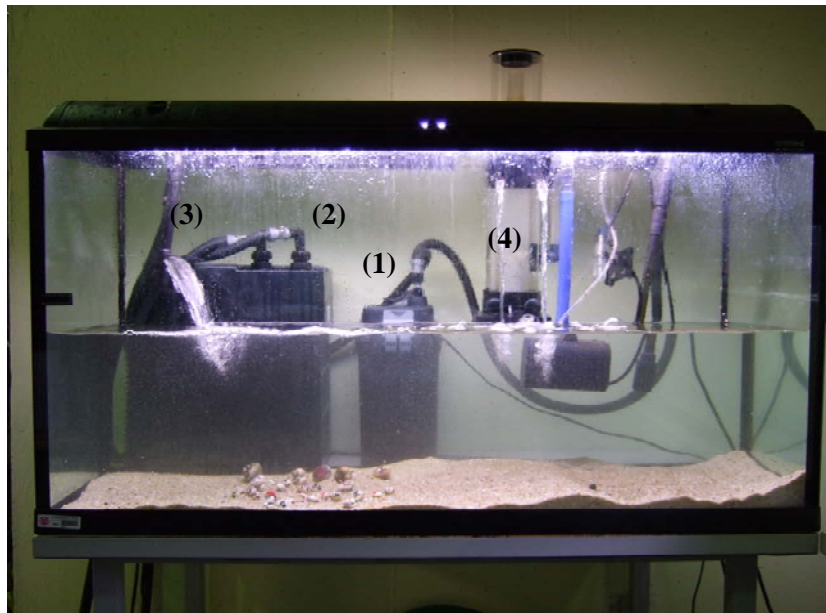


Figura 4.44. Acuario de agua salada empleado para la conservación de los berberechos: el agua captada por el filtro físico-biológico(1) pasa a través del regulador de temperatura(2) para retornar en forma de cascada al acuario(3) y así favorecer la aireación. El filtro de proteínas (4) funciona en paralelo a este sistema.

Durante la fase de maduración se realizó un control diario de los parámetros físico-químicos del acuario (ver Figura 4.45). La salinidad media fue de un 34 ‰, para una temperatura media 14.5° C. El pH medio del acuario es de ~8, similar al del agua de mar. La cantidad de oxígeno disuelto en el agua depende de la temperatura y salinidad de esta. A saturación, el OD se puede estimar a partir de la siguiente fórmula semiempírica (Weiss, 1970):

$$OD_{sat} = 14.6244 - 0.367134T + 0.0044972T^2 - 0.09666S + 0.00205ST + 0.0002739S^2 \quad (A2.16)$$

donde OD_{sat} es el oxígeno disuelto a saturación (mg/L), T es la temperatura del agua (° C) y S es la salinidad (g/kg o ‰)

Para hallar el punto de saturación se toma como referencia los valores medios de temperatura y salinidad (14.5° C y 34 ‰) y obtenemos que para estos valores la concentración máxima de oxígeno disuelto en agua es 12.26 mg/L (100%). Es importante que la concentración de oxígeno esté próxima al punto de saturación para asegurarnos que los organismos que introduzcamos no van a estar sometidos a un estrés por falta del mismo.

Para estimar el porcentaje de OD_{sat} existente en el acuario se empleó una sonda de oxígeno Hach HQ40D. El OD medio disponible en el acuario registrado fue de 7.85 mg/L. Este valor, y los anteriores, se obtuvieron en la fase de maduración del acuario, representada en la Figura 4.45.

En esta figura también se representa la evolución de los nitritos, que aumentan desde la instalación hasta un valor máximo de 1 mg/L. A partir del vigésimo segundo día decrecen hasta desaparecer. También se llevó un control de nitrógeno amoniacal, que se encontró siempre por debajo de los límites de detección de los test empleados para su determinación (~0.1 mg/L).

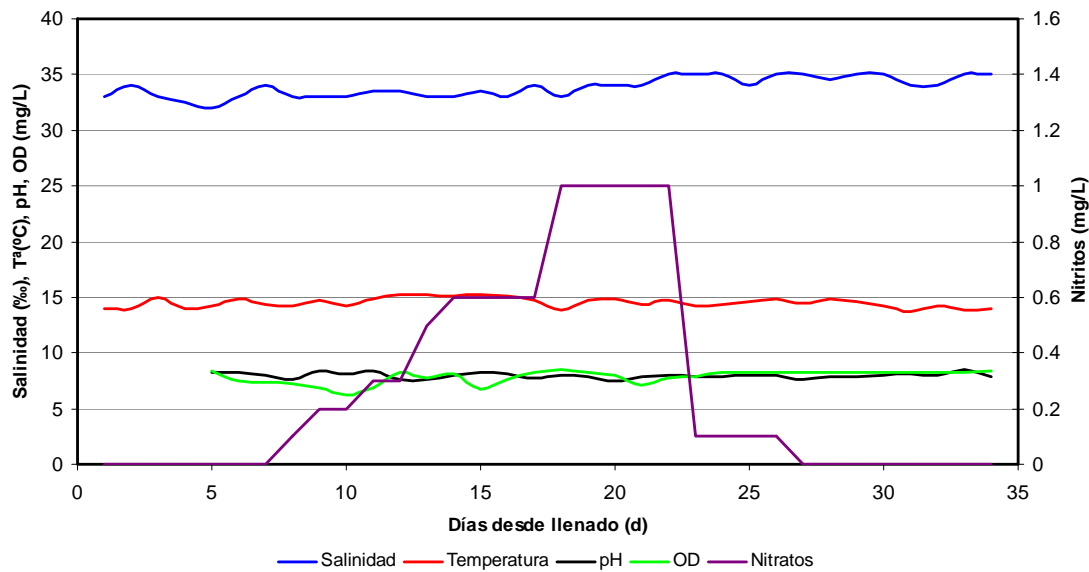


Figura 4.45. Evolución de los parámetros físico-químicos del acuario durante la fase de maduración. Se puede observar como se produce la reducción de los nitritos, indicador de que se alcanzó la maduración del acuario.

Tras la maduración del acuario se realizaron controles semanales para comprobar que los parámetros se mantenían estables.

4.3.3. Instrumentación empleada

En los experimentos se buscó caracterizar de la forma más completa el perfil de velocidades y esfuerzos de corte, especialmente cerca del lecho, para cada una de las configuraciones de flujo. En la fase inicial de la experimentación se empleó un velocímetro acústico de efecto doppler (ADV) Sontek microADV® para analizar de un modo casi cualitativo que el flujo fuese bidimensional y obtener un orden de magnitud de la velocidad de la corriente para diferentes valores de voltaje regulado en el motor.

Este tipo de equipos ha sido empleado con éxito en numerosos trabajos realizados anteriormente por otros miembros del GEAMA en diversas tipologías de flujo como escalas de peces (Cea, 2005), en estructuras hidráulicas y en aplicaciones de transporte de sedimentos (Peña, 2002) o en flujo en modelo físico de un meandro inundable (Mera *et al.*, 2008). Una descripción detallada del mismo, su funcionamiento y procedimiento para el postprocesado de las velocidades se desarrolla en Lohrman *et al.* (1994) y p.ej en Nikora y Goring (1998), García *et al.* (2005) y Cea *et al.* (2007) respectivamente.

Sin embargo, la instrumentación principal que se empleó para determinar los campos de velocidades y la distribución de las tensiones ha sido la tecnología Particle Image Velocimetry (PIV). El equipo PIV empleado es de la casa LaVision®. En los ensayos se realizó la adquisición de las imágenes con una cámara FlowMaster 3S de 1Mpx (1280 x 1024 px²) de resolución a una frecuencia de 3.33Hz. El flujo se sembró con partículas de Poliamida de 50 micras de la casa DANTEC DYNAMICS®. El intervalo entre disparos se fijó en función de la velocidad de la corriente a valores que oscilaron entre los 2000 y los 4500 μ s.

Para determinar este parámetro se minimizó el RMS (*Root Mean Square*) de la velocidad media de una serie de 10 imágenes tomadas con diferentes valores del tiempo de disparo. El valor inicial de prueba fue determinado con el ayudante incluido en el software Davis 7.2 de Lavisión®. Como se ha comentado en el Capítulo 3 (§3.3.4.3), en la actualidad, con los algoritmos avanzados de evaluación de malla decreciente, el valor del tiempo de disparo (y por tanto, del desplazamiento de las partículas), ya no es tan crítico para evaluar de un modo preciso las velocidades con los algoritmos de correlación cruzada.

Los principales parámetros de la configuración del equipo se recogen en la Tabla 4.9 . Una descripción detallada de los mismos se encuentra en el desarrollo del Capítulo 3 (§3.3.3 y §3.3.4), y una descripción más detallada del equipo de la UDC en el apartado 3.4.

Tabla 4.9. Resumen de los principales parámetros de configuración del PIV

Partículas	Poliamida, 50 [μm]
Intervalo de disparo entre fuentes láser	2000 a 4500 [μs]
Distancia de trabajo	~ 1.12 [m]
Distancia focal, f	~ 28 [mm]
Apertura del diafragma, D_a	8 [mm]
Resolución de la imagen	1280 x 1020 [px^2]
Tamaño del CCD	8.6 x 6.9 [mm^2]
Rango dinámico cámara	12 bits. 4096 niveles de gris (counts)
Magnificación	0.025
Campo de visión	~ 314 x 215 [mm^2]
Factor de escala	4.1 [px/mm]
Número máx. de vectores por imagen	160x120 = 28800, ventanas de 32 x 32 [px^2], 75% overlap
Número de vectores por imagen	~128x82 = 10496, área de ~250x160 mm, con ventanas de interrogación de 32 x 32 [px^2], 75% overlap
Frecuencia de adquisición	3.33 [Hz]
Número de imágenes adquiridas	500 imágenes por ensayo - 150 [s]
Software de evaluación	Davis 7.2.254

Durante el desarrollo experimental se detectó una pequeña falta de alineación entre los dos haces generados por las fuentes láser gemelas⁷⁸. Este pequeño desajuste es el responsable de que la iluminación de las dobles-imágenes capturadas por la cámara del equipo, presenten una iluminación diferente (Figura 4.46).

Para reducir los efectos de este tipo de no homogeneidades en la iluminación, que repercuten en la determinación de los campos vectoriales (ver Capítulo 3, §3.3.3.6), es fundamental aplicar algoritmos de preprocesado de las imágenes para mejorar la precisión del método PIV. Para ello, se han aplicado una serie de filtros que se describen a continuación.

⁷⁸ En la Figura 3.22 se recoge un esquema de operación de las fuentes láser y como se alinean antes de entrar en el cristal doblador.

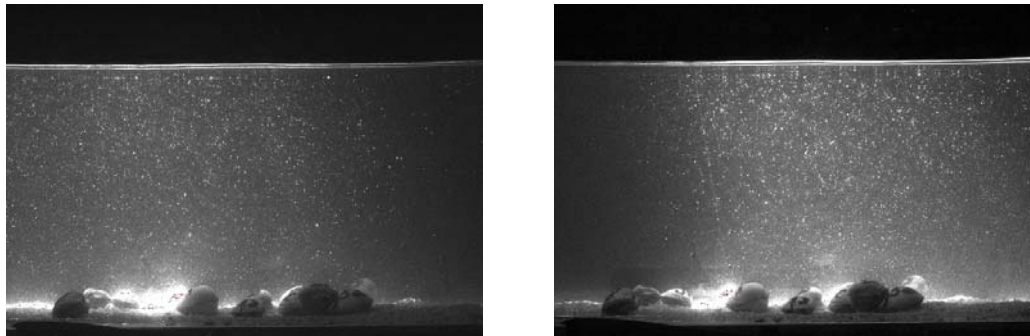


Figura 4.46. Ejemplo de imagen doble capturada con el equipo PIV. Se puede apreciar como un pequeño problema de alineación del láser provoca una iluminación diferenciada entre las dos imágenes. Este efecto se puede minimizar con técnicas de preprocesado de las imágenes.

En primer lugar, para eliminar el problema de la falta de homogeneidad en la intensidad de la imagen se aplicó un filtro de media móvil (*sliding background*). La media móvil funciona como un filtro de alta frecuencia, filtrando las grandes fluctuaciones del fondo y manteniendo las intensidades de pequeña amplitud (2-3 px) de las partículas (LaVision, 2007). Para que funcione correctamente, el radio de la media móvil debe ser al menos el doble del tamaño de la partícula. Para la configuración óptica del montaje experimental se ha empleado un radio de 8 a 16 px. Con la aplicación de este filtro se consiguen imágenes con una señal de fondo constante eliminando la falta de homogeneidad en la iluminación de la imagen, lo que redundará en una mejora de la correlación obtenida.

Después de aplicar este filtro, se ha utilizado un filtro para normalizar la intensidad de las partículas (*min/max filter*) de radio 6 px. De este modo, las partículas contribuyen de un modo más homogéneo a la correlación. Este filtro aplica una corrección local de la intensidad, mejorando el número de partículas reconocidas por el software, y por tanto el número de vectores válidos, cuando existen variaciones importantes en la intensidad de la luz (p.ej. presencia de partículas de diámetros no homogéneos o con diferente iluminación). De esta forma las partículas más pequeñas también contribuyen a la correlación (LaVision, 2007).

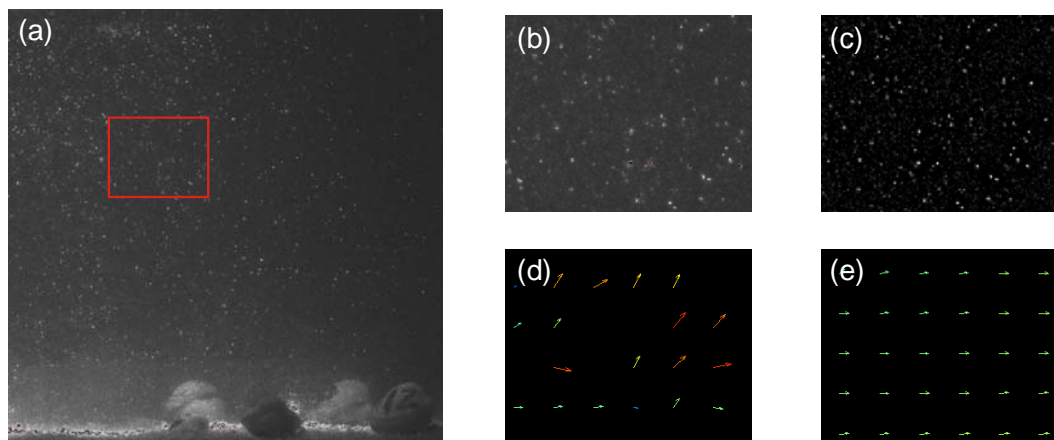


Figura 4.47. Ejemplo de aplicación del esquema de preprocesado a las imágenes: (a) y (b) imagen original, (c) imagen preprocesada, (d) y (e) campo de velocidades de la imagen original y de la procesada.

Gracias a la aplicación de este esquema de preprocesado, se ha mejorado notablemente el número de vectores válidos, como se puede ver en el ejemplo de la Figura 4.47.

Por tanto, con el preprocesado se incrementa la detección de vectores válidos obteniendo así campos vectoriales con mayor resolución, mayor SNR (Signal to Noise Ratio) y menor número de vectores espurios o anómalos. Este tipo de procedimientos, junto a otros como substracción de la imagen de fondo, se muestran muy efectivos en la reducción del ruido de fondo y en la mejora de la precisión y resolución espacial de la técnica PIV (Stanislas *et al.*, 2008).

Para el cálculo de los campos de velocidades se aplicó una máscara que redujo el área de cálculo a una zona cuadrada de $\sim 250 \times 160 \text{ mm}^2$, eliminando aquellas zonas sin flujo y zonas próximas a los bordes de la imagen. De este modo se pretendía reducir el tiempo de cálculo y además reducir los errores producidos por las aberraciones ópticas, mayores lejos del centro de la imagen (Raffel *et al.*, 2007).

Para transformar la imagen de la escala de píxeles a la escala del modelo físico se realizó una calibración empleando una plantilla formada por una malla de cruces de 8 mm separadas 20 mm (Figura 4.48). El procedimiento consistió en promediar 50 imágenes y al resultado se le aplicó una transformación bilineal. El RMS de la transformación fue de 0.21 px ($\sim 0.05 \text{ mm}$), valor inferior al mínimo recomendable establecido en $\sim 1 \text{ px}$ (LaVision, 2007).

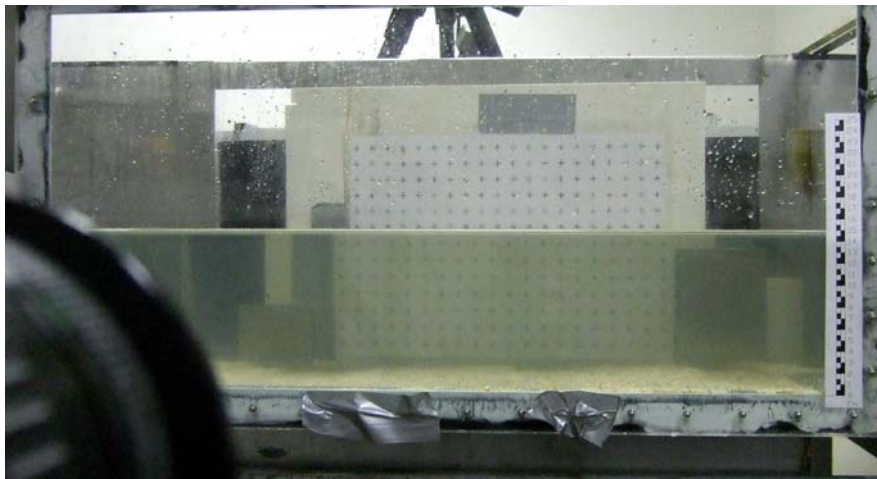


Figura 4.48. Plantilla empleada en el proceso de calibración del plano de medida con el equipo PIV. El objetivo de la cámara se ve en primer plano

La evaluación de las imágenes se realizó con un algoritmo de correlación cruzada con ventanas de interrogación de $32 \times 32 \text{ px}$ y 75% de overlap. Con objeto de mejorar la correlación se aplicaron las siguientes opciones del software Davis 7.2®:

- Función de promediado de la ventana de interrogación de tipo gaussiana redondeada. Las funciones de promediado permiten adaptar la forma de la ventana a las características del flujo. El software incluye otro tipo de funciones de promediado como ventanas elípticas con diferentes grados de excentricidad y dirección (para p.ej. adaptarse a un lecho con una fuerte pendiente), pero los mejores resultados ha sido proporcionado la función circular.

Con esta técnica se incrementa notablemente la precisión del método ya que detectan y localizan mejor las partículas (LaVision, 2007). La principal desventaja de este método es que incrementa el tiempo de cálculo notablemente.

- Algoritmo iterativo de tamaño de malla decreciente desde 128x128 a 32x32 px² con un solape, overlap, del 75%. De este modo se mejora la resolución espacial de los campos de vectores, con una malla resultante de ~2x2 mm. Para un solape del 50%, la malla tendría la mitad de detalle, unos ~4x4 mm.

Históricamente, en la literatura se había señalado que el empleo de solapes entre ventanas tan grandes (75%) podría provocar un incremento de los errores en la determinación de variables que involucren los gradientes de velocidades (p.ej. vorticidades o campos de deformaciones) debido fundamentalmente a un incremento de la correlación del ruido entre los puntos de análisis y a que prácticamente se emplean las mismas partículas para obtener las velocidades. En este tipo de aplicaciones el solape máximo recomendable era del 50 % (Willert, 2007).

Sin embargo, cuando los datos se procesan siguiendo la metodología del Doble Promediado para la determinación de parámetros como las velocidades y las tensiones tangenciales, es habitual emplear campos vectoriales con solapes del 75 % (p.ej. Coleman *et al.*, 2007a; Cameron *et al.*, 2008; Pokrajac *et al.*, 2008).

Esto es posible porque los nuevos métodos numéricos para obtener las derivadas espaciales están optimizados para funcionar con este solape tan elevado. (Raffel *et al.*, 2007). Además, como se ha comentado en el Capítulo 3, al emplear técnicas avanzadas de evaluación con ventanas de interrogación deformables es recomendable emplear un solape del 75%.

- Empleo de ventanas de interrogación deformables, con reconstrucción de la imagen por el método de Whittaker. Esta técnica mejora notablemente la correlación en flujos con altos gradientes y vorticidades. Para flujos con gradientes menos pronunciados la mejora es menor, aunque perceptible (Fincham y Delerce, 2000; Scarano, 2002).

A medida que se incrementa el número de operaciones realizadas para obtener un campo de velocidades, el tiempo de procesado se incrementa notablemente, ya que en total se procesaron más de 33000 imágenes (unos 66 juegos de 500 imágenes). Por este motivo, para reducir el tiempo de cálculo de las imágenes brutas (es decir, sin realizar ningún tipo de postprocesado o cálculo de magnitudes derivadas como medias, perfiles de velocidad, intensidades turbulentas, etc.) se intentó buscar un compromiso entre la mejora del campo de vectores y el tiempo de cálculo analizando la mejora en términos del RMS (Root Mean Square) de cada campo vectorial.

Se tantearon varias imágenes de diferentes ensayos y se analizó el RMS de cada imagen. Como recomendaciones para futuros usos del PIV, se puede señalar que para una imagen convencional, la no aplicación de los algoritmos de función de promediado gaussiano y de deformación de la imagen reducía los tiempos de cálculo en aproximadamente un factor de 3, sin embargo, el RMS de la imagen se incrementaba en un valor de casi el doble (0.10 a 0.18). Incrementar el número de iteraciones en el tamaño final de la ventana de interrogación, incrementa el tiempo linealmente con el número de iteraciones, pero el RMS apenas variaba (y si lo hacía era en la precisión del tercer o cuarto decimal), por lo que se optó por realizar una única iteración en este paso.

En los pasos iniciales, cuando la ventana va decreciendo de tamaño, se utilizó un solape del 50%, con ventanas de interrogación cuadradas. Este procedimiento apenas incrementa el tiempo de cálculo, y si proporciona información sobre el desplazamiento de las partículas que mejora la precisión del algoritmo de cálculo en la ventana de menor tamaño.

La eliminación de vectores o velocidades erróneas debe ser una parte del procedimiento de análisis de flujos turbulentos con cualquier tecnología experimental ya que, aunque la presencia de un porcentaje bajo de medidas incorrectas no afectan demasiado a la determinación de velocidades medias, si que lo hace cuando se estiman los momentos de orden superior como varianzas, kurtosis y demás estadísticos relacionados con la descripción de la turbulencia. Si en una zona del campo de velocidades, p. ej. por una reflexión o una mancha, aparecen sistemáticamente vectores espurios, el análisis estadístico del flujo revelará que esa zona un mayor nivel de ruido que se asociará, sino se trata adecuadamente, a un incremento de la varianza y por tanto, a un incremento de las tensiones tangenciales y energía turbulenta. Por tanto se puede decir que los datos con ruido generan una "turbulencia artificial".

Por este motivo, tras realizar el cálculo de los campos de velocidad, se realizó un postproceso consistente en la aplicación del filtro de mediana (*median filter*) con umbral para el RMS de 3. Este filtro, aplicado originalmente por Westerweel (1994) es el más empleado en la literatura para eliminar los vectores espurios. También se tanteó el filtro universal de Westerweel y Scarano (2005) que tiene como principal característica que no requiere la introducción de un umbral para realizar el procedimiento como en el caso del filtro de mediana.

Se programó este filtro en MATLAB © y se analizaron los resultados obtenidos con varios juegos de imágenes de prueba, obteniendo resultados similares a los del filtro de mediana original. Se consideró que el mayor tiempo de cálculo y el incremento de complejidad del procedimiento de postprocesado de las imágenes no justificaba su empleo.

Además de este procedimiento, en algunos casos ha sido necesario eliminar manualmente alguna zona de la imagen para evaluar las velocidades y resto de estadísticos de un modo correcto (ver apartado 4.4.2, Figura 4.60).

Por último, hay que señalar que el mayor reto del montaje experimental ha sido determinar los campos de velocidades en el entorno de los berberechos. Los principales problemas que han surgido son inherentes a cualquier experimento de PIV en el que se desee determinar el flujo muy cerca de un contorno fijo, o como en este caso, en algunas ocasiones móvil. A medida que nos acercamos al lecho, existen más problemas con el número de partículas (que se reduce), con las reflexiones del láser con el contorno, con el incremento del gradiente de velocidades y también, con el funcionamiento del esquema de evaluación de imágenes con los algoritmos de correlación cruzada (la ventana contiene información del contorno que también es evaluada).

A pesar de estos inconvenientes se han determinado en general buenos de campos de velocidades. Para ello se ha contado con las herramientas disponibles en la actualidad en el propio software comercial Davis© y también con códigos propios sencillos desarrollados en Matlab©. Las principales mejoras introducidas en la evaluación de las imágenes brutas han sido la aplicación de métodos de preprocesado, para homogeneizar la calidad de la imagen, la aplicación de métodos de evaluación avanzada, especialmente el promediado de las ventanas de interrogación con una función gaussiana que reducen el efecto de pérdida de señal cerca del lecho, y también con un procedimiento de postprocesado para eliminar vectores anómalos.

4.3.4. Campaña experimental

Para realizar los ensayos, inicialmente se pretendía recoger los moluscos en la zona de estudio para posteriormente analizarlos en las instalaciones del CITEEC. Sin embargo, y tras

varias conversaciones realizadas con técnicos del Centro de Investigaciones Mariñas de Corón, se decidió emplear berberecho de la ría de O Burgo por los siguientes motivos:

- La especie y características de los berberechos son iguales a los existentes en los Lombos do Ulla.
- La proximidad de la Playa de Santa Cristina (situada a escasos 10 minutos) al CITEEC reducía el estrés al que se somete a los berberechos.
- Se reducen los tiempos en los que berberecho está fuera de un hábitat adecuado y los costes de las campañas de campo.

Los berberechos fueron extraídos por miembros de la Cofradía de Pescadores de A Coruña en la zona libre de marisqueo de la Playa de Santa Cristina. En total fueron necesarias 8 extracciones en las que se recogieron una media de 100 individuos.

Una vez recolectados los berberechos se llevaron al CITEEC, donde se clasificaron con la ayuda de un calibre de 0.1 mm de precisión. En esta primera identificación únicamente se midió la dimensión mayor de los moluscos (la anchura c , ver Figura 4.56). Tras tomar nota de esta dimensión, los berberechos se numeraron pintándolos con laca de uñas. Una vez que la pintura estaba fijada se introdujeron en el acuario durante un periodo de aclimatación de unas 24 horas, previo a la realización de los ensayos.

Hay que señalar que inicialmente se tantearon otros métodos para seguir la evolución de los berberechos en el canal. Se realizaron algunos ensayos previos marcando los berberechos con códigos de colores haciendo además videos cenitales, ver Figura 4.49, para intentar realizar el seguimiento automático del movimiento de los mismos mediante técnicas de inteligencia artificial.

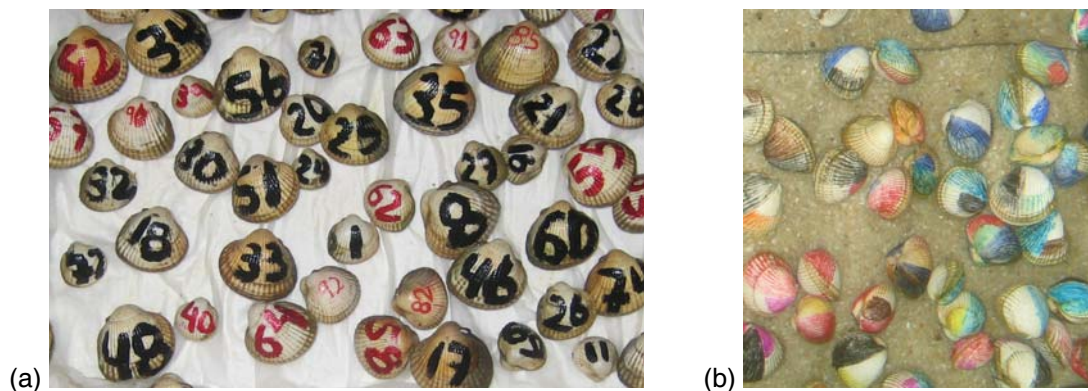


Figura 4.49. Ejemplo de marcado de los berberechos (a) con laca de uñas y (b) con código de colores.

Esta metodología está siendo empleada con éxito en el seguimiento del remonte de peces en una escala en el Laboratorio del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, en un proyecto dirigido por el profesor Jerónimo Puertas. Sin embargo, para el caso de los berberechos el seguimiento automático se complica demasiado. Además, existirían interacciones entre el equipo PIV y la instrumentación dedicada al seguimiento de los berberechos. En definitiva, aunque no es imposible emplear este tipo de técnicas en ensayos de arrastre de berberechos similares a los realizados, el desarrollo y validación de esta técnica se alejaba bastante de los objetivos de esta tesis doctoral, por lo que los resultados de los ensayos previos fueron desechados, y este procedimiento fue abandonado.

Durante los experimentos los berberechos fueron alimentados con *Tetraselmis suecica*, una de las especies de microalgas más empleadas para satisfacer las necesidades alimenticias de los bivalvos en laboratorio debido a su elevado contenido proteico.

El cultivo del fitoplancton fue realizado en las instalaciones del Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ciencias de la UDC por Eva Martín, bióloga contratada a cargo del proyecto de investigación del Ministerio de Medio Ambiente. El *Tetraselmis suecica* se cultivó en botellones como los de la Figura 4.50 en una cámara en condiciones de iluminación de $68.25 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ en ciclos de luz-oscuridad de 12:12 h a 18°C . Los cultivos se mantuvieron en medio enriquecido ALGAL1 aireado con una mezcla enriquecida con CO_2 . Este es el procedimiento habitual de cultivo recogido en la bibliografía (ver p.ej. Souto *et al.*, 2008).

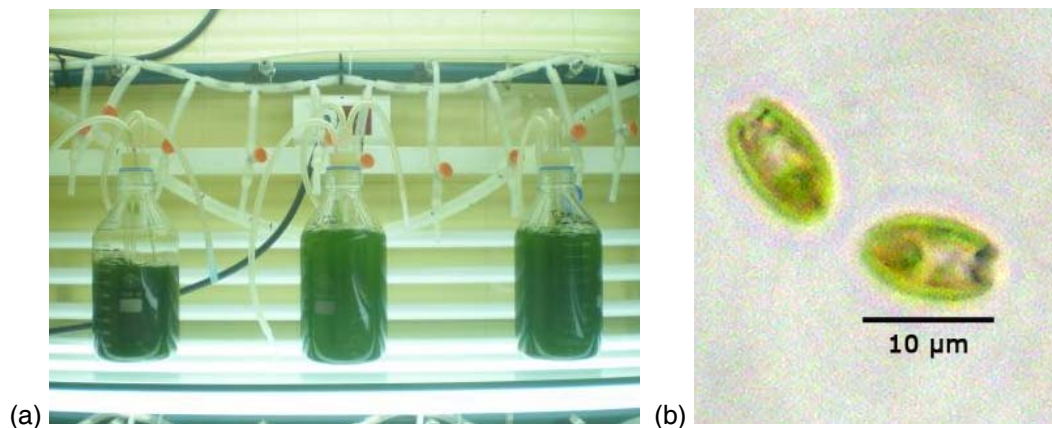


Figura 4.50. (a) Cultivo de *Tetraselmis suecica* en el laboratorio de microbiología de la UDC, y (b) vista a microscopio del microalga.

El objetivo del cultivo era el de mantener una población de unos 100 berberechos durante un periodo de tiempo no superior a una semana. Siguiendo las recomendaciones de Jose Villalba del CIMA, la dosis diaria para alimentar a los bivalvos se fijó en un 3-6% del peso seco del molusco.

El peso seco de los berberechos se estimó a partir de los trabajos de González y Pérez (1984a, b) realizados en la ría de Arousa. Adoptando un tamaño medio de 28 mm, el peso seco de un molusco es de $\sim 0.372 \text{ g}$. El peso seco de *Tetraselmis* para las concentraciones del cultivo se estimó en laboratorio en $\sim 767 \pm 23 \mu\text{g}/\text{mL}$ de cultivo. De este modo se pudo estimar el volumen de cultivo diario necesario para mantener con vida a los moluscos.

Antes de la realización de los ensayos los berberechos fueron precondicionados durante 24 horas en el acuario de agua marina a una temperatura de 14°C , con la misma salinidad que la del canal de ensayo, $\sim 34.5 \text{ ‰}$, en la escala práctica de salinidades (UNESCO, 1981).

En total se analizaron 144 escenarios: los 4 grupos de tallas y las 2 poblaciones con distribución de tamaños no uniforme, cada una con dos grados de reclutamiento, sometidas a 6 velocidades y con los berberechos vivos y muertos. Cada grupo de berberechos fue ensayado un máximo de 4 días consecutivos. Al finalizar los ensayos con los berberechos vivos, los individuos se introdujeron en una solución de formol al 1% para realizar posteriormente los mismos escenarios con los individuos muertos.

Entre los ensayos con los moluscos vivos y muertos, y también cuando se procedió a cambiar el motor, se realizó una limpieza del canal. Para facilitar esta labor, los deflectores fueron retirados. Las pequeñas diferencias en las alineaciones de estas piezas se consideran

responsables de pequeños cambios en la estructura del flujo. Estas modificaciones se han percibido en las distribuciones de tensiones e intensidades turbulentas determinadas experimentalmente con el equipo PIV y se mostrarán posteriormente.

Una vez terminados los experimentos, cada individuo fue pesado y medido para determinar los parámetros geométricos característicos de los berberechos (diámetro medio, factor de forma, densidad de la concha). La metodología empleada es la misma que la recogida en otros trabajos similares (Amos *et al.*, 2000; Thompson y Amos, 2002; Peña *et al.*, 2008) y se describe en el apartado 4.4.1.

4.3.4.1. Ensayos por grupos de tamaños

Los berberechos se clasificaron por tamaños en 4 grupos: 15-20 mm, 20-25 mm, 25-30 mm y de 30 a 35 mm. El diámetro medio de cada talla y el coeficiente de gradación se señalan en la distribución por tamaños de la Figura 4.51. El tamaño representativo empleado para definir los grupos ha sido la anchura del molusco *c*. Se ha empleado esta dimensión porque es fácil de determinar y además, como se verá en el apartado 4.4.1, se correlaciona muy bien el resto de dimensiones y parámetros geométricos del bivalvo.

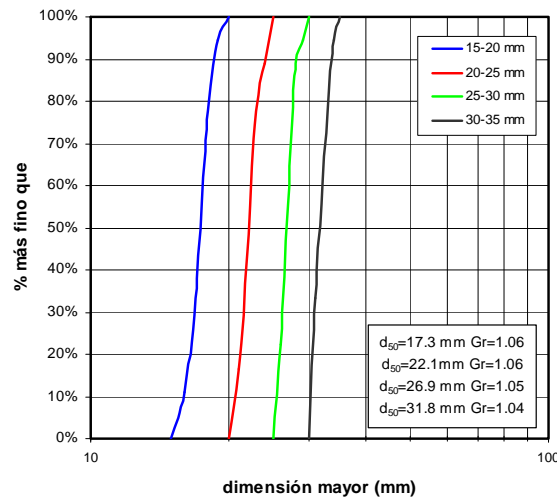


Figura 4.51. Distribución de tamaños de los grupos de berberechos empleados en el ensayo de tallas.

Para el análisis del arrastre de cada grupo, los berberechos se situaron en celdas de 15 x 12 cm, con el lado más largo en la dirección de la corriente. Con esta disposición se podían introducir en el canal 3 grupos simultáneamente, ver la Figura 4.52(a), por lo que en cada ensayo se consiguió analizar simultáneamente un total de 3 tallas.

Antes de comenzar cada ensayo se niveló la arena. Después, los berberechos fueron colocados a mano sobre el lecho de forma aleatoria. Una vez colocados, y tras esperar 5 minutos para que se acomodasen, se activaba el motor y se mantenían las velocidades durante un periodo de 5 minutos.

Una vez finalizado el tiempo de ensayo, se detenía el motor y se procedía a contar los moluscos arrastrados fuera del área de análisis. Hay que señalar que el modo de movilización de berberechos es por saltación y también arrastre. En las diferentes repeticiones de los escenarios, el mismo grupo de moluscos se analizó en diferentes recintos para minimizar los efectos de la variación de velocidades a lo largo de la sección transversal del canal.

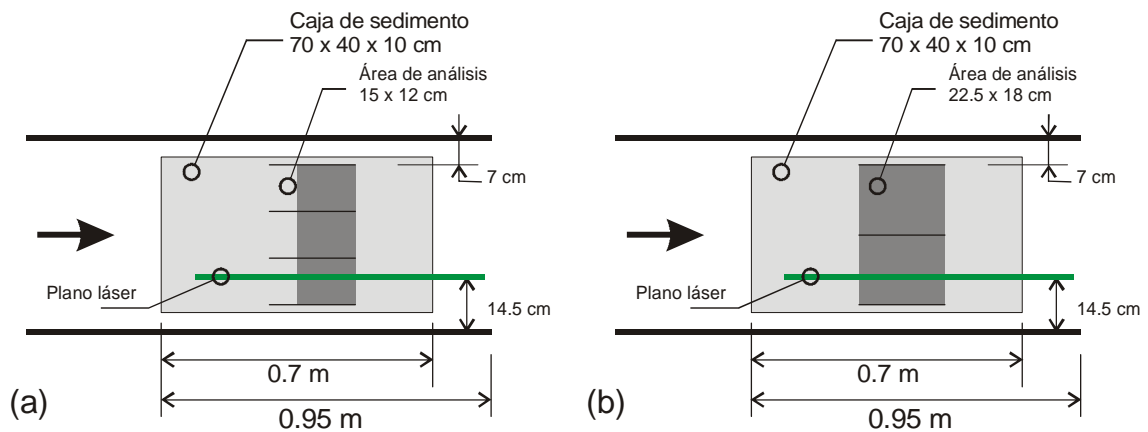


Figura 4.52. Configuración geométrica de los ensayos: (a) ensayos por grupos de tamaño y (b) ensayos de poblaciones.

Es importante señalar que la duración de estos ensayos es inferior a la de otros ensayos recogidos en la literatura, realizados siempre con moluscos mucho más pequeños, en fases larvaria e incluso juvenil. Por ejemplo, Hunt (2004), ensayó juveniles de dos especies de almeja (de ~1 a ~5 mm) con velocidades de ~27 y ~36 cm/s durante 50 minutos. St-Onge y Miron (2007) ensayaron también almejas de hasta 20 mm en un canal de recirculación durante 60 minutos. Estos autores comenzaban los experimentos con los moluscos previamente enterrados. En varios trabajos dirigidos por de Montadouin (de Montadouin y Bachelet, 1996; de Montadouin, 1997; de Montadouin *et al.*, 2003), juveniles de berberechos fueron sometidos a ciclos de 4 horas de velocidad constante.

En este trabajo se consideró adecuado realizar experimentos de menor duración porque tras varios ensayos previos de larga duración (hasta 50 minutos), se constató que para intervalos de ensayo mayores a los 5 minutos (hasta 30 minutos), el porcentaje de berberechos movilizados era igual (en la mayoría de los casos) o ligeramente superior al movilizado durante los primeros 5 minutos de ensayo. Además, reduciendo la duración de cada ensayo, se consiguió realizar un número mayor de ensayos.

4.3.4.2. Ensayos de poblaciones estacionales

El objetivo de estos ensayos fue el de analizar la influencia de la distribución de tamaños en la movilización de los berberechos. Para ello, se ensayaron dos poblaciones de berberechos con dos tamaños predominantes bien diferenciados: uno centrado en el grupo de 19 a 22 mm el otro en el de los 26 a 28 mm. Las características de la distribución de tamaños de las poblaciones analizadas se presentan en la Figura 4.53, y pretenden reflejar la variabilidad del berberecho en la zona estudio analizada, representado la primera distribución una población tipo de Septiembre y la segunda una distribución tipo de Abril. Sin embargo, y debido a la dificultad de extraer berberechos inferiores a 18 mm en un número suficiente, la población de Septiembre es un poco más vieja que la cabría esperar en esta época, como se puede comprobar en la Figura 4.40, extraída de los datos recogidos por Parada *et al.*, (2006).

El diámetro (anchura c) medio de la población de otoño es de ~20.9 mm, mientras que el diámetro medio de la población de Abril es de ~24.3 mm. Los coeficientes de gradación ($Gr = 0.5(d_{84} / d_{50} + d_{50} / d_{16})$) para estas poblaciones son de 1.2 y 1.3 respectivamente, por lo que si se analizan como muestras de sedimentos se podría concluir que son bastante

uniformes ($Gr < 3$). Sin embargo, al compararlos con una granulometría de los grupos por tamaños (representados en la Figura 4.51), se observa que en estos últimos la granulometría es más uniforme, con un coeficiente de gradación medio para los cuatro grupos de $\sim 1.04 \pm 0.01$.

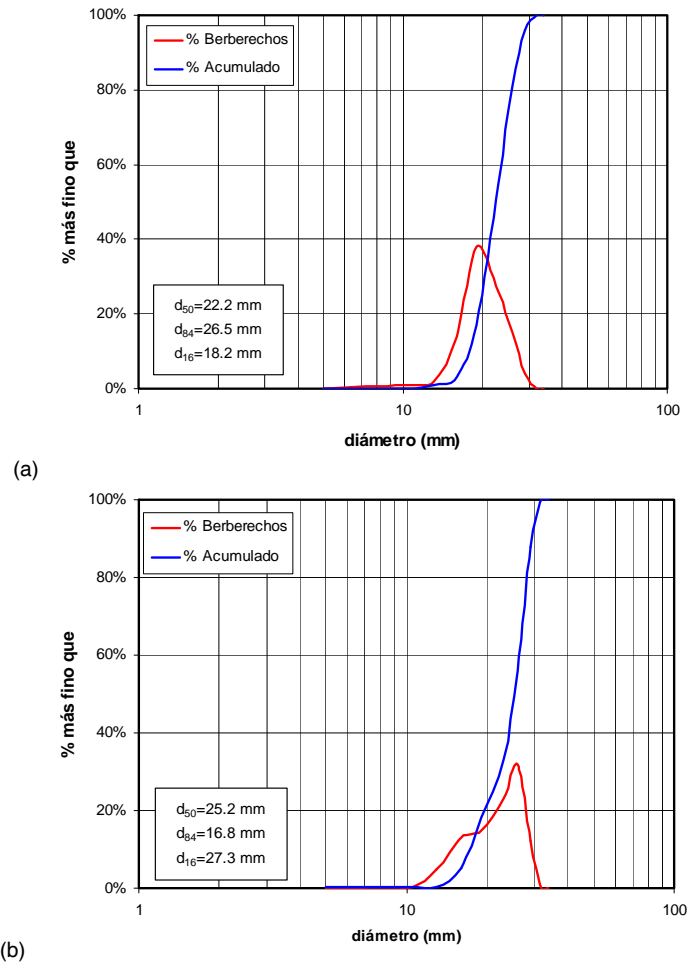


Figura 4.53. Distribución por tamaños de los grupos de berberechos analizados en los ensayos estacionales (a) otoño y (b) primavera.

En este bloque de experimentos se analizaron 6 velocidades x 2 reclutamientos x 2 distribuciones de tamaños, realizando 3 repeticiones y analizando la población con berberechos vivos y muertos. De este modo queda un total de 120 escenarios diferentes. Hay que señalar que debido a una avería del equipo PIV, el registro de las velocidades en los escenarios con las 3 velocidades más bajas para el grupo de berberechos de mayor tamaño no pudo realizarse. Sin embargo, si que fueron determinados los porcentajes de bivalvos movilizados.

Como en el caso anterior, antes de comenzar cada ensayo se niveló la arena. Después, los berberechos fueron colocados a mano sobre el lecho de forma aleatoria. Las parcelas donde se ubicaron los berberechos en este ensayo fueron de 22.5 x 18 cm, con la dirección más larga en la dirección de la corriente (Figura 4.53). Una vez colocados, y tras esperar 5 minutos, se activaba el motor y se mantenían las velocidades durante un periodo de 10 minutos.

Como en los ensayos de grupos de tamaños homogéneos (apartado 4.3.4.1), para seleccionar la duración del ensayo se realizaron una serie de ensayos previos de mayor duración donde se constató que para intervalos de ensayo mayores a los 10 minutos, el porcentaje de berberechos movilizados era igual (en la mayoría de los casos) o ligeramente superior al movilizado durante los primeros 10 minutos de ensayo.

Una vez terminado el ensayo, se detenía el motor y se contabilizaron los berberechos arrastrados de cada uno de los grupos analizados. En las diferentes repeticiones de los escenarios, el mismo grupo de moluscos se analizó en diferentes recintos para minimizar los efectos de la variación de velocidades a lo largo de la sección transversal del canal.

4.3.5. Análisis hidrodinámico

Para el análisis de los campos de velocidades y de los perfiles de intensidades turbulentas y tensiones tangenciales, se ha empleado la Metodología del Doble Promediado o DAM (Double Averaged Methodology), explicada en el Capítulo 2. Esta metodología es especialmente útil cuando se trabaja en flujos sobre lechos rugosos, como el que se analiza en este trabajo, y, como se ha comentado ya, ha sido aplicada en otras aplicaciones de ingeniería como flujos atmosféricos, flujos de aire sobre masas de árboles u otras superficies rugosas (p.ej. edificaciones), flujos hidráulicamente rugosos, e incluso flujos subsuperficiales (Nikora y Rowinski, 2008).

Una de las aportaciones más importantes de esta metodología es que elimina la incertidumbre de la posición del plano $z=0$ en lechos rugosos ya que éste se define en términos de la función de rugosidad de fondo $\phi_s(z)$. Otra ventaja, ya señalada, es que permite analizar las leyes de velocidades y de distribuciones de tensiones tangenciales para flujos sobre lechos heterogéneos.

De un modo resumido⁷⁹, se puede indicar que esta metodología se basa en promediar las ecuaciones de Reynolds en un volumen o superficie de control. El procedimiento de promediado se basa en descomponer las variables promediadas temporalmente en su componente de media y fluctuación espacial de manera que la media temporal cualquier variable hidrodinámica θ_i se puede escribir como:

$$\bar{\theta}_i = \langle \bar{\theta}_i \rangle + \tilde{\theta}_i \quad (4.17)$$

donde los paréntesis angulares denotan promedio espacial, la barra superior promedio temporal y la tilde fluctuación espacial (Nikora *et al.*, 2007). Esta descomposición es similar a la descomposición de Reynolds de las variables instantáneas en su promedio temporal y en la componente de fluctuación, $\theta_i = \bar{\theta}_i + \theta_i'$.

Aplicando esta metodología para determinar el perfil de velocidades, se pueden definir dos tipos de promediados en función del operador empleado: la media superficial y la media intrínseca. Para el análisis de flujos hidráulicamente rugosos, es más correcto emplear la media

⁷⁹ En este apartado se aplicará un procedimiento de promediado tiempo-espacio para superficies y se recordarán únicamente las principales ecuaciones de la metodología aplicadas en el análisis de los datos de los ensayos de arrastre de berberechos. En el Capítulo 2, apartados 2, 3 y 4, se han tratado en profundidad las bases de la metodología DAM, los perfiles de velocidades y de tensiones tangenciales respectivamente.

intrínseca⁸⁰ (Nikora *et al.*, 2007). La velocidad horizontal u intrínseca doblemente promediada se puede definir como (ver p.ej. en Mignot *et al.*, 2009):

$$\langle \bar{U}(\mathbf{x}, t) \rangle = \frac{1}{A_f} \iint_{A_f} \bar{U}(\mathbf{x} + \mathbf{r}, t) dS \quad (4.18)$$

donde A_f es el área ocupada por el fluido a una cota determinada z (nótese que $A_f=1$ por encima del nivel de las crestas del lecho z_c), siendo A_0 la superficie total donde se realiza el promediado para esa misma cota z ; \mathbf{r} es un vector de posición que describe el valor de A_f en el entorno de un punto con coordenadas \mathbf{x} y dS es un elemento diferencial de área.

Para cada uno de los ensayos se ha determinado el perfil de velocidades doblemente promediado, y a partir de éste, se ha calculado la velocidad de corte ajustando la siguiente ley logarítmica de velocidades en el tramo situado sobre las crestas del lecho y hasta una altura inferior a $\sim 0.2 \cdot h$:

$$\langle \bar{U}(z) \rangle = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z+d}{z_0} \quad (4.19)$$

Donde $\langle \bar{U}(z) \rangle$ es la velocidad horizontal doblemente promediada a la cota z , u_* es la velocidad de corte, κ es la constante de Von Kármán (~ 0.41), z_0 es la rugosidad característica de la ley logarítmica y d es la altura del plano de desplazamiento nulo (ver con detalle en el apartado 2.3.2.2. del Capítulo 2).

La ecuación (4.19) se empleó para estimar la velocidad de corte y la rugosidad característica de la ley logarítmica en los ensayos con berberechos (§4.4.3.2 y §4.4.4.2). El origen geométrico de las coordenadas $z=0$ se ha tomado como el plano definido por el valor donde la función de rugosidad de fondo $\phi_s(z)=0.5$, es decir, la cota media del fondo z_m .

Hay que señalar que la ecuación anterior es válida únicamente para régimen hidráulico rugoso⁸¹, y que es equivalente a:

$$\langle \bar{U}^+ \rangle = \frac{\langle \bar{U}(z) \rangle}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z+d}{k_s} + B_r \quad (4.20)$$

donde k_s es la rugosidad equivalente de Nikuradse y B_r es una constante que se establece en 8.5 ± 0.2 (Song, 1994). Para este valor de B_r la ecuación se puede reescribir como (García, 2006):

$$\langle \bar{U}^+ \rangle = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{30(z+d)}{k_s} \quad (4.21)$$

La expresión de de la ley logarítmica de velocidades de la ecuación (4.20) fue utilizada en la determinación de la velocidad de corte en el análisis del lecho liso, sin berberechos (§4.4.2). En

⁸⁰ El operador superficial (Cap. 2, ecuación 2.17) promedia la variable hidrodinámica sobre todo el volumen o superficie de control, mientras que el operador intrínseco promedia la variable sobre el volumen de huecos (ver ecuación 2.17).

⁸¹ Recordemos que el flujo es hidráulicamente rugoso cuando $k_s^+ = k_s u_* / \nu > 70$ (ver Capítulo 2, ecuación 2.13).

este caso, se ha empleado un valor de $d = 0.2 \cdot d_{50} \sim 0.5$ mm, que está en el rango habitual encontrado en la literatura, situado entre $0.15 - 0.3 d_{50}$ (Nezu y Nakagawa, 1993).

El valor de la rugosidad equivalente de Nikuradse se ha establecido en $2 \cdot d_{50}$ (Schlichting, 1979). Valores habituales sitúan a k_s entre 1 y 3 veces el diámetro medio del sedimento (Bigillon *et al.*, 2006; Rodríguez y García, 2008). No existe un consenso claro sobre qué valor emplear ya que el rango de variación es bastante importante especialmente para arenas gruesas y gravas, como se puede ver p.ej. en el capítulo 6 de Julien (1994), donde se pueden encontrar más valores y referencias.

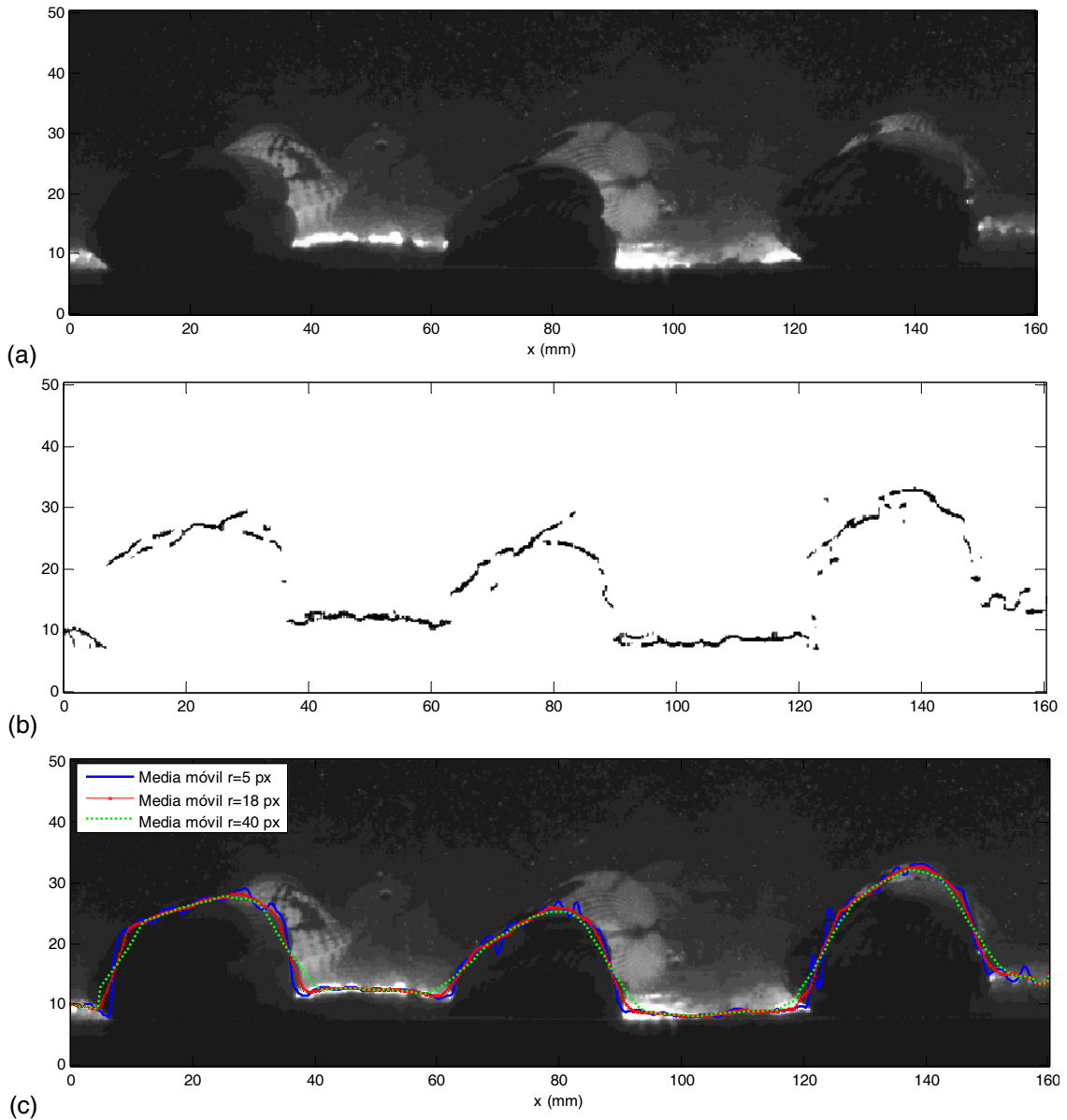


Figura 4.54. Ejemplo de aplicación del algoritmo de detección de fondo con filtros de media móvil de diferente radio. En (a) se presenta la media de 25 imágenes tomadas con PIV, en (b) el resultado la determinación de la posición de mayor gradiente de intensidades y en (c) la posición del fondo filtrada y superpuesta sobre la imagen original.

Para la estimación del perfil y la función de rugosidad de fondo, determinado por la arena y los berberechos, se ha desarrollado una subrutina para detectar los valores máximos del gradiente de intensidades de las imágenes capturadas con el PIV. En la Figura 4.54 se presenta un ejemplo de aplicación del código elaborado para la detección del fondo.

Este código programado en Matlab®, promedia inicialmente una serie de unas 25 imágenes, le aplica un filtro de mediana a la imagen resultante y después calcula el gradiente de intensidades.

Estos procedimientos de preprocesado tienen por objeto mejorar la precisión del algoritmo de detección eliminando la influencia de partículas y reflejos que afectan a imágenes individuales. La ventaja de utilizar un filtro de mediana es que mantiene los contornos de la imagen y no los suaviza, como otro tipo de filtros como el de media móvil (González *et al.*, 2009).

Una vez determinada la posición del punto, o puntos, de intensidad máxima en cada columna, la subrutina estima la posición del fondo en esa columna a partir de la media de los puntos que tienen una intensidad superior a un umbral, que por defecto se estableció en el 95% de la intensidad máxima de cada columna, ver Figura 4.54 (b).

Una vez obtenido este mapa de intensidades, se realiza un nuevo suavizado con una media móvil de varios píxeles (px) de radio, para eliminar el ruido de alta frecuencia. Tras varios tanteos, se empleó una media móvil de 18 px de radio (unos 4.5 mm), buscando un compromiso entre la reducción de señal de alta frecuencia (el suavizado) y la eliminación de los contornos de los moluscos (Figura 4.54 (c))

La posición del fondo así determinada se empleó para estimar la función de rugosidad de fondo, calculada como la función de distribución de probabilidad acumulada (Nikora *et al.*, 2001), y también para eliminar de los campos vectoriales todos aquellos vectores erróneos situados por debajo de este nivel, como se puede apreciar en la Figura 4.55. A pesar de todo, en algunos ensayos, el código de detección de la posición del fondo no funcionó correctamente por lo que se tuvo que recurrir a una máscara manual con una poligonal para definir la posición del fondo.

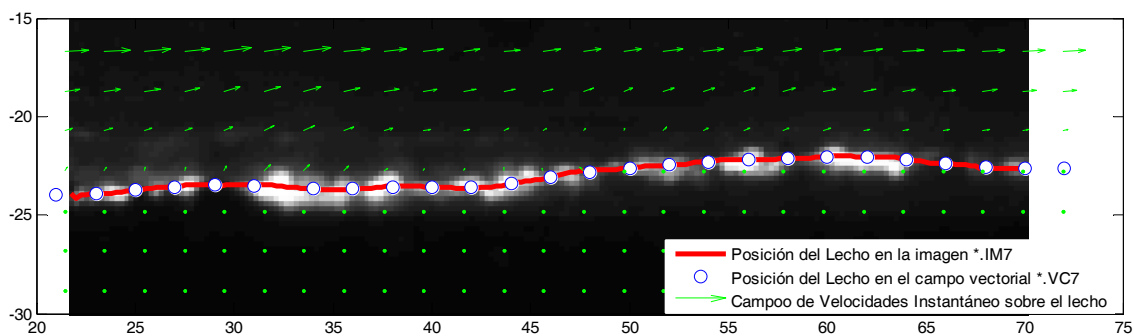


Figura 4.55. Ejemplo de aplicación de la máscara de fondo a un campo de velocidades instantáneo del ensayo de determinación de velocidades sobre lecho de arena.

Para importar y trabajar con los archivos de imagen (*.im7) y con los campos vectoriales (*.vc7) del software Davis © del equipo PIV se han empleado las bibliotecas readimx, desarrollada por Lavision (www.lavision.de) y la Toolbox de Matlab® MATPIV desarrollada por Frederic Moisy (<http://www.fast.u-psud.fr/pivmat>).

A partir de los campos de velocidades se han determinado los perfiles de intensidades turbulentas doblemente promediados $\langle \overline{u'^2} \rangle^{0.5}$ y $\langle \overline{w'^2} \rangle^{0.5}$, los perfiles promediados espacialmente de las intensidades turbulentas de forma $\langle \tilde{u}^2 \rangle^{0.5}$ y $\langle \tilde{w}^2 \rangle^{0.5}$ así como las tensiones tangenciales doblemente promediadas de Reynolds, de forma y totales. También se ha obtenido la velocidad de corte a partir del análisis del perfil de fluctuaciones $-\langle \overline{u'w'} \rangle$ o tensiones de Reynolds, y a partir de la suma de las tensiones de Reynolds y de forma $-\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$. El tramo lineal del perfil de tensiones tangenciales se ha prolongado hasta la altura correspondiente a la cota de las crestas de lecho z_c , siguiendo los procedimientos recogidos en la literatura (ver Cap. 2, apartado 2.4 y p.ej. Pokrajac *et al.*, 2006; Aberle *et al.*, 2008; Cameron *et al.*, 2008).

La velocidad de corte u_{*log} , estimada a partir del análisis de velocidades, se ha empleado como la escala característica para el análisis de los perfiles de velocidad. Para el análisis de los perfiles de intensidades turbulentas y tensiones tangenciales se puede emplear la velocidad de fricción u_{*uw} , estimada a partir de las tensiones tangenciales, como velocidad característica (ver p.ej. Nezu y Rodi, 1986; Bigillon *et al.*, 2006). Con esta metodología, la velocidad de fricción se estima extrapolando el tramo lineal del perfil de tensiones de Reynolds, tomando los datos entre $0.7\cdot H$ y $0.2\cdot H$, donde la contribución de los efectos viscosos y la presencia de la lámina libre son efectos despreciables (ver este y otros métodos de determinación de la velocidad de fricción en el apartado 2.4.5 del Capítulo 2).

Sin embargo, en este trabajo se ha decidido emplear como velocidad de corte característica u_{*log} ya que en sentido estricto, la velocidad de corte determinada a partir de la extrapolación las tensiones de Reynolds (o tensiones de Reynolds y de forma), sólo es válida para flujos bidimensionales. En los flujos con corrientes secundarias o en flujos no uniformes o no permanentes (Capítulo 2, §2.4.2, §2.4.3 y §2.4.4), aparecen más contribuciones en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y las tensiones tangenciales dejan de ser lineales.

4.3.6. Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico tiene como objetivo determinar cuales son las variables (velocidad del flujo, tamaño, reclutamiento y estado del berberecho), así como las interacciones entre las mismas, que afectan significativamente al porcentaje de moluscos erosionados. Para realizar este tipo de análisis se deben emplear una serie de herramientas y tests estadísticos, que aunque son habituales en la biología y ecología en general, y en la marina en particular, no lo son tanto en ingeniería hidráulica.

Las herramientas aquí empleadas se basan en el contraste de hipótesis y se emplean para analizar si dos o más grupos (niveles) de una determinada variable (factor) afectan al valor medio de la variable respuesta analizada. Así, en el ejemplo que manejamos, nos interesa saber si el porcentaje de berberechos movilizados está afectado por el estado de los moluscos (es decir, si son importantes efectos de comportamiento como p.ej. el enterramiento o la generación de biso).

Para realizar este análisis desde un punto de vista estadístico, se podría emplear p.ej. un contraste t de Student⁸² (t-test) para diferencias de la media de los dos niveles del factor estudiado (vivo o muerto). En este contraste de hipótesis se definiría la hipótesis nula, las medias son iguales, y se analizaría con ayuda del estadístico t si el contraste se acepta o se rechaza, en el ejemplo esto indicaría que existen diferencias en la movilización por el factor estado, para un nivel de significación alfa determinado (habitualmente $\alpha=0.05$).

Cuando lo que queremos es comparar tres o más grupos empleando el contraste t , debemos realizar el contraste por parejas. Este procedimiento, además de tedioso, tiene un gran inconveniente ya que la probabilidad de cometer un error de Tipo I⁸³ se amplifica a medida que se incrementa el número de grupos a analizar.

Así, si queremos analizar 3 grupos A, B y C, debemos realizar el contraste de los pares A-B, A-C y B-C, por lo que la probabilidad de rechazar el contraste cuando en realidad es correcto (por definición error de Tipo I) es de un 14.3% ($1-0.95 \cdot 0.95 \cdot 0.95$). Cuando existe cuatro grupos, debemos contrastar 6 pares, por lo que la probabilidad se incrementa hasta un 26.5%⁸⁴. Para 10 grupos la probabilidad es de un 90%.

Para estos casos se debe emplear otra herramienta denominada Análisis de la Varianza, o ANOVA (ANalysis Of VAriance). El ANOVA es un método estadístico que permite realizar este tipo de test de comparación de varios grupos en un único paso. El análisis de la varianza fue introducida por Fisher⁸⁵ en los años 20 (1920) como una herramienta para el diseño experimental basada en métodos estadísticos, en un primer momento como aplicación a investigaciones agronómicas (Sahai y Ageel, 2000). En 1935 el libro *The Design of Experiments* (Fisher, 1935), que a la postre se convertiría en un libro clásico sobre estadística, fue el que expuso de forma pionera los principios y procedimientos del diseño experimental con las aplicaciones del método ANOVA a una gran cantidad de ejemplos.

Como el contraste t de Student, el ANOVA es un test paramétrico en el que se asumen las siguientes hipótesis (ver p.ej. en Underwood, 1981):

- Los datos del análisis son realizaciones posibles de la población analizada que siguen una distribución normal de media μ y varianza σ_i^2 .
- Las varianzas de los diferentes grupos analizados son iguales (o al menos similares)
- Cada grupo analizado es muestreado de forma independiente

⁸² El estadístico t fue introducido por Willian S. Gosset: * 1876, Canterbury (UK); † 1937, Beaconsfield (UK). Gosset firmó su trabajo en *Biometrika* en 1908 con el alias de Student, ya que derivó el t -test para poder comparar de forma económica la potencialidad y calidad de varios tipos de cebada para elaborar la cerveza Guinness, y la empresa le obligó a usar un alias para no desvelar secretos de la marca Box, J.F. (1987). "*Guinness, Gosset, Fisher, and small samples.*" *Statistical Science* 2(1): 45-52.

⁸³ En un contraste de hipótesis se define como un error de Tipo I (α) a la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando en realidad es correcta. El error de Tipo II ($1-\beta$) o potencia estadística se define como la probabilidad de retener la hipótesis nula cuando en realidad es falsa.

⁸⁴ La probabilidad de cometer al menos un error de tipo I en este contraste viene dada por la probabilidad de la fórmula binomial $P=1-(1-\alpha)^k$, donde k es el número de pares a contrastar que no se calcula como el número combinatorio de n grupos tomados de 2 en dos, es decir $n! / ((n-2)!2!)$

⁸⁵ Ronald A. Fisher: * 1890, East Finchley, Londres (UK); † 1962, Adelaida (AUS)

De la importancia del cumplimiento de estas hipótesis, así como del desarrollo del modelo general de análisis de la varianza, se da buena cuenta en el Apéndice 2 de esta tesis. Se ha considerado importante incluir este Apéndice ya que este tipo de análisis cuenta con una jerga específica, y aunque su uso está bastante proliferado en la industria, en las ciencias biológicas, de la salud y sociales, en las aplicaciones de Ingeniería Hidráulica no son tan habituales.

El ANOVA permite determinar si la media de la variable dependiente analizada, en nuestro caso el porcentaje de berberechos movilizados, es igual para todos los niveles o grupos del factor o factores analizados. En este trabajo, un factor podría ser el estado del berberecho y sus niveles serían "vivos" y "muertos". Para ello se realiza un contraste de hipótesis donde la hipótesis nula, todas las medias son iguales, se comprueba a partir del estadístico F , similar al estadístico t de los test de Student. El estadístico F se compara con el valor de la función F de Fisher-Snedecor de una cola para un nivel de significación determinado y los grados de libertad del problema.

Si con el análisis se determina que los efectos son despreciables, es decir, se acepta el contraste de hipótesis, el problema se termina en este punto. Sin embargo, si la hipótesis nula se rechaza, todavía tenemos que averiguar cuál de los niveles afecta a la media. Es decir, necesitamos construir o determinar la hipótesis alternativa.

Por ejemplo, si analizásemos la bondad de varios medicamentos para un tipo de enfermedad, podríamos determinar sobre una población que algún tratamiento afecta (cura) dicha enfermedad. Para saber cual de ellos funciona, o en que medida lo hace, será necesario realizar algún test *a posteriori* (*post hoc* test).

En investigaciones marinas, y experimentos biológicos en general, con este fin se aplican los test de Tukey (1951), Scheffé (1953), aunque quizás es el test secuencial de Student-Newman-Keuls (SNK) el más empleado (ver p.ej. en Underwood, 1997). Otros test que se encuentran codificados habitualmente en los paquetes estadísticos más comunes son el test LSD de Fisher, el test de Bonferroni, el test de Duncan o el de Dunnett. Para los casos en los que las muestras tengan diferente tamaño (p.ej. número de repeticiones) o varianzas desiguales se podrán aplicar otros test como el de Tukey-Kramer o Games-Howell, respectivamente (Sahai y Ageel, 2000).

En aplicaciones ecológicas los test *post hoc* más empleados son los de Student-Newman-Keuls y el test de Duncan. Es paradójico que estos contrastes, son quizás los más criticados por los estadísticos, siendo el test de Duncan el que cuenta con un mayor consenso como contraste desaconsejado (Day y Quinn, 1989).

El principal problema que se le achaca al test SNK es que la probabilidad de cometer un error de Tipo I es alta, especialmente cuando los resultados agrupan a los diferentes tratamientos en grupos⁸⁶. En estas circunstancias, se pueden detectar diferencias significativas entre varios tratamientos cuando en realidad no lo son (Snedecor y Cochran, 1989).

⁸⁶ Esto sucede cuando las medias analizadas forman grupos. Por ejemplo, si analizásemos el efecto del tipo de vegetación sobre la rugosidad de un lecho de un río con 5 tipos de vegetación, se podrían formar 3 grupos donde las medias son significativas, digamos de rugosidad baja, media y alta, con p.ej. 2, 1 y 2 tipos de vegetación en cada grupo. Un ejemplo de medias agrupadas se puede encontrar en la pág. 239 de Underwood, A.J. (1997). *Experiments in Ecology. Their logical design and interpretation using analysis of variance*. Cambridge, Cambridge University Press

Para solucionar este problema, Ryan (1960, citado por Day y Quinn, 1989) propuso un reajuste de la probabilidad del error Tipo I cuando se realiza el test SNK. El ajuste consiste en reducir el valor de α a medida que decrecen el número de medias que se comparan, de forma que si hay a medias en todo el experimento, y g es el número de medias que se están comparando, el valor de α' se puede calcular como (Day y Quinn, 1989):

$$\alpha' = 1 - (1 - \alpha)^{g/a} \quad (4.22)$$

El principal inconveniente de este test es que se necesitan los valores del estadístico Q (*Studentized Range*) para cuantiles diferentes de los que se encuentran en las tablas habituales, $\alpha=0.05$ y $\alpha=0.01$ (ver p.ej en Snedecor y Cochran, 1989; Winer *et al.*, 1991). Para solucionar este problema, y poder estimar el valor de Q para cualquier α entre 0.05 y 0.01, se puede emplear el algoritmo recogido en Lund y Lund (1983) o interpolar los valores a partir de las tablas de $\alpha=0.05$ y $\alpha=0.01$, con la siguiente ecuación recogida en Day y Quinn (1989), válida para menos de 10 medias:

$$Q_{\alpha'} = Q_{\alpha=0.05} + (Q_{\alpha=0.01} - Q_{\alpha=0.05}) \frac{\log(0.05) - \log(\alpha')}{\log(0.05) - \log(0.01)} \quad (4.23)$$

A pesar de los problemas teóricos del método SNK relacionados con el error de Tipo I, Underwood (1997) señala que en más de 100 trabajos en los que no ajustó inicialmente el valor de α' siguiendo el procedimiento de Ryan, sólo encontró en uno un problema con errores de Tipo I. Es decir, el método SNK arrojaba valores similares al de Ryan. Este autor recomienda emplear el método de Ryan como contraste del método SNK cuando existan más de 5 medidas y de 3 factores. Otros autores recomiendan sin embargo emplear el procedimiento de Tukey HSD cuando existen más de tres tratamientos (Day y Quinn, 1989).

En resumen, para la determinación de los niveles que afectan a la movilización de los berberechos se ha aplicado el contraste t de Student cuando los factores cuentan con dos niveles: estado y densidad. Para el análisis de los factores con tres o más niveles se ha aplicado el método de Student-Neuman-Kauls, complementado con el método de Ryan. Además, los resultados de estos tests se han comparado con los arrojados por el método de Tukey HSD, que tiene una gran potencia estadística y permite determinar los intervalos de confianza de las comparaciones realizadas (Day y Quinn, 1989).

Los contrastes t de Student y Tukey HSD están implementados en el paquete SPSS y además son bastante comunes y se puede encontrar una descripción detallada de los mismos en referencias clásicas de estadísticas (ver p.ej. Snedecor y Cochran, 1989; Winer *et al.*, 1991; Sahai y Ageel, 2000). Algunos ejemplos de aplicación del método de comparaciones múltiples SNK, junto con el método de Ryan se pueden ver en Underwood (1997), tanto para análisis de un factor (pág. 234), como para varios factores (pág. 331). En el apartado 4.4.3.1 se describe en detalle el procedimiento de aplicación de este test.

4.3.6.1. Ensayos por grupos de tamaños

Para evaluar la influencia de las variables analizadas sobre el porcentaje de berberechos movilizados, en los ensayos por grupos de tamaños se ha construido un modelo ANOVA factorial de cuatro factores fijos (velocidad, talla, reclutamiento y estado), con todas sus interacciones.

Como paso previo al ANOVA, se ha realizado en primer lugar un análisis exploratorio de datos (Exploratory Data Analysis) con ayuda del programa SPSS © v 16.0. En el análisis de datos multivariantes, el análisis exploratorio debe constar de las siguientes etapas (Pérez, 2004):

- Un análisis gráfico de los datos representado los histogramas de frecuencias, gráficos de cajas y bigotes (whisker box plots), gráficos de dispersión, etc.
- Un análisis de datos ausentes. En este caso no se ha contemplado este paso porque no había datos de este tipo.
- Detección de valores atípicos, de las observaciones que no siguen el mismo comportamiento que el resto de los datos.
- Comprobación de las hipótesis subyacentes a los métodos empleados, en este caso, las hipótesis del análisis ANOVA.

El primer paso del análisis, la inspección visual de los datos, es fundamental ya que se pueden detectar tendencias, datos anómalos o la forma en la que se distribuyen los datos. La detección de datos anómalos (*outliers*), su eliminación y sustitución por un dato "correcto" es una tarea que debe hacerse con mucha precaución.

La eliminación de los *outliers* es especialmente útil en el desarrollo de los Análisis de la Varianza cuando no se cumple la hipótesis de homogeneidad de las varianzas. En esta circunstancia, si se encuentra un dato anómalo se puede sustituir por la media del resto de repeticiones de ese tratamiento. En este caso, se debe además reducir en un grado de libertad en la estimación de la Media Cuadrática de cada tratamiento (Underwood, 1981).

Para estos experimentos, ha sido necesario eliminar menos de media decena de valores anómalos, que representan un porcentaje inferior al 1.5% del total de datos empleados en el análisis (6 velocidades x 4 tallas x 2 reclutamientos x 4 repeticiones).

Para comprobar la homogeneidad de las varianzas, también conocida como hipótesis de *homoscedasticidad*, es habitual emplear el test de Cochran (Cochran, 1941).

El test de Cochran se basa en realizar un contraste de hipótesis sobre la igualdad de las varianzas empleando el estadístico *C* definido como el cociente entre la varianza máxima y la suma de todas las varianzas muestradas S_i^2 :

$$C = \frac{\max(S_i^2)}{\sum_a S_i^2} \quad (4.24)$$

donde *a* es el número de poblaciones muestradas. El valor de este estadístico, se debe comparar con el valor de la Tabla de percentiles de la distribución *C* para un nivel de significación determinado ($\alpha=0.05$), el número de poblaciones muestradas y los grados de libertad del experimento *v* (que no son más que el número de repeticiones realizadas para cada nivel menos uno, *n-1*).

Si el contraste es significativo, existen evidencias de que aparecerán problemas porque las varianzas no son homogéneas (no se cumple la hipótesis de homoscedasticidad). Esto sucede cuando el valor de *C* calculado con la ecuación (4.24) es superior al valor del estadístico $C[a, v; \alpha]$. Para obtener el valor de la función de distribución *C* se puede recurrir p.ej. a la tabla recogida en Sahai y Ageel (2000). En este trabajo se ha empleado un sencillo código libre de

cálculo de la función C para Matlab® disponible en el repositorio de Mathworks: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>

Aunque el contraste se desarrolló inicialmente para análisis ANOVA de un factor, su extrapolación a ANOVAs de varios factores es inmediata. Un ejemplo se recoge en Underwood (1981). Se ha empleado este contraste porque está especialmente indicado en casos en los que una o varias varianzas son mucho mayores que el resto⁸⁷ y el tamaño de las muestras es el mismo (es un experimento equilibrado).

Cuando se trabaja con variables que reflejan porcentajes es habitual que no se cumpla la hipótesis homoscedasticidad porque los datos estarán siempre acotados entre 0 y 1. En este caso las varianzas de las muestras se hacen más bajas a medida que la media se aproxima a los valores máximos y mínimos, por lo que es previsible que las distribuciones tengan asimetrías y varianzas heterogéneas (ver Apéndice 2).

En este caso se ha aplicado la siguiente transformación a los datos para conseguir que las varianzas sean homogéneas (Bartlett, 1947):

$$x' = \arcsin \sqrt{x} \quad (4.25)$$

Una vez realizado el ANOVA, y detectados factores que producen algún efecto sobre la movilización de los berberechos, se ejecutaron los test paramétricos a posteriori de SNK, el método de Ryan y el método de Tukey HSD.

4.3.6.2. Ensayos por grupos de poblaciones

Como en el apartado anterior, para evaluar la influencia de las variables analizadas sobre el porcentaje de berberechos movilizados, se ha construido un modelo ANOVA factorial de cuatro factores fijos (velocidad, talla, reclutamiento y estado), con todas sus interacciones.

En primer lugar se ejecutó un análisis exploratorio de datos para observar tendencias o posibles datos anómalos. En este experimento no ha sido necesario eliminar ningún *outlier*.

Antes de realizar el ANOVA, se comprobó la hipótesis de homogeneidad de las varianzas sobre los datos arcsin-√ transformados. Una vez realizado el test, y detectados los factores que producen algún efecto sobre la movilización de los berberechos, se ejecutaron los test paramétricos a posteriori de SNK, el método de Ryan y el método de Tukey HSD.

⁸⁷ Como se recoge en el Apéndice 2, el Análisis de la Varianza es una herramienta robusta que incluso funciona bien en situaciones en las que no se cumplen las hipótesis de normalidad, de homogeneidad de las varianzas o independencia del muestreo. Esto es especialmente válido para la hipótesis de normalidad, ya que la mayoría de no normalidades no afectan al análisis, y para situaciones donde las varianzas, aunque no homogéneas, tienen el mismo orden de magnitud. La fiabilidad del test se reduce cuando la varianza de un nivel, o grupo de niveles, es especialmente alta.

4.4. RESULTADOS

4.4.1. Caracterización de los berberechos

Para realizar la caracterización geométrica de los berberechos se tomaron un total de 80 individuos de todas las tallas empleadas en los ensayos. En primer lugar se midieron las longitudes principales en los tres ejes con un calibre de resolución de 0.1 mm. En la Figura 4.56 se representan las longitudes características de los berberechos. Respecto a este parámetro, se puede indicar que la longitud máxima de los berberechos analizados oscila entre los 12 y 38 mm.

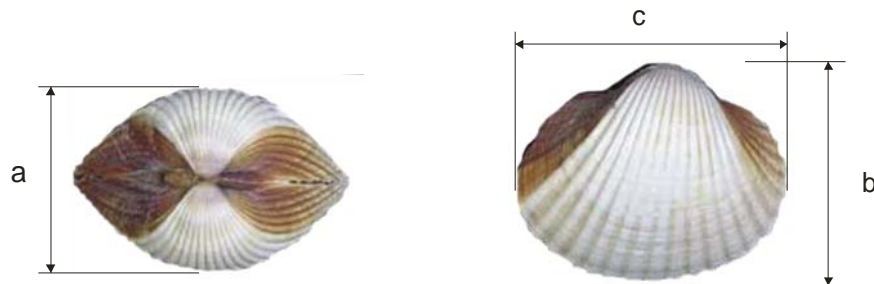


Figura 4.56. Longitudes características de los berberechos: altura *a*, longitud en la dirección del flujo *b* y anchura *c*.

En la Figura 4.57 se presentan las relaciones entre las longitudes características de los berberechos analizados. Se han ajustado funciones potenciales, por el método de los mínimos cuadrados, para las relaciones entre la anchura (*c*) y la altura (*a*), anchura (*c*) y la longitud (*b*), y finalmente la altura (*a*) y la longitud (*b*).

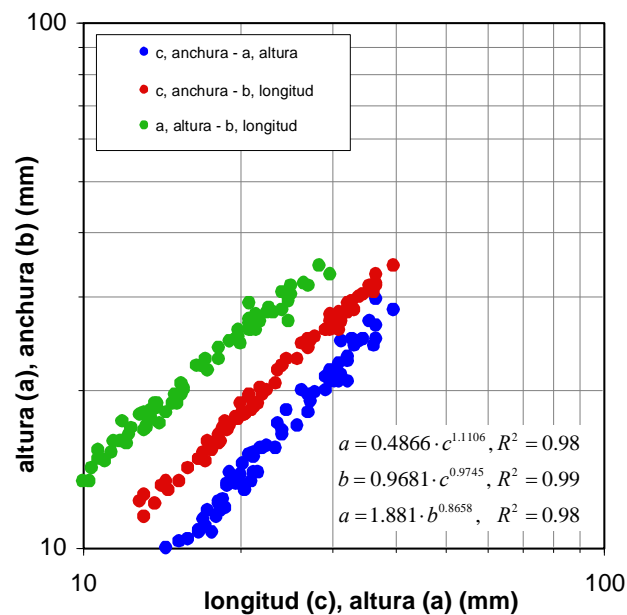


Figura 4.57. Relación entre longitudes características de los berberechos analizados.

Las expresiones obtenidas poseen un elevado coeficiente de correlación ($R^2=0.95-0.97$) y son similares a las recogidas en González y Pérez (1984b). También se ha podido constatar que las relaciones entre la longitud y la anchura, y la longitud y altura son alométricas, es decir, a medida que el molusco incrementa de tamaño lo hace con mayor rapidez en la dirección de la longitud. Sin embargo, la relación entre altura y anchura es isométrica, ya que la velocidad de crecimiento en estas direcciones es prácticamente idéntica.

El análisis de la alometría se ha realizado a partir del análisis de la pendiente de la recta de regresión entre las longitudes características del berberecho. Cuando el crecimiento es isométrico la pendiente de dicha recta es unitaria. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 4.10 junto con los resultados medios obtenidos para los berberechos *Cerastoderma edule* y *C. glaucum* en 24 zonas del mediterráneo (Mariani *et al.*, 2002)

Tabla 4.10. Valor de la pendiente del análisis de regresión para el análisis de la alometría tomando como variable independiente la longitud y comparación con los valores medios obtenidos de la literatura (valor medio \pm desv. estándar).

Variable	Este trabajo	(Mariani <i>et al.</i> , 2002)	
		<i>C. edule</i>	<i>C. glaucum</i>
Altura	0.87, $R^2=0.99$	0.884 \pm 0.079	1.060 \pm 0.017
Anchura	0.77, $R^2=0.97$	0.910 \pm 0.038	1.034 \pm 0.010

En los estudios de transporte de sedimentos, los parámetros fundamentales que caracterizan la movilización de las partículas son el diámetro medio y la densidad de las mismas. Del mismo modo, para determinar la movilidad de los berberechos o caracterizar su sedimentación, es necesario conocer estos parámetros.

Respecto al diámetro del berberecho, hay que indicar que la forma de este tipo de moluscos no es totalmente esférica, por lo que habrá definir algún longitud característica para el diámetro. En estos casos, es habitual que el diámetro medio se calcule como el diámetro de la esfera que ocupa el mismo volumen que el cuerpo analizado (Swamee y Ojha, 1989; Anta *et al.*, 2007):

$$D_n = \left(\frac{6V_t}{\pi} \right)^{1/3} \quad (4.26)$$

donde D_n y V_t son el diámetro medio y el volumen total del berberecho

El diámetro medio se ha determinado en función de la anchura del berberecho c , a partir del ajuste de una recta por mínimos cuadrados obteniendo la siguiente expresión válida para tamaños comprendidos entre 15 y 35 mm (el rango analizado):

$$D_n \approx 0.62 \cdot c + 4.67 \quad (4.27)$$

El coeficiente de correlación cruzada R^2 de la expresión anterior es de 0.97.

Para definir la asimetría de los cuerpos se suele usar el factor de forma (SF). El factor de forma se ha empleado, y se emplea, en trabajos de transporte de sedimentos (ver p.ej. Swamee y Ojha, 1989) y también en estudios hidrodinámicos de conchas de moluscos (Thompson y Amos, 2002):

$$SF = \frac{d_{sh}}{\sqrt{d_i \cdot d_{max}}} = \frac{a}{\sqrt{b \cdot c}} \quad (4.28)$$

donde d_{sh} , d_i y d_{max} son el diámetro menor, intermedio y máximo respectivamente.

Para determinar la densidad de los moluscos, se ha empleado la siguiente ecuación:

$$\rho_c = \frac{m_s + m_w}{V_t} = \frac{\rho_s V_s + \rho_w V_w}{V_t} \quad (4.29)$$

donde ρ_w y ρ_s son la densidad del agua y la concha respectivamente, V_s el volumen desplazado únicamente por la concha y V_t el volumen total desplazado por todo el berberecho (cuando se encuentra cerrado).

En esta fórmula se asume implícitamente que la densidad de las viandas (el cuerpo comestible de los berberechos), posee la misma densidad que el agua. De este modo, en la fórmula anterior se expresa que todo el interior del berberecho está lleno de agua.

Para confirmar esta hipótesis, se realizó un experimento con 60 viandas para determinar su densidad. Para ello, se pesaron tras extraerlas de los berberechos y se midió el volumen desplazado por las mismas. De este ensayo se obtuvo una densidad media para las viandas de $1.03 \pm 0.09 \text{ g/cm}^3$, muy similar a la del agua por lo que hipótesis anterior se asume como válida.

Para calcular la densidad de los berberechos en primer lugar se determinó el volumen desplazado por cada pareja de conchas y se pesaron. A continuación se estimó el volumen total de cada molusco. Para ello cada uno de los berberechos se rellenó de plastilina y se cerró para, posteriormente, medir el volumen de agua desplazado. Para la realización de estas determinaciones se empleó una pipeta con una precisión de 0.1 mL.

En último lugar, y a partir de la fórmula siguiente, se calculó la masa del agua existente en el interior de cada berberecho, asumiendo que los berberechos estaban rellenos de agua dulce:

$$m_w = (V_t - V_s) \rho_w \quad (4.30)$$

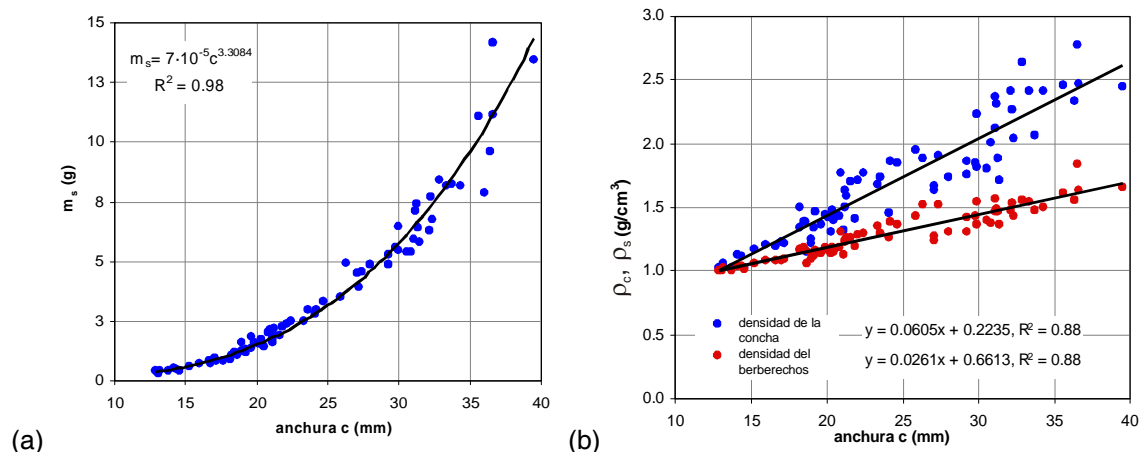


Figura 4.58. Relación entre la anchura del berberecho y (a) la masa de la concha, (b) con la densidad de la concha y la densidad del berberecho.

Se han determinado algunas relaciones entre la longitud del berberecho y las variables presentadas anteriormente. Algunas de ellas evidentes, como la relación entre tamaño y peso

de la concha, y otras menos evidentes, como la relación existente entre la densidad del berberecho y de las conchas con la anchura (ver Figura 4.58). Otros parámetros, como el factor de forma, son independientes del tamaño del molusco, siendo prácticamente constantes (Figura 4.59).

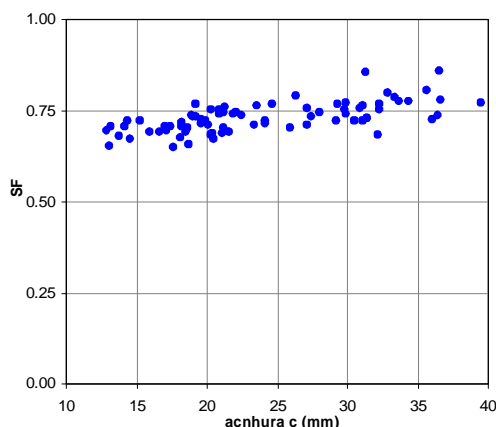


Figura 4.59. Relación entre la anchura del berberecho y el coeficiente de forma SF.

Evidentemente, como las longitudes características están correlacionadas (Figura 4.57), las relaciones encontradas en las figuras anteriores se reproducen con la longitud y altura del berberecho.

Los valores medios (\pm desviación típica) del factor de forma y de las densidades de concha y berberechos han sido 0.73 ± 0.04 , 1.69 ± 0.45 g/cm³ y 1.29 ± 0.19 g/cm³ respectivamente. Los valores del factor de forma y de la densidad del berberecho son similares a los determinados en trabajos anteriores: 0.77 ± 0.04 y 1.40 ± 0.04 g/cm³ respectivamente (Peña *et al.*, 2008). Respecto a este último parámetro, se puede señalar que los valores recogidos en la literatura para las larvas en 1.1 g/cm³ (Jonsson *et al.*, 1991) y para los juveniles de *C. edule* inferiores a 5 mm oscilan entre 1.036 y 1.040 g/cm³ (de Montaudouin, 1997)

Tabla 4.11. Valores de las densidades de la concha y el berberecho obtenidos en la caracterización de los moluscos.

TALLA (mm)	Densidad de la concha, ρ_s (g/cm ³)	Densidad del berberecho, ρ_c (g/cm ³)
15-20	1.23 ± 0.15	1.09 ± 0.06
20-25	1.57 ± 0.18	1.24 ± 0.08
20-25	1.86 ± 0.15	1.40 ± 0.10
30-35	2.30 ± 0.27	1.54 ± 0.11
Media	1.69 ± 0.45	1.29 ± 0.19

Sin embargo, la densidad media de la concha es inferior a la determinada en trabajos anteriores, que se estimó en 2.27 ± 0.07 g/cm³ (Peña *et al.*, 2008). Como se ha comentado ya, y se puede apreciar en la Figura 4.58 y en la Tabla 4.11, esta diferencia está originada en el

tamaño de los moluscos analizados, ya que a medida que se aumenta el tamaño de los moluscos, también lo hace la densidad de la concha y del cuerpo.

En Peña *et al.* (2008), los berberechos analizados se encontraban entre los ~26 y los ~33 mm. Por este motivo la densidad de la concha y del berberecho son superiores a los valores medios de este trabajo, aunque prácticamente idénticos a los encontrados para la talla superior de este análisis (ver Tabla 4.11).

4.4.2. Análisis hidrodinámico: lecho de arena

4.4.2.1. Características generales

A continuación se presentan las estadísticas generales (*bulk parameters*) del flujo en la sección analizada sin la presencia de berberechos. Como ya se ha comentado, el plano donde se realizaron las determinaciones no se corresponde con el centro del canal (Figura 4.52) y se caracteriza por la presencia de corrientes secundarias que modifican la forma habitual de las leyes de velocidades e intensidades turbulentas.

La elección de un plano no situado en la típica posición central atendió a criterios de visualización del flujo sobre los berberechos ya que los diferentes recintos de análisis, dos en el caso de los ensayos de poblaciones estacionales y tres en el caso de de grupos de tamaños (ver Figura 4.52), se separaron por una placa de acero inoxidable de 2 mm de espesor.

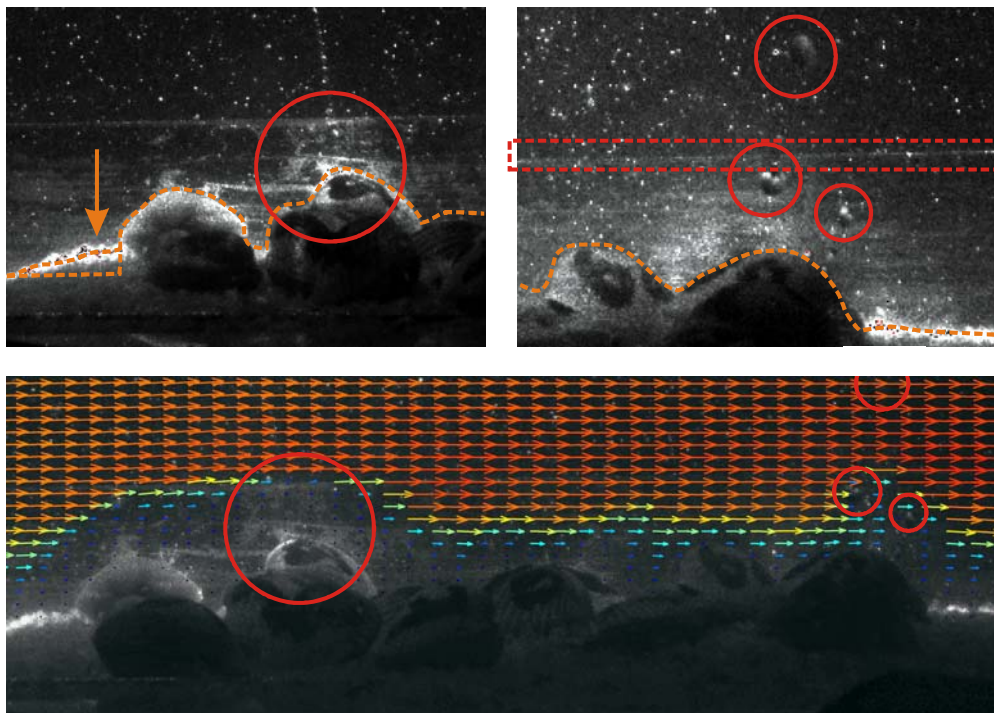


Figura 4.60. Ejemplo de interacción del fondo de la imagen (izquierda) y de unas gotas (derecha) en la visualización y determinación de los campos de velocidades. En algunos escenarios el borde de la placa de visualización (rectángulo con línea discontinua) ha provocado un descenso artificial de las intensidades turbulentas en la dirección w (Figura 4.67). En la parte izquierda de la imagen se puede apreciar la acumulación de arena durante el ensayo aguas arriba de los moluscos.

Con estas placas se pretendía definir zonas de análisis diferenciadas, como en otros trabajos recogidos en la literatura (p.ej. de Montaudouin *et al.*, 2003), y así evitar la interacción entre las mismas (p.ej. que los moluscos saltasen de una zona a otra). La otra función es la de actuar de barrera óptica. Así, las placas se emplearon para ocultar de la zona de análisis los moluscos situados en otras zonas de estudio, ya que su visión podía afectar a la determinación de las velocidades.

Hay que recordar que la técnica PIV se basa en la detección del movimiento de partículas en el agua. Estas partículas son iluminadas por el láser Nd:Yag. Si la zona de análisis tiene un fondo claro, existen elementos con una intensidad similar a la que reflejan las partículas, o existen patrones fijos (como p.ej. una gota de agua en el cristal del canal), la estimación de las velocidades se ve comprometida.

Por este motivo, las placas se pintaron de color negro para evitar su interacción con las partículas y se intentó evitar que el cristal de canal tuviese manchas o gotas de agua. Sin embargo, en algunos ensayos se detectó alguna mancha en el cristal (ver Figura 4.60). Estas zonas con velocidades nulas o velocidades erróneas se han eliminado de los análisis porque provocan la dispersión de los resultados a la altura en la que éstas se producen.

En la Figura 4.61 se presenta un ejemplo de este fenómeno en el perfil de velocidades y en la intensidad turbulenta en la dirección u determinado para la menor velocidad de corriente sobre el lecho de arena. Para evitar este efecto, se han filtrado las velocidades que se desvíen más de 3 veces el RMS del valor medio temporal de la velocidad en cada punto. Este proceso se ha repetido en 2 iteraciones. Además, para realizar la media espacial de las velocidades también se han eliminado del análisis aquellos puntos con valores fuera del intervalo proporcionado por la media espacial ± 3 RMS. Este procedimiento de filtrado también se ha aplicado para la determinación de los momentos de segundo orden y es habitual en la literatura (LaVision, 2007; Pokrajac *et al.*, 2008).

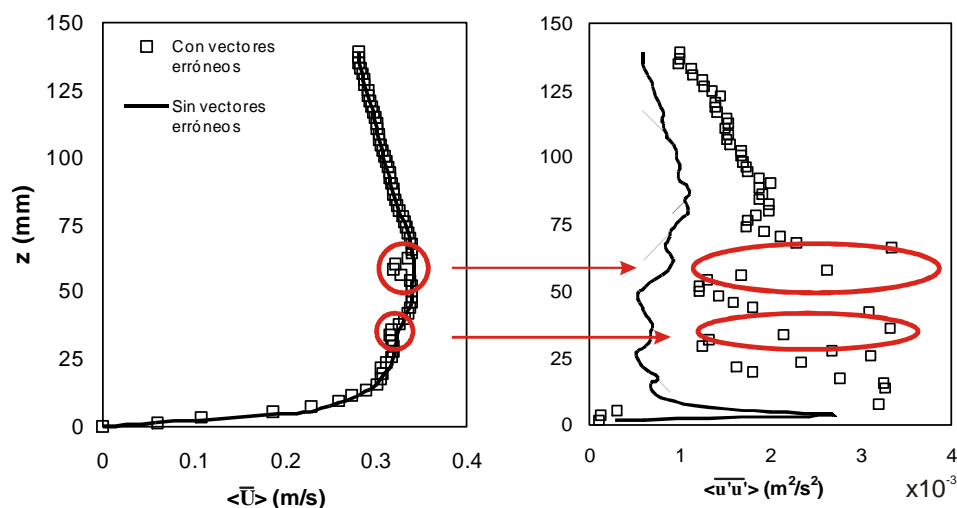


Figura 4.61. Efecto de la inclusión de zonas localizadas con velocidades mal determinadas por problemas de visualización en los perfiles de velocidad e intensidades turbulentas. Se puede observar como eliminando las zonas incorrectas se elimina el efecto de “peak locking” en los parámetros analizados.

Con respecto a la caracterización del flujo, se presentan en la Tabla 4.12 un resumen con las principales características del mismo. Estos datos son útiles para comparar los resultados de estos ensayos con los de la literatura, donde se dan las propiedades del flujo con el lecho “liso”, y para ver las diferencias que existen entre éste y el flujo rugoso con menor sumergencia que se produce sobre los moluscos.

Tanto aquí, como en los siguientes escenarios, los resultados se presentan en función del escalón de velocidad. Para diferenciar estos resultados de los obtenidos con berberechos, la nomenclatura empleada ha sido ensayo V01FL a V06FL, donde “FL” hace referencia a Fondo Liso y “V01” a “V06” al escalón de velocidad ensayado.

Tabla 4.12. Resumen de las propiedades del flujo en los ensayos realizados sobre el lecho de arena sin moluscos. Los ensayos se han ordenado por velocidades crecientes: V01FL a V06FL, donde FL hace referencia a que son los ensayos de Fondo Liso. El resto de variables de la tabla se definen en el texto (§4.4.2.1).

marca	ENSAYO	$\langle \bar{U} \rangle$ (m/s)	$\langle \bar{U}_{\max} \rangle$ (m/s)	$u_* \equiv u_{*,\log}$ (m/s)	Re_h ($\times 10^{-3}$)	Re_{*h} ($\times 10^{-3}$)	k_s^+ (-)	Fr_h (-)	$Fr_{*\Delta}$ (-)
◆	V01FL	0.294	0.342	0.0228	44.7	3.5	64.6	0.241	0.033
■	V02FL	0.315	0.351	0.0234	48.0	3.6	66.4	0.258	0.035
●	V03FL	0.346	0.383	0.0262	52.8	4.0	74.5	0.283	0.044
▲	V04FL	0.391	0.437	0.0305	58.6	4.6	86.7	0.322	0.060
◆	V05FL	0.446	0.487	0.0346	67.8	5.3	98.2	0.365	0.077
●	V06FL	0.471	0.515	0.0363	69.6	5.4	103.0	0.391	0.085

En la Tabla 4.12 se recogen los valores de la velocidad media y máxima doblemente promediada $\langle \bar{U} \rangle$ y $\langle \bar{U}_{\max} \rangle$, la velocidad de fricción característica ($u_* \equiv u_{*,\log}$), los números de Reynolds calculados para el calado del flujo y con las velocidades media y de fricción, el valor de la rugosidad adimensional (que tiene estructura de número de Reynolds calculado con la rugosidad equivalente de Nikuradse y la velocidad de fricción), el número de Froude

$Fr_h = \frac{\langle \bar{U}_{med} \rangle}{\sqrt{gH}}$ y el número densimétrico de Froude igual al parámetro de Shields

$$Fr_{*\Delta} = \frac{u_*^2}{\sqrt{\Delta g d_m}}, \text{ calculado con el diámetro medio y } \Delta = \frac{\rho_s}{\rho} - 1.$$

La relación entre la velocidad máxima y media del flujo es de 1.11 ± 0.03 (media \pm desviación estándar) y la relación entre la velocidad media y la de corte es de 0.077 ± 0.001 , por lo que se encuentra dentro del rango habitual establecido para ríos naturales en $u_* = (0.05 - 0.10)U$ (Detert, 2008).

El número de Froude está por debajo de 1, por lo que las condiciones de flujo son subcríticas. El número densimétrico de Froude oscila entre 0.033 y 0.085. El valor de $Fr_{*\Delta}$ para el umbral de movimiento en régimen turbulento rugoso ($k_s^+ > 70$) fue establecido por Shields en ~ 0.056 (Shields, 1936). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el ábaco de Shields cuenta con mucha dispersión, y algunos autores proponen valores para la tensión tangencial crítica

adimensional en el rango 0.030-0.086 (Buffington y Montgomery, 1997), siendo la cota inferior 0.030 un valor habitual en la literatura (Wong y Parker, 2006). Otros factores que afectan a la definición del inicio del transporte por fondo son factores como el ocultamiento de partículas o acorazamiento, que se produce cuando las mezclas de sedimentos no son uniformes (Julien, 1994; García, 2006).

De hecho, en los ensayos se observó arrastre de los sedimentos y, como se verá en el apartado 4.4.3.1, este fenómeno ha interactuado con el proceso de movilización de los moluscos. Hay que señalar que el transporte de sedimentos también modifica la forma de las leyes de velocidades en la zona más cercana al lecho, provocando un efecto similar al de una capa de mezcla con perfiles de velocidades en forma de S, (§2.4.4., Figura 2.29). Esta modificación de la estructura de las velocidades también repercute en la estructura de la turbulencia (Wang *et al.*, 2001).

A continuación se presentan en la Tabla 4.13 los valores de las velocidades de fricción obtenidos a partir de la extrapolación del perfil logarítmico de velocidades, u_{*log} , y a partir de la extrapolación de la suma de tensiones de Reynolds y de forma hasta la cota $z=0$, u_{*uw} . La determinación de este valor está sujeto a ciertas incertidumbres ya que con la influencia de las corrientes secundarias es difícil definir el “tramo lineal” de la ley de tensiones (Figura 4.68).

Como valor de control, también se presenta el valor determinado a partir del máximo registrado en el perfil $-\rho\langle u'w' \rangle - \rho\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$, $u_{*max,uw}$. En la última columna se ha calculado el valor de la tensión tangencial sobre el lecho como $\tau_0 = \rho u_{*log}^2$

Tabla 4.13. Resumen de los parámetros de corte en los ensayos realizados sobre el lecho de arena de los Lombos do Ulla.

ENSAYO	u_{*log} (m/s)	B_r (-)	ECM (-)	u_{*uw} (m/s)	$u_{*max,uw}$ (m/s)	u_* (m/s)	τ_0 (N/m ²)
V01FL	0.0228	8.572	0.38%	0.0158	0.0117	0.0228	0.52
V02FL	0.0234	8.498	0.23%	0.0159	0.0124	0.0234	0.55
V03FL	0.0262	8.344	0.23%	0.0176	0.0144	0.0262	0.69
V04FL	0.0305	8.356	0.18%	0.0230	0.0203	0.0305	0.93
V05FL	0.0346	8.359	0.28%	0.0256	0.0201	0.0346	1.20
V06FL	0.0363	8.422	0.49%	0.0239	0.0204	0.0363	1.32

El valor u_{*log} ha sido seleccionado como valor de control o variable interna de escalado u_* . Para la estimación de este parámetro y del coeficiente B_r se ha minimizado el error cuadrático medio (ECM) existente entre los registros experimentales y los valores arrojados por la ecuación (4.20). Este error se define como:

$$ECM = \sqrt{\frac{(u_{reg} - u_{log})^2}{N}} \quad (4.31)$$

donde u_{reg} y u_{log} hacen referencia a los valores medidos y aproximados por la ley logarítmica de velocidades (ecuación (4.20)) y N es el número de puntos analizados.

La minimización se ha realizado con ayuda de la herramienta *Solver*® de la hoja de cálculo Microsoft Excel®. El tramo de perfil doblemente promediado empleado en el análisis se encuentra situado entre ~ 0.08 y $\sim 0.2 z/H$. El límite superior está bien documentado en la literatura y está relacionado con el fin de la zona de influencia de la región logarítmica del flujo (ver apartado 2.3), mientras que el límite inferior se ha impuesto para contemplar la afección del transporte de sedimentos por fondo (ver apartado 2.4.4). La ecuación de velocidades empleada ha sido la de flujo rugoso y se ha estimado conjuntamente el valor de la velocidad de corte y de la constante de integración B_r , que se encuentra dentro de unos límites razonables (8.40 ± 0.11), ya que nos encontramos en el caso de régimen hidráulico rugoso⁸⁸. El valor de la rugosidad equivalente de Nikuradse se ha estimado en $2 d_{50} \sim 2.84$ mm y el plano de velocidades nulas se ha determinado por debajo de las crestas de los granos a una altura de $0.2d_{50} \sim 0.5$ mm.

La diferencia entre el u_{*uw} y u_* es del orden de \sim mm/s. Aunque no parezca una diferencia demasiado importante, ésta se propaga si lo que se desea es obtener $\tau_0 (\propto u_*^2)$. Así, aunque la relación u_{*uw}/u_* está en $70 \pm 4\%$, la obtención de τ_0 diferiría entre un 56% y un 44%. El hecho de que la velocidad de fricción estimada a partir de la ley logarítmica de velocidades sea superior al valor estimado a partir de las tensiones de Reynolds corrobora la hipótesis de la existencia de las corrientes secundarias. Por este motivo se debe considerar que u_{*log} aproxima mejor la tensión total sobre el fondo mientras que u_{*uw} sólo proporciona una medida de la tensión originada por el movimiento del fluido en el plano vertical de análisis (aunque en promedio la mayor contribución a la tensión tangencial sea esta).

Para terminar con los parámetros generales descriptores del flujo, la Tabla 4.14 recoge los parámetros y escalas geométricas más relevantes. El calado se fijó en ~ 150 mm sobre la posición del fondo de arena. La posición de la velocidad máxima δ_h se ha determinado a partir del perfil de velocidades doblemente promediado. En todos los casos hay un fuerte fenómeno de descenso de la posición de la velocidad máxima (*velocity dip*) originado por la existencia de corrientes secundarias. Los valores de δ_h/H están en el rango 0.35 ± 0.08 .

Tabla 4.14. Parámetros y escalas geométricas en los ensayos realizados sobre el lecho de arena de los Lombos do Ulla.

ENSAYO	H (mm)	δ_h (mm)	δ_h / H (-)	$\delta_h (0.99 \langle \bar{u}_{max} \rangle) / H$ (-)		η (mm)
V01FL	152.2	57.99	0.381	0.329	0.460	0.337
V02FL	152.5	55.00	0.361	0.295	0.433	0.331
V03FL	152.6	49.77	0.326	0.282	0.393	0.303
V04FL	150.0	73.08	0.487	0.333	0.707	0.269
V05FL	151.9	40.03	0.263	0.197	0.329	0.246
V06FL	147.8	42.84	0.290	0.223	0.406	0.236

⁸⁸ En los ensayos V01FL y V02FL el valor de k_s^+ es ligeramente inferior a 70, siendo 64.6 y 66.4 respectivamente (Tabla 4.12) por lo que estaríamos en flujo de transición.

Estos valores están bastante por debajo de lo que predicen las fórmulas empíricas propuestas por Wang *et al.* (2001) o Yang *et al.* (2004), (Cap. §2, ecuaciones (2.62) y (2.62)), que situarían la posición de la velocidad máxima en $\delta_h/H \sim 0.647$ y en ~ 0.669 . El descenso “extra” de la posición de δ_h se atribuye a la no-uniformidad del flujo y la posible presencia de corrientes secundarias de primer orden (asociadas al flujo en curva, §2.4.4), así como a errores en la determinación de la velocidad máxima. El primer aspecto se discutirá en apartados posteriores mientras que el segundo se comenta a continuación.

Así, determinar δ_h experimentalmente tiene cierta incertidumbre ya que un análisis detallado de los perfiles de velocidad revela que el intervalo definido por $0.99 \langle \bar{u}_{\max} \rangle$ se encuentra aproximadamente en la posición $\delta_h \pm 0.09 \delta_h/H$. Esto se debe al hecho de que en el entorno de δ_h el gradiente vertical de las velocidades es prácticamente nulo y es fácil cometer errores de cierta magnitud. Estas diferencias son mayores en el caso del ensayo V04FL, donde el rango de variación se ha situado en $\delta_h/H = (0.333-0.707)$, es decir $\delta_h \pm 0.18 \delta_h/H$.

El último parámetro presentado en la Tabla 4.14 es la escala de longitudes es la microescala de Kolgomorov η . Según Nezu y Nakagawa (1993) esta microescala se puede aproximar como

$$\eta \approx H / \text{Re}_{\delta_h}^{3/4} \quad (4.32)$$

El valor resultante $\eta = (0.23 - 0.34)$ mm no se puede resolver con el equipo PIV, donde la resolución espacial lograda con la configuración de los ensayos fue de ~ 2 mm (ver Tabla 4.9).

4.4.2.2. Velocidades doblemente promediadas

Los perfiles de velocidad horizontal doblemente promediadas recogidos en la Figura 4.62 reflejan claramente la influencia de las corrientes secundarias sobre la forma de los mismos así como sobre la posición de la velocidad máxima. También se puede observar cierta diferencia en la forma ($z/H > \sim 0.3$) entre los perfiles correspondientes a los ensayos de las tres velocidades más bajas, V01 a V03, y los tres de mayor velocidad, V04 a V06.

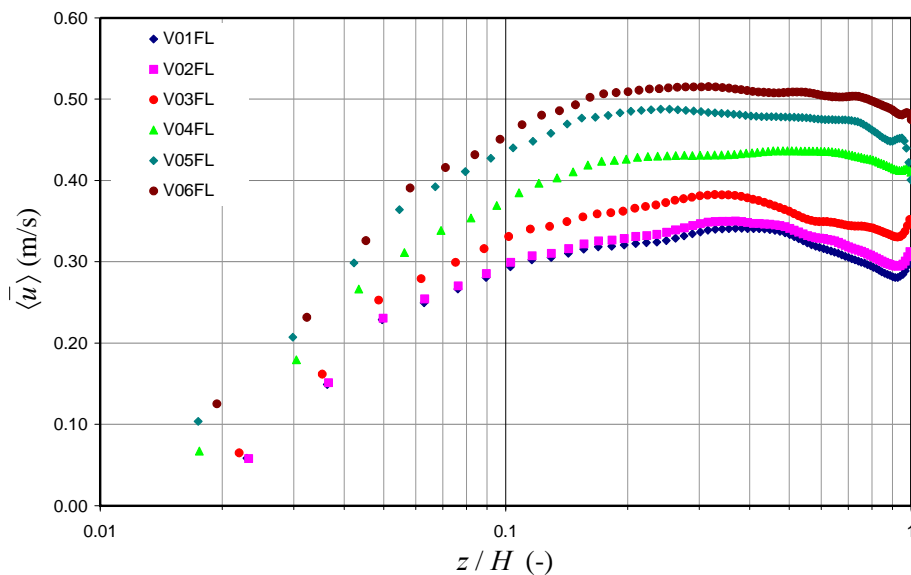


Figura 4.62. Perfiles de velocidad doblemente promediados para los ensayos de lecho de arena o de fondo liso.

Durante la realización de los ensayos el equipo PIV sufrió varias averías que retrasaron el plan de ensayos e impidieron disponer de datos de velocidad en todos los escenarios analizados. La primera avería sucedió un poco antes de terminar con los experimentos con el primer motor del canal, el que proporcionaba las velocidades más bajas V01 a V03. La rotura se produjo cuando se iba a comenzar a ensayar el escenario de la población de primavera, por lo que para este escenario no se disponen de datos de velocidades.

Se optó por no repetir este escenario una vez reparado el PIV por motivos de tiempo, ya que además del tiempo extra necesario en repetir las medidas, era necesario preparar el canal para el nuevo motor. Esta operación consistía en rehacer el sistema electrónico de control de velocidades y adaptar físicamente el motor al canal. Las labores de reparación y de adaptación del nuevo motor provocaron una parada de dos meses en la realización de los experimentos.

En la segunda fase de la experimentación se realizaron los ensayos correspondientes a las velocidades más altas, V04 a V06. Al comenzar esta segunda fase experimental se procedió a recalibrar el equipo y se realizaron unos ensayos de fondo liso preliminares para los nuevos escalones de velocidad (registrando únicamente 25 imágenes). A continuación se ensayaron los escenarios de los grupos de tallas y de poblaciones, para todos los estados, densidades y tamaños.

Al finalizar con esta serie de ensayos, el equipo se volvió a estropear antes de que se registrasen de forma detallada los campos de velocidades de los ensayos de fondo liso. Entonces se tenía para los ensayos de las velocidades más bajas de un juego de 1000 imágenes para cada escalón de velocidad, que además fueron tomadas en régimen permanente (dejando el agua circular a la velocidad de ensayo durante al menos 10 minutos).

La segunda reparación del PIV se prolongó durante otros 2 meses y era necesario reacondicionar el canal para comenzar cuanto antes con otra fase de experimentos dentro del proyecto del Ministerio de Medio Ambiente (Anta *et al.*, 2010). Esta fase de experimentos consistía en estudiar el arrastre de huevos de salmón y podía arrancar sin el equipo PIV, por lo que se optó por no repetir los ensayos de fondo liso y comenzar a trabajar en la segunda parte del proyecto.

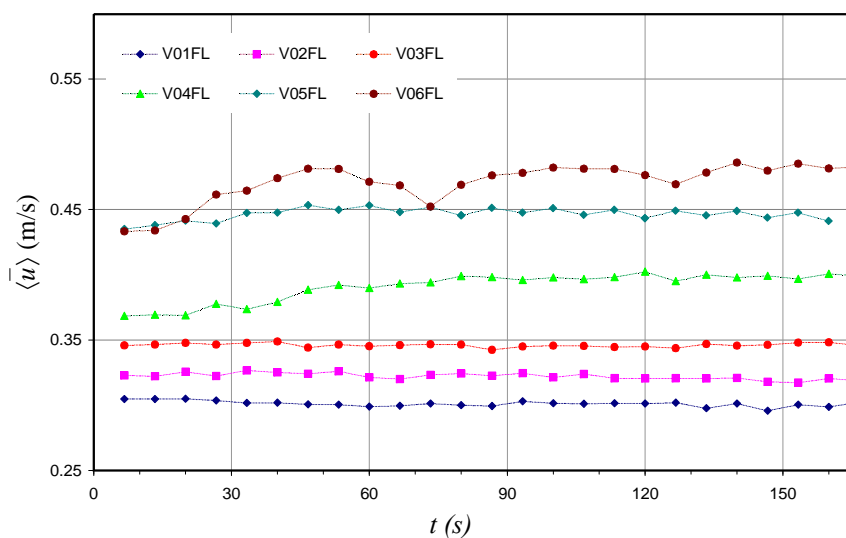


Figura 4.63. Evolución de la velocidad media en los ensayos con el fondo de arena. Cada punto representa una media de 20 imágenes.

En los ensayos V04 a V06 sólo se disponían 25 imágenes de los ensayos preliminares de fondo liso. Por este motivo, para la caracterización de estas velocidades con el fondo liso se emplearon los campos correspondientes al ensayo de la talla de moluscos menor (15 a 20 mm), con los berberechos muertos y el menor grado de reclutamiento. Se buscaron estos ensayos para evitar la influencia de los berberechos sobre el perfil de velocidades, ya que bajo estas condiciones los moluscos estaban práctica o totalmente movilizados.

En estos ensayos, así como en el resto de movilización de berberechos, se registraron 500 imágenes una vez transcurrido un minuto desde el arranque del motor. Como se puede apreciar en la Figura 4.63, esto ha provocado que en los primeros instantes el flujo no se estabilizase completamente, por lo que además del efecto de las corrientes y del transporte de sedimentos, la estructura del flujo puede estar afectada ligeramente por estar en régimen no permanente. Las diferencias en la velocidad media entre el comienzo del ensayo y la finalización del mismo, para los ensayos V04 a V06, se han cifrado en ~ 5 cm/s. Esta magnitud representa como máximo un $\sim 12\%$ de la velocidad media. También se puede observar que el flujo se estabiliza a partir de los 50 – 60 s desde el comienzo del ensayo.

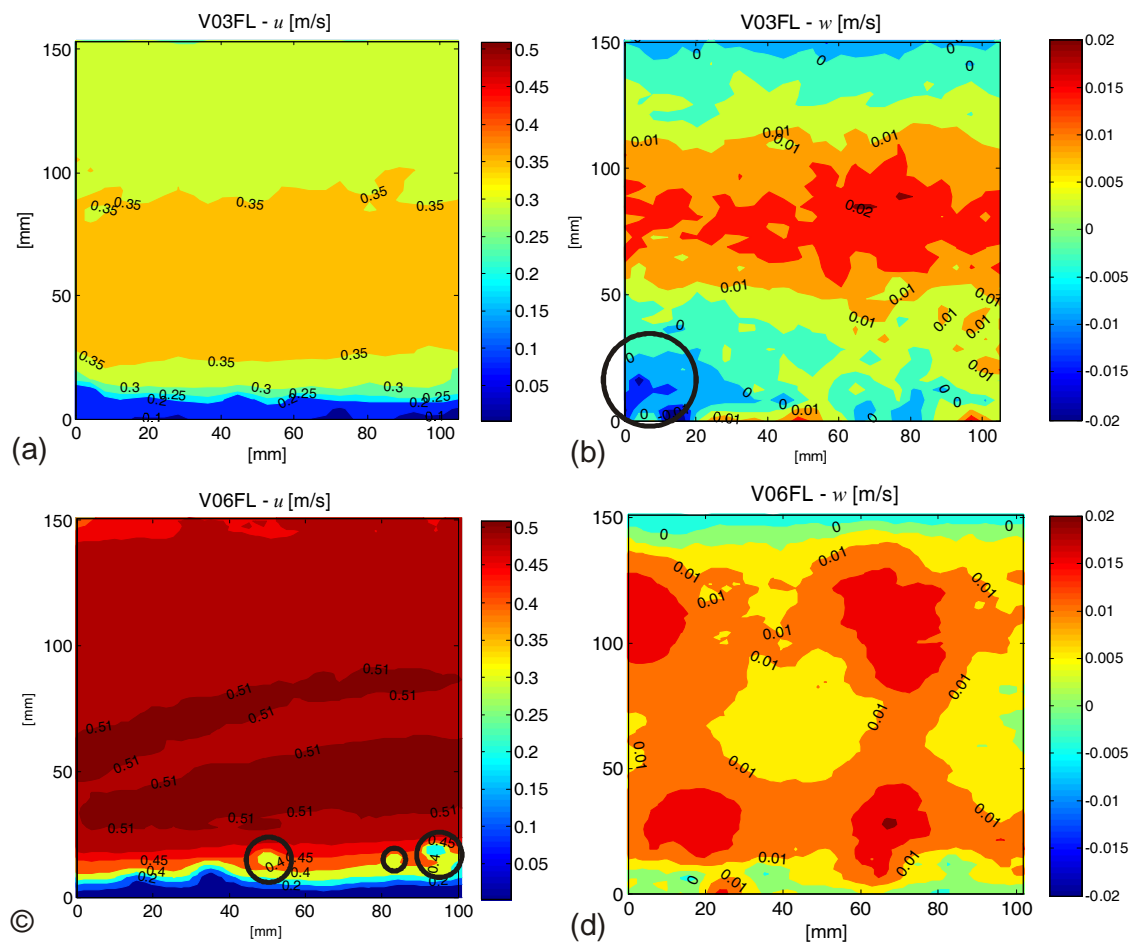


Figura 4.64. Velocidades medias u y w para la zona central del dominio visualizado (100×150 mm²) en los ensayos V03FL (a) y (b), y V06FL (c) y (d). Aquellas zonas con medidas erróneas originadas por problemas como los señalados en la Figura 4.60 se han identificado con un círculo negro.

Esta variabilidad también ha contribuido a la aparición de una no uniformidad espacial en la sección de análisis. En la Figura 4.64 se presentan los mapas de velocidades la dirección x y z

para los ensayos V03FL y V0FFL. En esta figura se puede apreciar como el flujo en el ensayo V03FL es prácticamente uniforme mientras que en el ensayo V06FL aparecen ciertas estructuras que denotan una no uniformidad en el dominio visualizado. En los ensayos sobre los berberechos se reanalizará este fenómeno.

En la Figura 4.65 se presenta el perfil vertical de velocidades u y w doblemente promediados escalados con la escala interna de velocidades. Tras determinar la velocidad de fricción por el procedimiento de minimización del error cuadrático se puede observar como las curvas colapsan en una única curva en la zona logarítmica. En la zona externa se puede observar cómo las curvas de los ensayos V01FL a V03FL y las de los ensayos V03FL a V06FL colapsan en dos familias de curvas ligeramente diferentes.

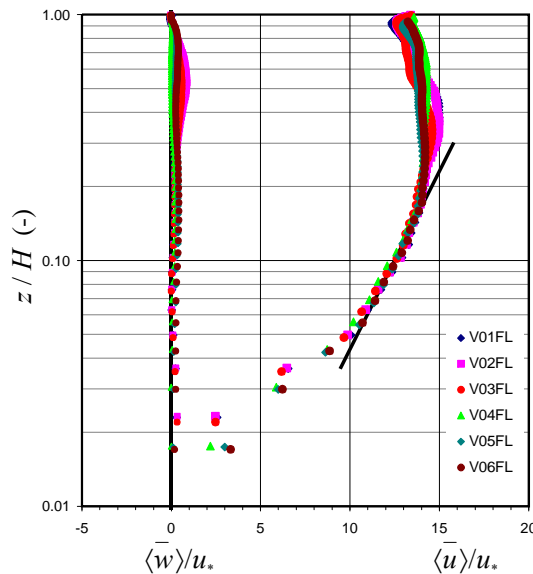


Figura 4.65. Distribución vertical de las componentes u y w de la velocidad doblemente promediada en los ensayos con el lecho de arena. Datos escalados con la variable interna u_* y con la externa calado H .

Hay que señalar que la ley logarítmica de velocidades (ecuaciones (4.18) a (4.21)) se ha desarrollado asumiendo que el flujo es 2D y que por tanto, una única velocidad de fricción puede representar la transferencia de cantidad de movimiento desde la región externa del flujo hacia el lecho. En canales con flujo 3D y corrientes secundarias esta aproximación no es correcta ya que la tensión total se distribuye de forma no lineal en el perímetro mojado de la sección. Sin embargo, experimentos desarrollados por Nezu y Rodi (1985, citados en Nezu y Nakagawa, 1993) en un canal hidráulicamente liso muy estrecho ($B/H = 2$) demuestran que la ley logarítmica se puede aplicar en toda la sección transversal a excepción de las zonas más cercanas a la pared. Además, en la extensión $-0.4 \leq y/B^{89} \leq 0.4$, $\tau_b(z)$ solo varía entre 0.98 y 1.1 $\tau_b(z)$ (Figura 2.20, §2.4.2.2.). En el apartado 2.4.2 y posteriores (Cap. §2) se presenta una descripción más detallada de los efectos que produce sobre la distribución de tensiones y velocidades la presencia de corrientes secundarias.

⁸⁹ y/B es el ratio entre la posición en la dirección perpendicular a la dirección del flujo y el ancho del canal.

Los perfiles de las velocidades verticales de la Figura 4.65 indican la presencia de corrientes secundarias, aunque en comparación con las velocidades en la dirección del flujo son bastante pequeñas. Así, estas se pueden acotar como $\langle \bar{w}(z) \rangle \leq u_* / 2$.

Por último, se presenta en la Figura 4.66 una comparación de los perfiles de velocidad obtenidos para los ensayos de fondo liso con los perfiles de velocidad determinados en los canales de estudios del bentos marino de la red *BioFlow* (Jonsson *et al.*, 2006). En la figura también se presenta un esquema del comportamiento del perfil de velocidades cuando se produce el fenómeno del *velocity dip* o cuando la ley sigue la ley de la estela de Coles.

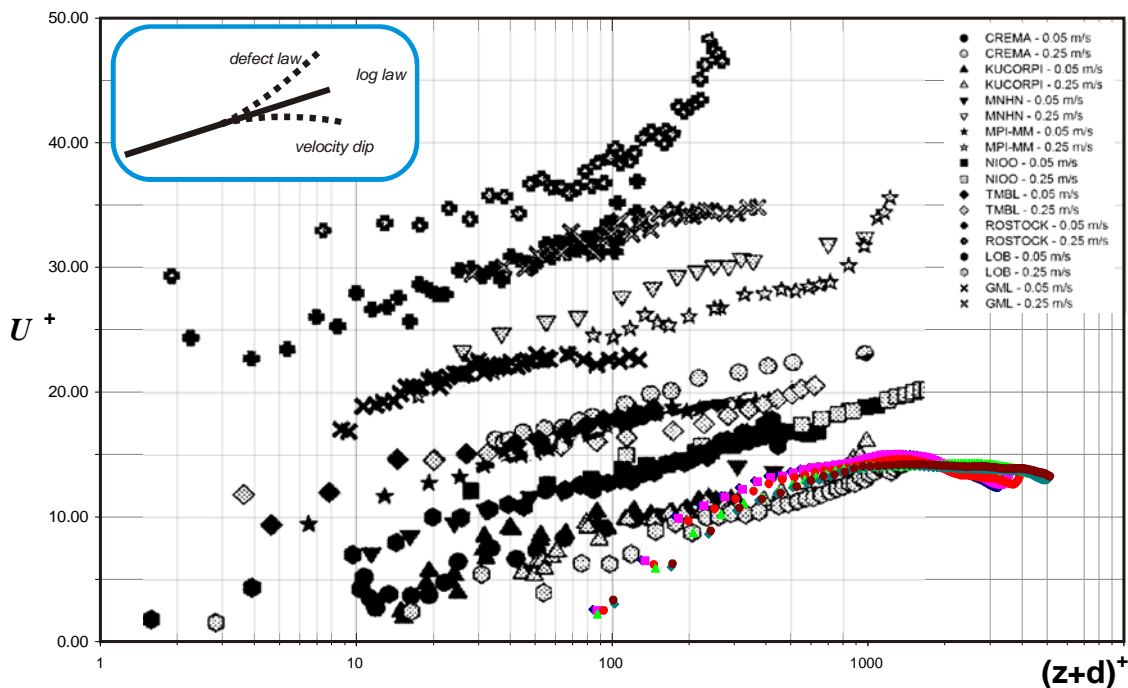


Figura 4.66. Comparación entre la distribución de las velocidades horizontales para los ensayos de fondo liso y las velocidades registradas en los canales de estudios del bentos de la red *BioFlow* (Jonsson *et al.*, 2006). Datos escalados con la variables interna u_* y v/u_* .

4.4.2.3. Intensidades turbulentas y tensiones de corte.

En la Figura 4.67 se presentan los perfiles de intensidades turbulentas doblemente promediadas $\langle \sigma_{ui}^- \rangle$ así como las intensidades turbulentas dispersivas o de forma $\langle \sigma_{ui}^- \rangle$, ambas adimensionalizadas con la velocidad de fricción. En la figura también se han representado las ecuaciones universales propuestas por Nezu y Nakagawa (1993) y Kironoto y Graf (1994), para flujo 2D sobre lecho liso y rugoso respectivamente (ver §2.5.3).

En esta figura se puede apreciar claramente el efecto de las corrientes secundarias y la no uniformidad del flujo sobre el perfil de intensidades turbulentas en ambas direcciones, u y w . Este es el motivo por el cuál no se parecen a los valores de referencia para flujo bidimensional. También se puede apreciar nuevamente como las curvas se solapan en dos familias, unas correspondientes a los ensayos V01 a V03 y el otro correspondiente a los ensayos V04 a V06.

En general se puede indicar que las intensidades turbulentas en la región más externa del flujo ($z/H > \sim 0.5$) para el primer grupo de ensayos siguen la tendencia de un flujo 2D, sin embargo, por debajo de esta región, la magnitud de las fluctuaciones decrece. La cota a la que se produce este fenómeno es similar a la posición del máximo de las velocidades verticales (Figura 4.65). En la región más cercana al lecho, los perfiles de intensidades turbulentas vuelven a presentar una tendencia creciente, con máximos en el entorno de $\sim 0.05 z/H$, posición similar a la encontrada en otros trabajos sobre lechos de arena hidráulicamente lisos o de transición (Bigillon *et al.*, 2006).

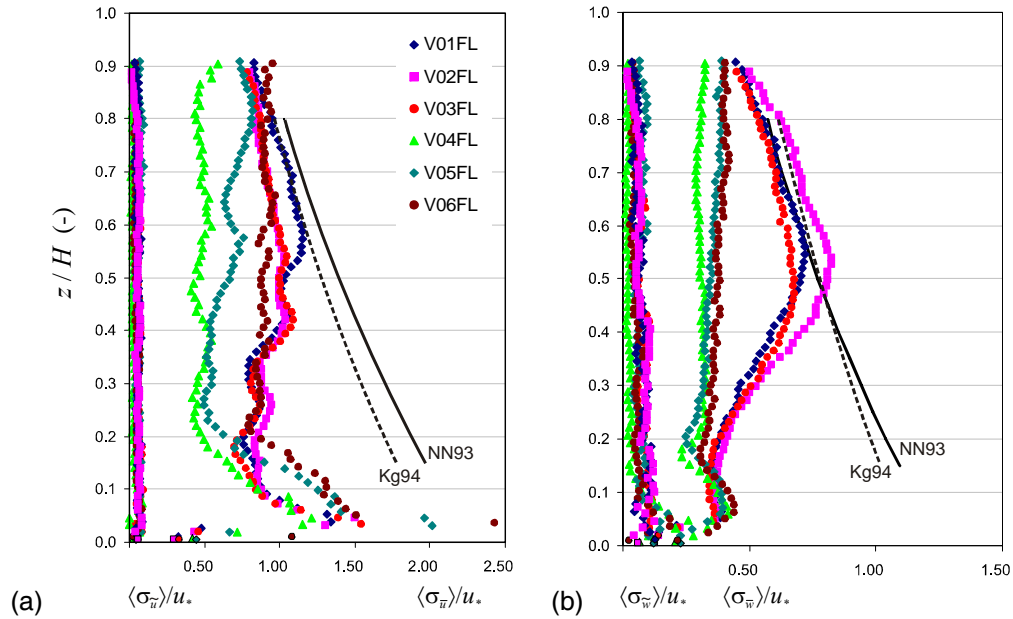


Figura 4.67. Perfiles de intensidades turbulentas de las componentes u y w , (a) y (b) respectivamente, de la velocidad doblemente promediada en los ensayos con el lecho de arena. Datos escalados con la variable interna u_* y con la externa calado H .

El comportamiento de las intensidades turbulentas en la dirección de la corriente de la segunda familia de ensayos se aleja más de los valores esperados para flujo bidimensional, probablemente porque en estos ensayos la no uniformidad del flujo juega un papel más importante. La distribución de intensidades de la velocidad vertical es casi constante, aunque a la altura de $\sim 0.20 z/H$, presenta un pequeño retroceso. Este fenómeno se atribuye a un efecto provocado por la visualización de la chapa que separaba las zonas de análisis de berberechos (Figura 4.60), que provoca un incremento artificial de la correlación de los vectores calculados y por tanto, un descenso de la turbulencia.

El valor de las intensidades turbulentas verticales de forma normalizadas con la velocidad de fricción en la región del lecho, $\langle \sigma_w \rangle / u_* \sim 0.2$, es similar al de otros trabajos sobre flujos lisos o de transición (Cameron *et al.*, 2008). Sin embargo, para la componente horizontal los valores determinados son ligeramente inferiores a los de la literatura, $\langle \sigma_u \rangle / u_* \sim 0.1$ vs ~ 0.4 . En el resto de la vertical, las tensiones de forma son prácticamente constantes y muy reducidas (~ 0.05), en la literatura y para la componente horizontal en estos ensayos. Nuevamente, el valor de la tensión de forma adimensional vertical (~ 0.1) es un tanto elevado lejos del contorno. Este incremento de la intensidad turbulenta y de las tensiones de forma verticales se atribuye al efecto de las corrientes secundarias sobre la estructura de las velocidades verticales.

En la Figura 4.68 se presentan los esfuerzos de corte de Reynolds y de forma doblemente promediados. En la figura se puede nuevamente apreciar el efecto de las corrientes secundarias sobre la distribución de tensiones y el agrupamiento en dos familias de ensayos.

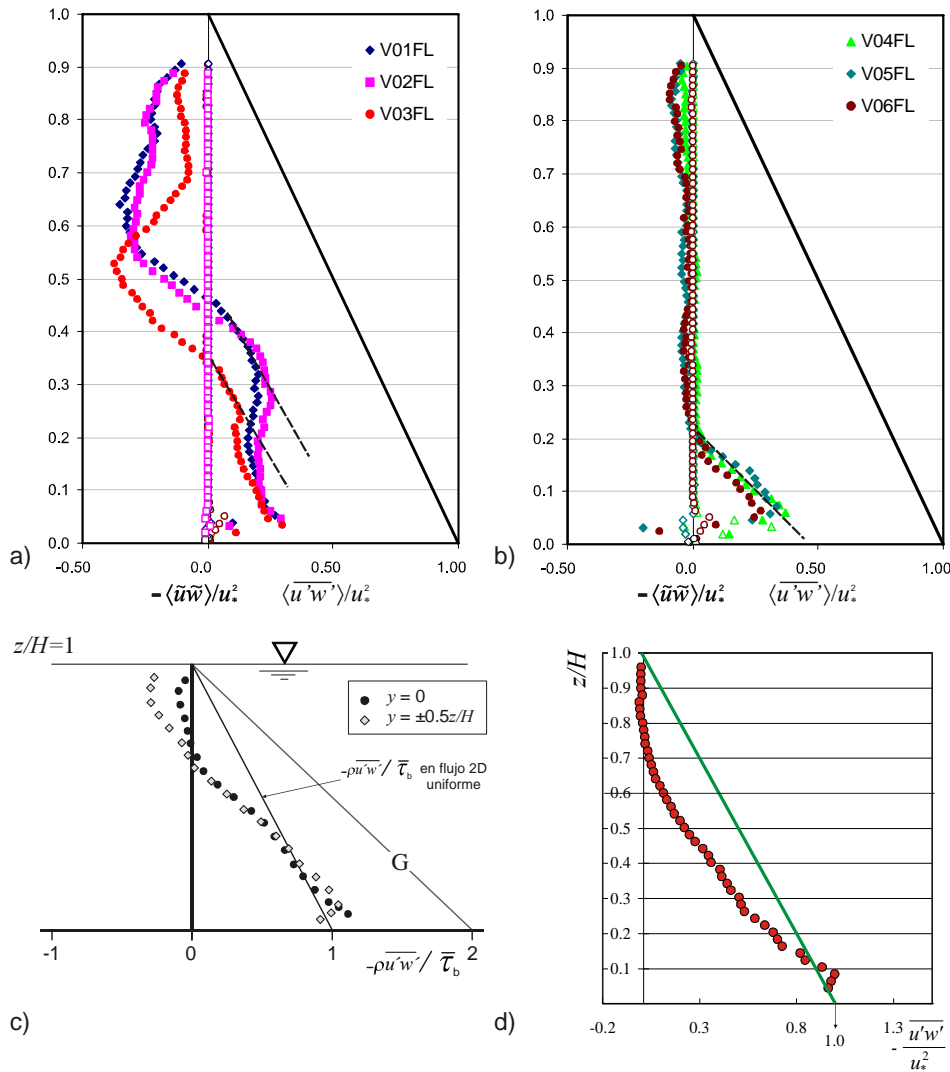


Figura 4.68. (a) y (b) Perfiles de esfuerzos de corte doblemente promediados en los ensayos con el lecho de arena. Datos escalados con la variable interna u_* y con la externa calado H . (c) y (d), ejemplos de la distribución de las tensiones de corte para un flujo 3D en un canal recto y para un flujo no uniforme 2D (datos de Nezu y Nakagawa, 1993 y Song, 1994).

En la figura también se presenta una comparación cualitativa de los perfiles con los datos de Nezu y Nakagawa (1993) para un canal recto de relación $B/H = 2$, con corrientes secundarias, y con los datos de flujo rugoso no uniforme acelerado de Song (1994). Aunque existen diferencias entre los datos experimentales con los de la literatura, se puede concluir que la tendencia de los mismos se ha recogido con bastante exactitud.

Lo más reseñable del análisis de los esfuerzos de corte está en cuantificar la importancia de la no uniformidad y de las corrientes secundarias sobre los valores de las tensiones de Reynolds. Existen pocas referencias en las que se cuantifiquen experimentalmente este fenómeno. Coleman *et al.* (2007b) realizaron unos experimentos sobre rugosidades de tipo $-k$ y $-d$ (ver

detalles en §2.4.4) en los que cuantificaron la importancia del efecto de las corrientes secundarias y la no uniformidad en el centro de un canal estrecho ($B/H = 3$) sobre la determinación de tensiones totales. Estos autores encontraron que la contribución de este término oscila entre un 40% y un 70% de la tensión de corte total sobre el lecho τ_0 .

Asumiendo que la velocidad de corte determinada a partir de la ley logarítmica de velocidades representa los esfuerzos tangenciales $\tau_0 (\propto u_*^2)$, en estos ensayos en un plano alejado del centro del canal se ha cuantificado la contribución de las tensiones de Reynolds en un $51\% \pm 5\%$ de las tensiones totales (ver apartado 4.4.2.1).

4.4.3. Ensayos por grupos de tamaños

4.4.3.1. Análisis estadístico

Análisis exploratorio

Para realizar el análisis exploratorio los datos registrados en los experimentos se jerarquizaron empleando los mismos factores y niveles que posteriormente se emplearon en el análisis de la varianza ANOVA:

- Velocidad: 6 niveles, empleando la velocidad media de cada ensayo calculada como se recoge en el apartado 4.4.2 (0.30, 0.32, 0.35, 0.39, 0.45 y 0.47 m/s)
- Talla: 4 niveles (<20 mm, 20-25 mm, 25-30 mm y >30 mm)
- Reclutamiento: 2 niveles (500 ind/m² y 1000 ind/m²)
- Estado: 2 niveles (moluscos vivos y muertos)

A partir de estos factores, se ha elaborado una nomenclatura para definir cualquier ensayo de una manera rápida y concisa. Así, de forma general los experimentos de grupos de talla se denominarán como una secuencia de 8 caracteres donde los tres primeros hacen referencia a la velocidad del ensayo (V01 a V06), la talla analizada (T01 a T04), el reclutamiento (B y A, para el bajo, 500 ind/m², y el alto, 1000 ind/m²) y el estado (V o M, en referencia a vivo o muerto). Por ejemplo, el ensayo V03T2AV hace referencia al tercer escalón de velocidad (0.35 m/s), la talla de 20-25 mm con una densidad de reclutamiento de 1000 ind/m² y con los bivalvos vivos. Esta nomenclatura se recoge también gráficamente en la Figura 4.69.

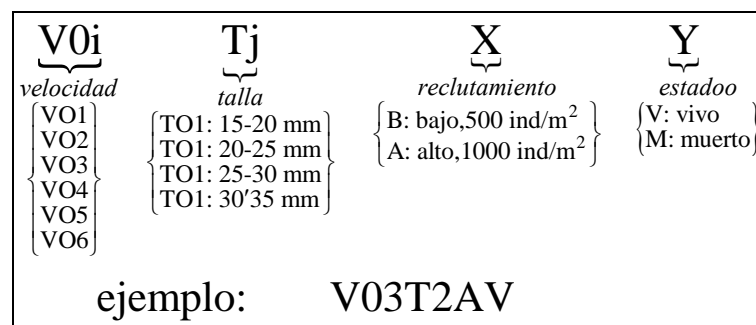


Figura 4.69. Esquema con la nomenclatura empleada en la denominación de los ensayos de grupos de tamaños

Para realizar el análisis exploratorio se empleó el software SPSS © v17 sobre los datos originales y también $\arcsin\sqrt{x}$ transformados, ecuación (4.25). Como se ha comentado en el

apartado 4.3.6.1, esta transformación es necesaria en los análisis de la varianza cuando se trabaja con variables que reflejan porcentajes.

El análisis exploratorio constó de varios pasos. El primero consistió en comprobar la normalidad de cada nivel analizado a través de los test de Shapiro-Wilk y Kolgomorov-Sminornov (ver p.ej. en Pérez, 2004), encontrado únicamente problemas con la distribución del quinto nivel de velocidad (velocidad media de 0.45 m/s) empleando los datos transformados. Hay que señalar que el rechazo de la hipótesis de normalidad se produjo únicamente con el contraste K-S. Además, y como se señala en el apartado 4.3.6 y en el Apéndice 2, trabajar con no-normalidades no repercute demasiado en la fiabilidad de los análisis ANOVA.

A continuación se analizó la distribución de las determinaciones realizadas con la ayuda de gráficos de cajas y bigotes. En este tipo de figuras (ver Figura 4.70) se dividen los datos en cuatro áreas de igual frecuencia, una caja central dividida en dos zonas por una línea vertical y otras dos áreas representadas por dos segmentos horizontales (los bigotes).

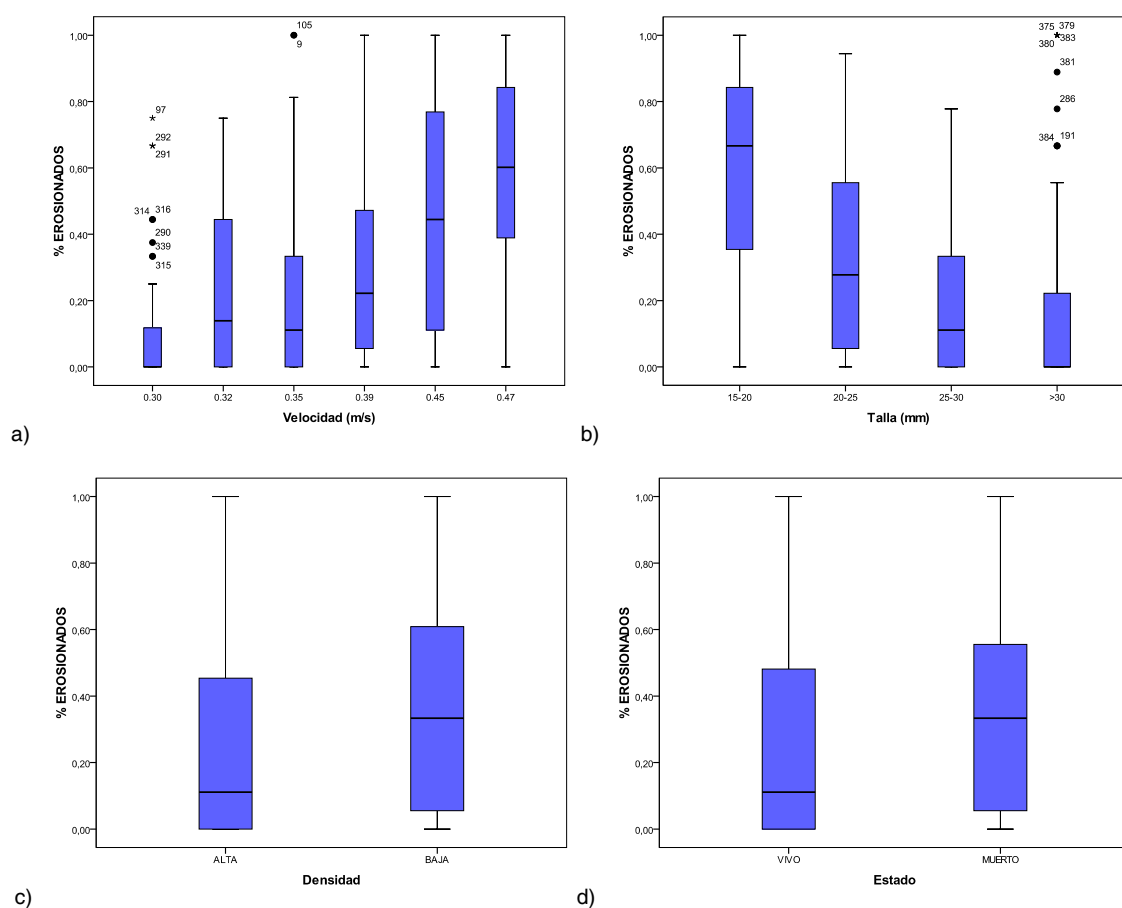


Figura 4.70. Gráficos de cajas y bigotes con el porcentaje de berberechos movilizados en cada uno de los factores analizados: a) velocidad, b) talla, c) reclutamiento y d) estado.

La caja central encierra el 50% de los datos y la línea que la divide representa la mediana de la distribución. Los lados de la caja están situados en los cuartiles (primer y tercer cuartil, denominados Q_1 y Q_3 respectivamente) de la distribución. Los extremos de los bigotes se sitúan a 1.5 veces el rango intercuartílico ($Q_3 - Q_1$) del borde la caja, y los datos anómalos

(*outliers*) se consideran en este tipo de representación como los situados fuera de los rangos marcados por los bigotes, y se representan como puntos en la Figura 4.70.

En esta figura, y en las tablas posteriores (Tabla 4.15 a Tabla 4.18) se han representado las gráficas de cajas y bigotes obtenidas para las variables sin transformar. En el análisis ANOVA se han empleado los datos $\arcsin\sqrt{x}$ transformados, sin embargo, para facilitar la comprensión y análisis de la movilización de los moluscos se ha preferido mostrar los datos del análisis exploratorio en la escala 0-100% y no en la escala transformada $0-\pi/2$.

De la observación del porcentaje de berberechos movilizado en función de cada uno de los factores analizados se pueden extraer varias conclusiones. En general se puede señalar aunque cada una de las cajas representadas representa un número elevado de muestras (p.ej., cada caja de Figura 4.70-a se ha construido en base a 4 repeticiones x 4 tallas x 2 densidades x 2 estados = 64), se observa cierta desviación respecto al valor medio. Esta variabilidad en los resultados se atribuye en parte a que se están promediando juegos de datos en los que no se puede atribuir la variación a un único parámetro. Es decir, la movilización de los moluscos en los experimentos realizados, aunque depende de la velocidad, también lo hace del estado, talla o densidad. Por este motivo, al analizar un parámetro sin los otros aparece la dispersión.

Otra fuente de variación se debe atribuir, además de al propio error experimental, al hecho de que la variable analizada no es una función continua porque los valores posibles del porcentaje de erosión están cuantizados en intervalos de 11.12% o 5.56%. Estos intervalos de variación dependen del número total de berberechos ensayados. Para la densidad de ~ 500 ind/m² se colocaron 9 berberechos, por lo que los valores posibles de la erosión son múltiplos de 1/9 (11.12%). Para la densidad de ~ 1000 ind/m² se colocaron 18 berberechos, siendo los valores de la erosión múltiplos de 1/18 (5.56%). Esta cuantización de la variable afecta a la precisión y dispersión de la misma ya que cometer un error en el ensayo, contar un berberecho como erosionado cuando en realidad se mantuvo en su sitio, implica cometer un error superior al 10% en el peor de los casos.

Las tendencias reflejadas en la Figura 4.70 se cuantifican en la Tabla 4.15 y Tabla 4.16. Del análisis de cada variable de modo independiente, es decir, promediando sobre todas las repeticiones y escenarios del resto de variables (p.ej. al analizar el reclutamiento alto, se promedian todos los escenarios con sus repeticiones donde el reclutamiento fue de 1000 ind/m², sin importar la velocidad, estado o talla) se pueden extraer las siguientes conclusiones.

Con respecto a la **velocidad**, tal y como cabría esperar, a mayor velocidad de la corriente, mayor grado de movilización de los berberechos (ver Tabla 4.15). Así, para una velocidad media de ~ 0.3 m/s el porcentaje de berberechos medio movilizado es de un $\sim 10\%$ mientras que para una velocidad de ~ 0.5 m/s asciende a un $\sim 58\%$. Esta relación es aproximadamente lineal, con la excepción de lo que sucede en los escalones de velocidad número 2 y 3, donde a pesar de presentar diferentes velocidades medias (0.315 y 0.346 m/s respectivamente), el porcentaje de berberechos movilizados es prácticamente el mismo. Esta circunstancia se analizará estadísticamente después de presentar el análisis de la varianza, pero está relacionada con la interacción entre el transporte de sedimentos y el de moluscos.

Tabla 4.15. Porcentaje de berberechos movilizado en función de la velocidad de la corriente y de la talla. Valores medios y error estándar (σ/\sqrt{n}). Los parámetros estado y reclutamiento están agregados en los anteriores.

TALLA	% MOVILIZADOS	VELOCIDAD						TODOS
		V01 0.298 m/s	V02 0.315 m/s	V03 0.346 m/s	V04 0.391 m/s	V05 0.446 m/s	V06 0.471 m/s	
15-20 mm	Media	25.1%	50.6%	49.0%	71.8%	77.3%	84.5%	59.7%
	SE (n=16, 96)	0.059	0.044	0.076	0.058	0.052	0.038	0.030
20-25 mm	Media	12.8%	30.9%	26.0%	22.6%	43.4%	52.0%	31.3%
	SE (n=16, 96)	0.040	0.066	0.056	0.044	0.074	0.063	0.027
25-30 mm	Media	2.4%	14.9%	16.3%	10.9%	20.9%	45.3%	18.5%
	SE (n=16, 96)	0.021	0.039	0.046	0.038	0.056	0.061	0.000
30 - 35 mm	Media	0.0%	0.3%	0.0%	18.5%	34.3%	50.0%	17.2%
	SE (n=16, 96)	0.000	0.003	0.000	0.060	0.081	0.084	0.029
15 - 35 mm (TODOS)	Media	10.1%	24.2%	22.8%	30.9%	44.0%	57.9%	31.7%
	SE (n=64, 384)	0.022	0.032	0.034	0.039	0.042	0.037	0.016

Otro comportamiento no lineal, que sólo se observa si se analiza el porcentaje de berberechos movilizados en los pares talla-velocidad, consiste en una reducción de los berberechos movilizados entre el segundo y tercer escalón (0.315 y 0.346 m/s) de velocidad para la talla más pequeña, entre el tercer y el cuarto escalón de velocidad (0.346 y 0.391 m/s) para las tallas de 20-25 y 25-30 mm, (ver gráficamente en la Figura 4.72, pág.4.115). Para la talla mayor este efecto no se observa.

Este descenso de la movilización de los berberechos se debe al inicio del transporte de la arena del lecho. Para estas velocidades, se ha constatado visualmente que la movilización de la arena comenzaba a ser importante y los berberechos eran enterrados progresivamente provocando una reducción de la tasa de transporte.

Como se ha comentado en el apartado 4.4.2.1 (Tabla 4.12), el número de Froude densimétrico o parámetro de Shields para los ensayos de fondo liso superar al del umbral de movimiento entorno al segundo / tercer escalón de velocidad (adoptando un parámetro de Shields crítico de ~ 0.030 propuesto por ejemplo por Wong y Parker, 2006). Por tanto, para estas condiciones de velocidad, los moluscos pueden quedar parcial o totalmente enterrados por la arena antes de que se produzca su arrastre. Sin embargo, cuando la potencia del flujo aumenta, los bivalvos son arrastrados antes de que puedan ser enterrados. Además, como los berberechos más pequeños son más fácilmente erosionables, el descenso de la movilización se reduce sólo al segundo y tercer nivel de velocidad.

Si se analiza la evolución de la erosión media en cada **talla** se puede observar una relación inversa entre el porcentaje de berberechos movilizados y el tamaño del mismo. Así, para la menor talla, se puede indicar que en promedio para todas las velocidades estudiadas, se movilizaron un $\sim 60\%$ de los moluscos, mientras que los moluscos de mayor tamaño, la movilización se redujo hasta un $\sim 18\%$.

También se puede comprobar en la Tabla 4.15 cómo el porcentaje medio de los berberechos movilizados entre 25-30 mm y 30-35 mm es prácticamente el mismo. Sin embargo, si se analiza a través de los pares de velocidad – talla, la movilización de los moluscos

comprendidos entre 25-30 mm es superior para las velocidades más bajas, mientras que para las velocidades mayores, la movilización de los berberechos de 30-35 mm es ligeramente superior, quizás por el efecto de la mayor exposición y menor importancia del movimiento de arena que puede enterrar más a los berberechos más pequeños.

Los parámetros medios de movilización en función del reclutamiento y estado se presentan en la Tabla 4.16. Respecto al **reclutamiento**, se puede señalar que en términos medios, la erosión es superior en los experimentos de menor densidad de individuos por metro cuadrado (~37% vs ~26%), diferencias originadas por la mayor exposición a la que se encuentran sometidos los berberechos cuando están más aislados.

Tabla 4.16. Porcentaje de berberechos movilizado en función del estado y el reclutamiento. Valores medios y error estándar (σ/\sqrt{n}). Los parámetros velocidad de la corriente y talla están agregados en los anteriores.

DENSIDAD	% MOVILIZADOS	ESTADO		
		Vivos	Muertos	TODOS
BAJA (500 ind/m ²)	Media	30.9%	43.2%	37.0%
	SE (n=96, 192)	0.032	0.030	0.022
ALTA (1000 ind/m ²)	Media	24.7%	27.9%	26.3%
	SE (n=96, 192)	0.033	0.032	0.023
TODOS	Media	27.8%	35.5%	31.7%
	SE (n=192, 384)	0.045	0.022	0.016

También se ha constado que el comportamiento o **estado** de los berberechos parece influir en los ratios de movilización. Así, los berberechos vivos se mantienen o fijan más que los muertos (porcentajes de movilización medio de ~28%. y ~36%. respectivamente). Ya se ha comentado en el apartado 4.2.3 que en la dinámica de las poblaciones de los organismos bentónicos factores como la sedimentación activa, p.ej. a través de la generación de biso o a través de la natación de algunas larvas, pueden influir en el proceso de selección del sustrato.

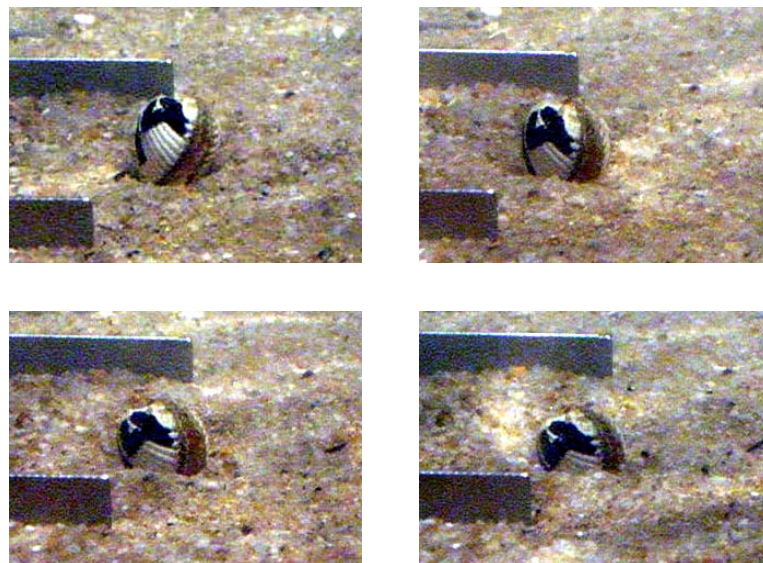


Figura 4.71. Secuencia de video en la que un berberecho se coloca de forma lateral y comienza a enterrarse.

En estos ensayos no se ha detectado la formación de biso por parte de los berberechos. Esta circunstancia era previsible ya que los moluscos eran adultos y este fenómeno se ha descrito fundamentalmente en individuos juveniles (Sidgursson *et al.*, 1976; Yankson, 1986; Olivier y Retière, 2006). Sin embargo, si se ha observado que cuando los berberechos vivos “sentían” el movimiento del agua, algunos se recolocaban, ubicando las valvas en perpendicular al lecho y comenzaban a abrir y cerrar la concha para, con ayuda del pie, anclarse y enterrarse (ver en la Figura 4.71).

Los datos correspondientes a cada uno de los escenarios analizados se presentan en las tablas siguientes (Tabla 4.17 y Tabla 4.18).

Tabla 4.17. Porcentaje medio de berberechos vivos movilizados en los ensayos por grupos de tamaños homogéneos. Valores medios y error estándar (σ/\sqrt{n}).

DENSIDAD	TALLA	% MOVILIZADOS	VELOCIDAD (m/s)					
			0.298	0.315	0.346	0.391	0.446	0.471
BAJA 500 ind/m ²	15-20 mm	Media SE (n=4)	26.7% 0.129	52.1% 0.076	66.7% 0.141	81.5% 0.026	81.5% 0.094	85.2% 0.069
	20-25 mm	Media SE (n=4)	11.1% 0.035	37.8% 0.125	37.8% 0.083	8.3% 0.053	25.0% 0.178	59.3% 0.026
	25-30 mm	Media SE (n=4)	0.0% 0.000	11.1% 0.086	15.6% 0.097	13.9% 0.028	5.6% 0.032	55.6% 0.079
	30-35 mm	Media SE (n=4)	0.0% 0.000	0.0% 0.000	0.0% 0.000	14.8% 0.052	11.1% 0.079	37.0% 0.114
ALTA 1000 ind/m ²	15-20 mm	Media SE (n=4)	21.9% 0.133	43.8% 0.136	47.5% 0.193	79.6% 0.130	85.2% 0.148	92.6% 0.049
	20-25 mm	Media SE (n=4)	1.1% 0.011	7.8% 0.038	6.7% 0.021	33.3% 0.060	50.0% 0.171	22.2% 0.138
	25-30 mm	Media SE (n=4)	0.0% 0.000	6.7% 0.032	0.0% 0.000	1.9% 0.013	18.5% 0.080	35.2% 0.114
	30-35 mm	Media SE (n=4)	0.0% 0.000	1.1% 0.011	0.0% 0.000	3.7% 0.026	20.4% 0.086	46.3% 0.206

Tabla 4.18. Porcentaje medio de berberechos muertos movilizados en los ensayos por grupos de tamaños homogéneos. Valores medios y error estándar (σ / \sqrt{n}).

DENSIDAD	TALLA	% MOVILIZADOS	VELOCIDAD (m/s)					
			0.298	0.315	0.346	0.391	0.446	0.471
BAJA 500 ind/m ²	15-20 mm	Media SE (n=4)	43.6% 0.055	46.9% 0.067	65.0% 0.048	58.3% 0.045	73.3% 0.072	75.0% 0.000
	20-25 mm	Media SE (n=4)	37.0% 0.098	51.1% 0.092	50.0% 0.041	33.3% 0.166	50.0% 0.114	55.6% 0.115
	25-30 mm	Media SE (n=4)	6.7% 0.067	28.9% 0.044	26.7% 0.097	25.0% 0.123	40.0% 0.130	52.8% 0.146
	30-35 mm	Media SE (n=4)	0.0% 0.000	0.0% 0.000	0.0% 0.000	44.4% 0.280	77.8% 0.128	77.8% 0.101
ALTA 1000 ind/m ²	15-20 mm	Media SE (n=4)	20.0% 0.048	66.9% 0.081	37.7% 0.108	66.7% 0.192	75.9% 0.165	85.2% 0.093
	20-25 mm	Media SE (n=4)	1.9% 0.012	27.8% 0.117	30.3% 0.125	15.3% 0.116	48.6% 0.164	73.6% 0.105
	25-30 mm	Media SE (n=4)	0.9% 0.009	15.7% 0.087	18.5% 0.059	2.8% 0.028	18.1% 0.069	37.5% 0.153
	30-35 mm	Media SE (n=4)	0.0% 0.000	0.0% 0.000	0.0% 0.000	13.9% 0.048	27.8% 0.118	38.9% 0.195

Análisis de la varianza

Todas las tendencias reflejadas en el análisis exploratorio deben ser confirmadas para ver si realmente tienen significación estadística. Para comprobar este aspecto, se ha realizado un análisis ANOVA de todos los factores con un modelo de 4 factores fijos en el que se han incluido todas las interacciones. Los análisis se han realizado con juegos de datos equilibrados.

Antes de ejecutar el ANOVA, se ha realizado el test de Cochran para comprobar la homogeneidad de las varianzas. Previamente los datos fueron $\arcsin\sqrt{x}$ transformados (§4.3.6, ecuación (4.25)).

El valor del estadístico C, calculado de acuerdo con la ecuación (4.24), ha sido de 0.0562. El valor de la función de distribución $C[a, v; \alpha]$, para $a=96$ varianzas (6 velocidades x 4 tallas x 2 reclutamientos x 2 estados), $v=3$ grados de libertad de cada varianza ($n-1$ repeticiones) y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, ha sido 0.0599, superior al valor del estadístico C por lo que se puede considerar que las varianzas son homogéneas.

En la Tabla 4.19 se recoge el resumen del ANOVA. Una definición del significado de cada columna se presenta en el Apéndice 2. Aquí únicamente nos referiremos al resultado del contraste, que se puede determinar con los resultados de las dos últimas columnas: el nivel de significancia y la potencia del test. Así, en el análisis se puede observar cómo cada uno de los factores individuales afecta significativamente ($P \lll 0.001$) a la movilización de los berberechos. Sin embargo, también se pueden apreciar que algunas interacciones también afectan a la movilización. Son significativas ($P < 0.05$) algunas interacciones de primer orden

(Velocidad x Talla, Talla x Estado y Densidad x Estado) y también algunas de segundo (Velocidad x Talla x Densidad, Velocidad x Talla x Estado).

Tabla 4.19. Análisis de la varianza de 4 factores con un modelo factorial con todas las interacciones para el análisis de la velocidad, talla, reclutamiento y estado sobre el porcentaje de berberechos movilizados. Ensayo de grupos de tallas.

Fuente de Variación	SS Suma de Cuadrados	df Grados de libertad	MS Media cuadrática	F	P Nivel significancia	1-β Potencia estadística ^b
Modelo	162.290 ^a	96	1.691	24.015	< 0.001*	>0.999
Velocidad (VEL)	18.566	5	3.713	52.750	< 0.001*	>0.999
Talla (TALLA)	22.879	3	7.626	108.338	< 0.001*	>0.999
Densidad (DEN)	1.971	1	1.971	28.000	< 0.001*	>0.999
Estado (EST)	1.144	1	1.144	16.258	< 0.001*	0.980
VEL x TALLA	3.591	15	0.239	3.401	< 0.001*	0.999
VEL x DEN	0.631	5	0.126	1.794	0.114	0.612
VEL x EST	0.137	5	0.027	0.389	0.856	0.151
TALLA x DEN	0.323	3	0.108	1.531	0.207	0.403
TALLA x EST	0.607	3	0.202	2.875	0.037*	0.684
DEN x EST	0.435	1	0.435	6.180	0.013*	0.698
VEL x TALLA x DEN	2.402	15	0.160	2.274	0.005*	0.979
VEL x TALLA x EST	1.798	15	0.120	1.703	0.050*	0.913
VEL x DEN x EST	0.568	5	0.114	1.614	0.156	0.559
TALLA x DEN x EST	0.307	3	0.102	1.456	0.227	0.384
VEL x TALLA x DEN x EST	1.744	15	0.116	1.652	0.060	0.902
Error	20.273	288	0.070			
Total	182.563	384				

^a. $R^2 = 0.889$ (R^2 ajustado = 0.852)

^b. Potencia 1-β calculada para $\alpha = 0.05$

*. $P < 0.05$

Además de la significancia (determinada como el error de Tipo I dado por el valor de P), es importante analizar la potencia del test ANOVA (definida como la unidad menos el error Tipo II). En la Tabla 4.19 se puede comprobar como la mayoría de los factores, todos los principales y todas las interacciones que involucran al factor Velocidad x Talla, tienen una elevada potencia estadística, siempre superior al 90%. Los factores secundarios Talla x Estado y Densidad x Estado, tienen una potencia cercana al 70%, que está un poco por debajo del límite de lo que se podría considerar como un resultado significativo⁹⁰.

Análisis a posteriori de los factores principales

Una vez determinados los factores que afectan significativamente a la movilización de los berberechos, se deben analizar que niveles de cada factor (p.ej. velocidades) repercuten sobre el arrastre de los moluscos. Con este fin, se aplicarán a continuación una serie de contrastes a

⁹⁰ Al contrario de lo que ocurre con el Error de Tipo I (que se establece por convenio en $\alpha = 0.05$), no existe un consenso claro a la hora de definir el Error de Tipo II admisible, y por tanto la potencia estadística. Valores habituales para la potencia están en el orden de 0.80, aunque es preferible que esta sea superior a 0.90 – 0.95. Underwood, (1997).

posteriori o test *post hoc*. Hay que señalar que cuando las interacciones de un ANOVA de varios factores son significativas, el análisis a posteriori debe realizarse con un poco más de precaución ya que las conclusiones no son tan directas como cuando no existen interacciones entre los factores (Underwood, 1981).

Sino existen interacciones, los test a posteriori se realizan sobre cada factor de modo individual. En nuestro caso, podríamos resolver el análisis con cuatro test de comparación múltiple, uno para cada factor: velocidad, talla, estado y reclutamiento. Sin embargo, cuando existen interacciones, este procedimiento no proporciona toda la información disponible en el análisis. Para estas situaciones, se deben realizar test de comparación sobre las medias del primer factor en cada uno de los niveles del segundo factor con el que interactúa, y viceversa. Volviendo al análisis de movilización de los berberechos, si p.ej. sólo interactuase la velocidad y el estado, habría que realizar un total de $6 + 2$ tests de comparación. Dos tests compararían el efecto de las velocidades en los moluscos vivos y muertos (los niveles del factor estado) respectivamente, y otros 6 contrastes compararían la influencia del estado (vivo/muerto) en cada escalón de velocidad.

Como se puede apreciar, este procedimiento puede ser largo y tedioso, especialmente cuando los factores tienen muchos niveles, existen muchos factores involucrados, aparecen interacciones de orden segundo o tercer orden, o cuando además se van a realizar varios tipos de test *post hoc* para cada factor. Por este motivo, en el procedimiento de contraste a posteriori aquí presentado se ha optado por analizar inicialmente los factores principales como sino existiesen interacciones. Aunque este procedimiento no proporciona tanta información ni tiene tanta significancia estadística como el análisis detallado, sí que da una idea del comportamiento del arrastre en los diferentes niveles de cada factor analizado.

Esta comparación se ha realizado con el test SNK, completando con el de Ryan para reducir los errores de Tipo I, y con el contraste Tukey HSD, para los factores de tres o más niveles; cuando los factores tienen dos niveles, el contraste empleado es el *t* de Student (ver apartado 4.3.6 y Apéndice 2).

En la Tabla 4.20 se presenta el cálculo detallado del test SNK y Ryan para el **factor velocidad**. Para realizar estos test en primer lugar se deben ordenar en orden creciente las medias⁹¹, de esta forma se podrán formar las parejas para ejecutar el test.

La idea subyacente de este contraste es que si dos medias son diferentes (porque así lo señala el ANOVA), lo más probable es que sean las que se corresponden con los valores extremos. Una vez comprobadas estas medias, se pasa a probar la más baja con la segunda más alta, y así sucesivamente. El siguiente paso será comprobar la segunda más baja, con la más alta, con la segunda más alta, etc... Este procedimiento de comprobación se esquematiza en la Tabla 4.20, donde en la columna correspondiente a la velocidad con menor media (0.298 m/s), se van calculando la diferencia de la medida con la media más alta y la media de la primera columna (6-1), la de la segunda media más alta y la de la primera columna (5-1) y así sucesivamente. Hay que señalar que la segunda velocidad del test de comparación se corresponde con el tercer escalón de velocidad V03 de los ensayos. Esto es así, porque en promedio se movilizaron más berberechos en el segundo escalón V02 que en el tercer escalón

⁹¹ Todos los tests de comparación múltiple se han ejecutado con los datos $\arcsin\sqrt{x}$ transformados, por las medias comparadas no reflejan directamente los valores reales de movilización de los moluscos.

V03 por el efecto del transporte de sedimentos ya comentado (ver en este apartado el epígrafes sobre el análisis exploratorio, pág. 4.103, y también la Tabla 4.15).

Este es el procedimiento del test. Una vez calculadas las diferencias, se debe estimar el error estándar de la diferencia entre las medias. Cuando el análisis es de un único factor, el error estándar SE se estima como:

$$SE = \sqrt{\frac{MS_{residuo}}{n}} \quad (4.33)$$

donde n es el número de repeticiones.

Cuando se realiza un análisis de varios factores, n debe representar el número de medidas empleadas en el análisis. En el caso del análisis de la velocidad serían 6 velocidades x 4 repeticiones (ver Underwood (1981) para el caso general).

Tabla 4.20. Aplicación del método de comparaciones múltiples SNK y Ryan para el factor principal velocidad. La significancia del test ($\alpha=0.05$) SNK se marca en tipografía negrita y la del test de Ryan con un asterisco.

VELOCIDAD	0.298	0.346	0.315	0.391	0.446	0.471	TEST SNK			TEST RYAN		
ORDEN	1	2	3	4	5	6	g	Q^b	$D=Q \cdot SE^c$	α'	Q	$D=Q_{\alpha'} \cdot SE$
MEDIA ^a	0.204	0.401		0.537	0.706	0.879						
COMPARACIONES	6-1 0.675*						6	4.197	0.197	0.050	4.197	0.197
	5-1 0.502*	6-2 0.479*					5	4.008	0.188	0.042	4.104	0.192
	4-1 0.335*	5-2 0.306*	6-3 0.468*				4	3.764	0.176	0.034	3.981	0.187
	3-1 0.207*	4-2 0.138	5-3 0.295*	6-4 0.341*			3	3.42	0.160	0.025	3.802	0.178
	2-1 0.196*	3-2 0.011	4-3 0.127	5-4 0.167*	6-5 0.173*		2	2.843	0.133	0.017	3.481	0.163

^a. arcsin $\sqrt{\text{transformada}}$

^b. para $\nu=48$ grados de libertad

^c. $SE = \sqrt{(MS_{error}/24)} = 0.0469$

A continuación, se debe estimar el número de medias que se comparan g . En la primera fila se compara a lo largo de 6 medias, en la segunda, a lo largo de cinco, y así sucesivamente (ver Tabla 4.20). Para cada comparación se debe estimar el valor del estadístico Q o *Studentized Q range*, que es función de g y de los grados de libertad ν del análisis. En el caso de las velocidades $\nu = 48 = 4$ repeticiones x 4 tallas x 2 densidades x 2 estados. Como ya se ha indicado, el valor de Q (para un valor de $\alpha=0.05$) se puede encontrar tabulado p.ej. en Winer (1991). El último paso es comparar el valor estimado de la diferencia de cada pareja con el valor del producto del estadístico Q por el error estándar. Si la diferencia es mayor que $Q \cdot SE$ se tiene que las medias de la pareja comparada son significativamente diferentes, con un nivel $\alpha=0.05$.

Por último, para aplicar el método de Ryan, el procedimiento es similar, salvo que en vez de emplear el valor de $Q_{\alpha=0.05}$ se emplea el valor $Q_{\alpha'}$ calculado con el procedimiento explicado en el apartado 4.3.6 (ver ecuación (4.23)).

Los resultados del contraste SNK señalan que todas las velocidades afectan de un modo significativamente diferente a la movilización de los berberechos, a excepción del grupo formado por las velocidades 2, 3 y 4 (0.346, 0.315 y 0.391 o V03, V02 y V04). Se puede decir

la diferencia en el porcentaje de berberechos erosionados no es estadísticamente significativo para estas velocidades.

Los resultados del contraste de Ryan son los mismos que los arrojados con el test SNK. Los datos del contraste Tukey HSD, realizado con SPSS ©), aparecen en la Tabla 4.21. Según este test, las medias de los niveles 2-3 son similares, y la del nivel 2-4, sin embargo si que encuentra diferencias significativas entre el nivel 3 y el 4.

Tabla 4.21. Aplicación del método de comparaciones múltiples Tukey HSD para el factor principal velocidad. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.

VELOCIDAD	(i)	(j)	Diferencia media (i-j)	P - Nivel significancia	I.C. 95%	
					Lím. inf.	Lím. sup.
0.298 m/s	1	2	-0.207*	<0.001	-0.342	-0.073
		3	-0.196*	0.001	-0.331	-0.062
		4	-0.334*	<0.001	-0.469	-0.200
		5	-0.502*	<0.001	-0.637	-0.367
		6	-0.675*	<0.001	-0.810	-0.541
0.346 m/s	2	1	0.207*	<0.001	0.073	0.342
		3	0.011	1.000	-0.123	0.146
		4	-0.127	0.076	-0.262	0.007
		5	-0.295*	<0.001	-0.429	-0.160
		6	-0.468*	<0.001	-0.603	-0.334
0.315 m/s	3	1	0.196*	0.001	0.062	0.331
		2	-0.011	1.000	-0.146	0.123
		4	-0.138*	0.040	-0.273	-0.004
		5	-0.306*	<0.001	-0.440	-0.171
		6	-0.479*	<0.001	-0.614	-0.345
0.391 m/s	4	1	0.334*	<0.001	0.200	0.469
		2	0.127	0.076	-0.007	0.262
		3	0.138*	0.040	0.004	0.273
		5	-0.167*	0.006	-0.302	-0.033
		6	-0.341*	<0.001	-0.475	-0.206
0.446 m/s	5	1	0.502*	<0.001	0.367	0.637
		2	0.295*	<0.001	0.160	0.429
		3	0.306*	<0.001	0.171	0.440
		4	0.167*	0.006	0.033	0.302
		6	-0.173*	0.004	-0.308	-0.039
0.471 m/s	6	1	0.675*	<0.001	0.541	0.810
		2	0.468*	<0.001	0.334	0.603
		3	0.479*	<0.001	0.345	0.614
		4	0.340*	<0.001	0.206	0.475
		5	0.173*	0.004	0.039	0.308

Los resultados de los test a posteriori confirman la interacción entre la el transporte de arena y el de sedimentos, ya que los niveles en los que no existen diferencias en la movilización significativas (2-3-4) son las velocidades en las que comienza el movimiento de arena.

El mismo análisis se ha realizado para el **factor de Talla**. Los resultados de los test de Student-Neuman-Keuls y del contraste de Ryan se encuentran en la Tabla 4.22, mientras que los resultados del contraste Tukey HSD, en la Tabla 4.23.

Se puede observar como la movilización de los berberechos es significativamente diferente entre todos los pares de grupos de tallas, a excepción del grupo de tamaño 25-30 y 30-35 mm, donde estadísticamente el tamaño no influye en el arrastre de los berberechos.

Tabla 4.22. Aplicación del método de comparaciones múltiples SNK y Ryan para el factor principal talla. La significancia del test ($\alpha=0.05$) SNK se marca en tipografía **negrita** y la del test de Ryan con un **asterisco**.

TALLA	30-35 mm	25-30 mm	20-25 mm	15-20 mm	TEST SNK			TEST RYAN		
ORDEN	1	2	3	4	g	Q	D=QxSE ^b	α'	Q	D=Q _{α'} xSE
MEDIA ^a	0.299	0.344	0.534	0.917						
COMPARACIONES	⁴⁻¹ 0.619*				4	3.701	0.1417	0.050	3.701	0.142
	³⁻¹ 0.235*	⁴⁻² 0.574*			3	3.500	0.1340	0.038	4.104	0.157
	²⁻¹ 0.045	³⁻² 0.190*	⁴⁻³ 0.384*		2	2.808	0.1075	0.025	3.518	0.135

^a. arcsin $\sqrt{\text{transformada}}$

^b. SE= $\sqrt{(MS_{\text{error}}/96)}=0.0383$

Tabla 4.23. Aplicación del método de comparaciones múltiples Tukey HSD para el factor principal talla. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un **asterisco**.

TALLA	(i)	(j)	Diferencia media (i-j)	P - Nivel significancia	I.C. 95%	
					Lím. inf.	Lím. sup.
15-20 mm	1	2	0.384*	<0.001	0.285	0.483
		3	0.574*	<0.001	0.475	0.673
		4	0.619*	<0.001	0.520	0.718
20-25 mm	2	1	-0.384*	<0.001	-0.483	-0.285
		3	0.190*	<0.001	0.091	0.289
		4	0.235*	<0.001	0.136	0.334
25-30 mm	3	1	-0.574*	<0.001	-0.673	-0.475
		2	-0.190*	<0.001	-0.289	-0.091
		4	0.045	0.642	-0.054	0.144
30-35 mm	4	1	-0.619*	<0.001	-0.718	-0.520
		2	-0.235*	<0.001	-0.334	-0.136
		3	-0.045	0.642	-0.144	0.054

Para los **factores Estado y Densidad** se ha aplicado el contraste *t* de Student con el programa SPSS ©. El contraste se ha realizado asumiendo, y comprobando, la homogeneidad de varianzas a través del contraste de Levene.

Los resultados de este test están incluidos en la Tabla 4.24, y señalan que los dos niveles de cada factor afectan significativamente a la movilización. Es decir, tanto la densidad como el

estado de los berberechos influyen en su movilización. Así, el arrastre es mayor para la densidad más baja y para los berberechos muertos.

Tabla 4.24. Aplicación del contraste *t* de Student a los factores Densidad y Estado. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.

Factor	t	df Grados de libertad	P -Nivel significancia (t dos colas)	diferencia media ^a	SE diferencia ^a	I.C. 95%	
						Lím. inf.	Lím. sup.
Densidad	-3.160	382	<0.002*	-0.143	0.045	-0.232	-0.054
Estado	-2.395	382	0.017*	-0.109	0.046	-0.199	-0.020

^a. arcsin $\sqrt{\text{transformada}}$

Análisis a posteriori de las interacciones

Aunque en las tablas anteriores (Tabla 4.20 a Tabla 4.24) se han aplicado contrastes múltiples a los niveles de los factores primarios, hay que señalar que los resultados arrojados por estos test no son concluyentes, ya que se existen interacciones entre varios factores. Por este motivo, la interpretación de los test sobre los factores principales, aunque proporciona cierta información, puede llegar a desorientar sobre las conclusiones ya que los efectos de un factor varían en los niveles del otro(s) factor(es) con el que interactúa(n), y viceversa (Underwood, 1981). Un ejemplo de esta interacciones se encuentra entre las velocidades y las tallas. Ya se ha comentado, que el efecto de cada nivel (escalón) de velocidad afecta de modo diferente sobre el número de berberechos arrastrados en función de su talla.

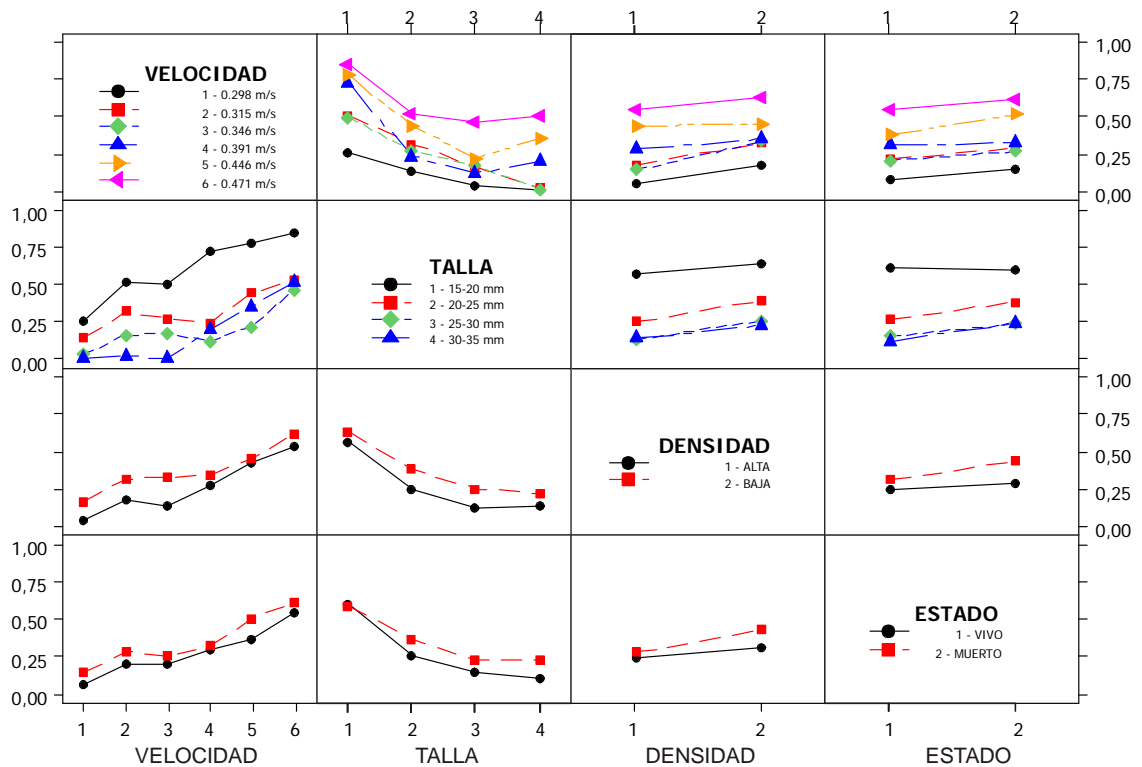


Figura 4.72. Gráfica de interacciones entre los factores principales del análisis. Ensayo de grupos de tallas.

Para representar estos efectos combinados, se debe analizar una gráfica de interacciones, como la presentada en la Figura 4.72. En estas representaciones se pueden analizar de un modo rápido e intuitivo las interacciones de primer orden del Análisis de la Varianza. La lectura de este tipo de gráficas se debe realizar atendiendo a las siguientes indicaciones: (i) la información sobre los niveles analizados se ordena por filas, (ii) cada fila contiene la información del factor que se encuentra en la diagonal principal de la matriz y, (iii) la información relativa al segundo término de la interacción se ordena por columnas.

Así, por ejemplo, si queremos analizar la interacción Talla x Densidad de reclutamiento debemos analizar la gráfica de la matriz situada en la segunda fila y en la tercera columna, subfigura (2,3). En esta gráfica se representan para cada Talla el porcentaje de moluscos movilizados en función de la Densidad. En esta figura se puede comprobar como con la densidad más baja el arrastre es mayor para todas las tallas. También se aprecia como las tallas 3 y 4 se movilizan, en promedio, en un porcentaje similar.

Este análisis se puede realizar en la posición simétrica de la matriz, que se corresponde con la tercera fila y la segunda columna. En este caso, estudiando la interacción Densidad x Talla, se observa el mismo comportamiento: descenso de la movilización con la talla y con el reclutamiento. Por tanto, se observa que las conclusiones que se sacan de este par de casillas de la Figura 4.72, son las que han confirmado el análisis exploratorio y el análisis de la varianza. Este análisis se puede extrapolar al resto de interacciones.

Además, si recordamos el ANOVA (§Tabla 4.19), se tenía que las interacciones de primer orden significativas eran la Velocidad x Talla, con una gran potencia estadística (>99.9%), y las interacciones Talla x Estado y Densidad x Estado, ambas con una potencia poco significativa (<70%). En los gráficos de interacción también se puede analizar cuando una interacción es significativa y cuando no lo es.

Si volvemos al ejemplo anterior, se puede observar que las familias de curvas representadas en la interacción Talla x Densidad y Densidad x Talla son aproximadamente paralelas. Esto significa que la movilización sólo depende de la talla y de la densidad, pero que el fenómeno de arrastre no presenta “no linealidades” en estos factores. Es decir, no existe ninguna interacción entre estos factores. Por el contrario, si analizamos la interacción Talla x Velocidad, se puede ver como las Tallas 2 y 3 se comportan de un modo más o menos parecido, pero que la Talla 1 y, especialmente la 4, se movilizan con un patrón diferente. Este patrón se había comentado ya en párrafos anteriores y se corresponde con la fuerte interacción (alta potencia) de estos factores.

Las interacciones con menor potencia no se “notan” tanto en la gráfica de interacciones. Así, por ejemplo en la interacción Talla x Estado (subfigura 2,4) se puede apreciar como para las 3 tallas más grandes, la movilización para los dos estados se incrementa en los moluscos muertos. Sin embargo, los moluscos más pequeños muertos son menos arrastrados que los vivos. Este comportamiento diferenciado entre los niveles de los factores de la interacción es el responsable de que sea significativa.

Para poder definir si estos patrones en las interacciones de dos factores son relevantes estadísticamente hay que recurrir a los tests de comparación múltiple, analizando cada uno de los niveles de un factor sobre el resto de niveles del otro factor. Tomando el ejemplo de la interacción Talla x Velocidad, habría que efectuar para cada Talla (15-20, 20-25, 25-30 y 30-35 mm) el análisis sobre que velocidades son relevantes en la movilización de los bivalvos y, p.ej., el comportamiento podría ser diferente para la talla más baja y la más alta.

A la hora de estimar cuales son las combinaciones que afectan a la mediana pueden emplear los test SNK, Ryan, Tukey o cualquier otro. El principal problema vuelve a surgir en como gestionar el error de Tipo I, ya que en este caso no existe una metodología consensuada de actuación, como la que proporcionaba la modificación de Ryan del test SKN, empleado en el epígrafe anterior (Underwood, 1997).

Ahora, el análisis con test a posteriori es más tedioso porque tenemos que realizar 4 test con 6 medias, para analizar cada talla en función de la velocidad, y 6 test con 4 medias, para analizar las velocidades en función de las tallas. En este caso, y debido a la gran cantidad de datos a representar se ha optado por incluir la tabla resumen de grupos homogéneos, con igual media, que proporciona el SPSS ©.

Así, en la Tabla 4.25, se presentan agrupados los niveles de la velocidad que afectan de igual modo a la media de los moluscos arrastrados de tamaño comprendido entre 15 y 20 mm. Además, con objeto de mejorar el funcionamiento de los test a posteriori frente a los errores de Tipo I, el análisis se ha realizado con el contraste de Bonferroni, siguiendo las recomendaciones de la literatura (Day y Quinn, 1989; Underwood, 1997). La significancia de cada grupo homogéneo la proporciona el método de Tukey HSD.

Tabla 4.25. Definición de los niveles de velocidad con igual efecto sobre el porcentaje de berberechos movilizados de 15 a 20 mm. Ninguno de los grupos tiene una significación estadística relevante ($P < 0.05$).

VELOCIDAD (m/s)		MEDIA DE BERBERECHOS EROSIONADOS ^a EN CADA GRUPO HOMOGÉNEO		
		1	2	3
1	V06 ≡ 0.471	0.485		
2	V05 ≡ 0.446	0.786	0.786	
3	V04 ≡ 0.391		0.799	
4	V03 ≡ 0.346		1.067	1,067
5	V02 ≡ 0.315			1,145
6	V01 ≡ 0.298			1,223
Nivel Sig. P		0,064	0.102	0.690

^a. arcsin √ transformada

Si en la Tabla 4.25 existiesen 6 grupos (columnas) esto significaría que todas las velocidades afectan de modo diferente al arrastre de los berberechos de la talla 15-20 mm. Como únicamente hay 3 grupos, eso significa que las velocidades V06 y V05 afectan de modo similar a la movilización, que las velocidades V03-V04-V05 forman otro grupo y que las velocidades V01-V02-V03 forman otro grupo más. En la última fila se señala la significancia estadística de cada grupo. Se puede apreciar como ninguno de estos grupos es estadísticamente significativo, por lo este procedimiento no proporciona ningún tipo de información. Aunque no presenta aquí, este análisis se ha repetido para el resto de tallas, obteniendo resultados sin significancia estadística.

En la Tabla 4.26 se presenta un resumen con los grupos de velocidades homogéneos en función de las tallas. De la observación de los datos de la tabla se puede concluir que no existen grupos homogéneos significativos porque los contrastes no lo son y además, los grupos están formados por niveles que se repiten en varios grupos.

Tabla 4.26. Grupos de velocidad homogéneos sobre la movilización de los berberechos para todos los niveles de tallas analizadas. Ninguno de los grupos tiene una significación estadística relevante ($p < 0.05$).

TALLA	GRUPOS HOMOGÉNEOS		
	1	2	3
10-15 mm	1-2, $p=0.064$	2-3-4, $p=0.102$	4-5-6, $p=0.690$
20-25 mm	1-4-3-2, $p=0.06$	3-2-5, $p=0.146$	5-6, $p=0.872$
25-30 mm	1-4, $p=0.216$	4-2-3-5, $p=0.583$	5-6, $p>0.999$
30-35 mm	1-3-2, $p>0.999$	2-4-5, $p=0.327$	5-6, $p=0.345$

Como cabría esperar, para el análisis de cada nivel de velocidad sobre las diferentes tallas no se ha encontrado ningún grupo homogéneo con diferencias significativas, por lo que directamente se ha optado por no presentar los resultados.

A continuación se ha realizado un análisis similar con el resto de interacciones de primer orden significativas (Talla x Estado y Densidad x Estado), así como con las de segundo orden (Velocidad x Talla x Densidad y Velocidad x Talla x Estado). En ningún análisis se han encontrado grupos homogéneos, por lo que tampoco se ha optado por presentar las tablas resumen de grupos homogéneos.

La no existencia de grupos significativos en estos análisis está relacionado con la aparición de interacciones de segundo y tercer orden, más complejas de analizar o directamente imposibles de analizar (para el caso de las interacciones de tercer orden o superiores: Underwood, 1997).

4.4.3.2. Análisis hidrodinámico

Características generales

Siguiendo la metodología presentada en el apartado 4.4.2 se recogen a continuación los principales estadísticos del flujo en los ensayos por grupos de tallas de berberechos. Antes de comenzar con la presentación de los resultados hay que señalar que en el análisis de los estadísticos no se ha podido emplear la técnica ANOVA para buscar patrones de comportamiento o, para ser más correctos, para analizar si los factores analizados (velocidad, talla, estado o reclutamiento) influyen en los estadísticos registrados (p.ej. para analizar si la velocidad de fricción está afectada por el cambio de talla o por el reclutamiento).

Las técnicas de análisis de la varianza convencionales, como las presentadas en el apartado 4.4.3.1, se pueden aplicar cuando existen repeticiones de cada grupo analizado. Debido a la configuración del experimento (ver Figura 4.52), para cada ejecución se obtuvieron los porcentajes de arrastre para 3 tallas simultáneamente, pero únicamente un registro de velocidades. Por este motivo, para el análisis hidrodinámico únicamente se dispuso de un registro experimental de PIV (en algunos casos hasta dos) para cada uno de los 96 escenarios analizados (recordemos, 6 velocidades x 4 tallas x 2 reclutamientos x 2 estados).

En estas circunstancias, cuando los experimentos se realizan sin repeticiones, no se puede estimar la varianza de cada tratamiento y tampoco las interacciones entre factores (Underwood, 1981). Para este tipo de experimentos existen variantes del ANOVA clásico presentado en este texto que se escapan del ámbito de esta tesis, pero que se pueden consultar en cualquier libro de diseño estadístico de experimentos (ver p.ej. Fisher, 1935; Cochran y Cox, 1957; Snedecor y Cochran, 1989).

A este hecho, hay que añadir que 4⁹² de los 96 escenarios se han desechado del análisis porque los campos de velocidades registrados no eran de buena calidad y cerca del lecho apenas había vectores válidos. Como no hay el mismo número de datos para cada tratamiento, se dice que el experimento es desequilibrado. En estos casos, tampoco se podría aplicar el ANOVA.

Para estas situaciones se debe recurrir al Modelo Lineal Generalizado (*Generalized Linear Model, GLM*), que emplea estadísticos similares a los del ANOVA, para realizar los contrastes de hipótesis sobre las medias. Las nociones básicas sobre los modelos generalizados para el análisis de la varianza ase pueden consultar p.ej en Sahai y Ageel (2000) o en el manual electrónico del software SPSS ® (SPSS, 2007). Nuevamente, este método de análisis se considera fuera del ámbito de esta tesis doctoral.

Por este motivo se ha optado por analizar visualmente y a través de análisis exploratorios la interacción entre los distintos factores y los valores de los principales estadísticos analizados. Para detectar estas tendencias e interacciones también se ha empleado el conocimiento previo adquirido en el análisis estadístico de la movilización de los berberechos realizado en el apartado anterior.

En primer lugar, en la Tabla 4.27, se recogen las principales propiedades del flujo , agrupando los resultados por la variable o factor velocidad de ensayo.

Tabla 4.27. Resumen de las propiedades del flujo en los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación estándar).

FACTOR VELOCIDAD	$\langle \bar{U}_{med} \rangle$ (m/s)	$\langle \bar{U}_{max} \rangle$ (m/s)	u_* (m/s)	Re_h ($\times 10^{-3}$)	Re_{*h} ($\times 10^{-3}$)	Fr_h (-)	$Fr_{*\Delta}$ (-)
V01	0.283 \pm 0.02	0.341 \pm 0.03	0.0377 \pm 0.008	40.0 \pm 3.4	5.3 \pm 1.1	0.240 \pm 0.02	0.114 \pm 0.20
V02	0.312 \pm 0.02	0.380 \pm 0.03	0.0382 \pm 0.008	43.7 \pm 3.2	5.4 \pm 1.1	0.267 \pm 0.02	0.182 \pm 0.26
V03	0.319 \pm 0.02	0.384 \pm 0.02	0.0446 \pm 0.010	44.8 \pm 3.3	6.3 \pm 1.4	0.272 \pm 0.02	0.217 \pm 0.35
V04	0.359 \pm 0.03	0.415 \pm 0.03	0.0434 \pm 0.011	50.0 \pm 4.9	6.0 \pm 1.6	0.307 \pm 0.03	0.209 \pm 0.29
V05	0.399 \pm 0.04	0.455 \pm 0.04	0.0495 \pm 0.013	55.3 \pm 5.8	6.8 \pm 1.8	0.342 \pm 0.03	0.277 \pm 0.38
V06	0.434 \pm 0.04	0.486 \pm 0.04	0.0426 \pm 0.010	60.2 \pm 6.3	5.9 \pm 1.4	0.373 \pm 0.04	0.421 \pm 0.89

Los valores medios obtenidos para las **velocidades medias** y máximas, así como las variables derivadas de las mismas (números de Reynolds Re_h y de Froude Fr_h) son similares a los calculados para los ensayos de fondo liso (§4.4.2.1, Tabla 4.12). Las relaciones lineales, el ratio medio entre el parámetro para el ensayo de tallas y para fondo liso \pm desviación estándar,

⁹² Ensayos de velocidad V01 a V03 para la talla más pequeña, densidad de reclutamiento alta y estado vivo, y ensayo V06, talla 4, densidad alta y estado muerto. Ver Apéndice 3.

vale 0.93 ± 0.03 para la velocidad media doblemente promediada, 0.97 ± 0.05 para la velocidad máxima y 0.86 ± 0.03 y 0.96 ± 0.03 para los números de Reynolds y Froude respectivamente. En todos los casos, existe una relación lineal directa de proporcionalidad entre el factor velocidad (V01 a V06) y el parámetro analizado, y además los valores obtenidos para los ensayos de tallas son ligeramente inferiores a los de fondo liso.

Se han analizado los valores medios de estos parámetros del flujo (velocidades y magnitudes derivadas) en función de los factores talla, densidad y estado. No se representan tabulados aquí estos resultados porque los valores medios obtenidos para cada uno de los niveles de estos factores son prácticamente constantes, con variaciones respecto al valor medio de cada factor inferiores al 5% (nótese que las variaciones encontradas para el factor velocidad recogidas en la Tabla 4.27 están entre un 20% y un 30%).

Únicamente se puede señalar que la velocidad media para la talla más pequeña (~ 37 cm/s) es sensiblemente superior al valor medio para el resto de tallas (~ 34 a ~ 35 cm/s). Aunque esta variación no represente más que un 5.10% respecto al valor medio del factor talla se puede atribuir la menor rugosidad que presentan los berberechos más pequeños (como se recoge más adelante en la Tabla 4.29) y al hecho de que éstos son arrastrados en mayor porcentaje que los moluscos más grandes. Por este motivo, el comportamiento de los berberechos de menor tamaño será parecido al de los ensayos de fondo liso.

Otra diferencia quizás significativa para la velocidad media y máxima de los ensayos se puede encontrar al analizar los niveles del factor estado. Así, para los berberechos vivos, estos parámetros son sensiblemente inferiores a los valores medios encontrados para los ensayos con berberechos muertos: ~ 33 cm/s vs ~ 37 cm/s y ~ 38 cm/s vs ~ 43 cm/s respectivamente. Estas diferencias representan un valor de un 6.6% y un 5.8% respecto al valor promedio de todos los ensayos, pero podrían atribuirse a mecanismos asociados a la actividad del molusco. Así, p.ej. la actividad filtradora de algunos mejillones altera la estructura de la capa límite ya que los chorros producidos por los moluscos actúan incrementando la rugosidad del lecho, modificando los términos de arrastre de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento (van Duren *et al.*, 2006). Sin embargo, es difícil asegurar con certeza estadística que el factor estado, o talla, afectan significativamente a los estadísticos de velocidad porque no se ha podido realizar ningún test como el ANOVA y, por ejemplo, las diferencias encontradas se podrían deber a errores experimentales.

En la Tabla 4.27 también se presentan los valores medios de la **velocidad de corte estimada a partir del ajuste de la ley logarítmica** en la región interna del flujo. Los ratios entre los ensayos de talla y fondo liso para las velocidades de corte, el número de Reynolds para la escalas características de calado y velocidad de fricción, y el número de Froude densimétrico son 1.44 ± 0.21 , 1.33 ± 0.18 y 4.25 ± 0.79 respectivamente. Se puede observar como este parámetro, y los números adimensionales derivados del mismo, presentan mayor dispersión (desviación estándar) que los anteriores. Hay que señalar que el valor del parámetro de Shields o número de Froude densimétrico se ha estimado con la densidad media de los berberechos de cada talla, recogida en la Tabla 4.11.

Además, estos parámetros ahora no siguen el comportamiento lineal creciente con el factor velocidad de ensayo como sucedía con las velocidades. Así, entre las velocidades V03-V04 y V05-V06 se produce un descenso del valor de la velocidad de fricción y del resto de magnitudes derivadas (ver Tabla 4.27).

En la Tabla 4.28 se presentan los valores medios de las velocidades de corte para el resto de factores analizados. Aunque las diferencias entre los valores de medios de cada nivel con el valor medio de la velocidad de corte para todos los ensayos (~0.0428 cm/s) no son muy significativos (<~10% para la talla, <~6% para la densidad y ~1% para el estado) si parece que existen diferencias sensibles entre este parámetro y el factor talla y densidad, además de las mencionadas con el factor velocidad en párrafos anteriores. Hay que recordar que aunque las diferencias no sean demasiado grandes, a veces del orden de los ~mm/s, éstas se propagan cuadráticamente si lo que se desea es obtener $\tau_0 (\propto u_*^2)$.

Tabla 4.28. Velocidad de fricción media en función de los factores talla, densidad de reclutamiento y estado para los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación estándar).

FACTOR		u_* (m/s)	FACTOR		u_* (m/s)
TALLA	15-20 mm	0.039±0.009	DENSIDAD	BAJA	0.045±0.011
	20-25 mm	0.041±0.008		ALTA	0.040±0.010
	25-30 mm	0.047±0.012	ESTADO	VIVO	0.042±0.012
	30-35 mm	0.044±0.012		MUERTO	0.043±0.010

Nuevamente, no se han podido determinar con ayuda de test estadísticos si las medias de los niveles de los factores analizados difieren significativamente unas de otras.

Sin embargo, cuando se realice en este apartado el análisis de las leyes de velocidades (pág 4.173) y de las tensiones y de intensidades turbulentas (pág 4.138) se retomará y profundizará en el estudio de las velocidades de fricción. Será en estos apartados donde se realice una comparación entre las velocidades de fricción estimadas a partir de la ley logarítmica con las estimadas a partir de otros métodos ya mencionados en la descripción de la metodología (extrapolación de la ley de tensiones de Reynolds o máximo del perfil de tensiones de Reynolds y/o totales, §4.4.2.1).

A continuación se pasa a analizar **la rugosidad del fondo y sus longitudes características**. En la Tabla 4.29 se presentan los principales parámetros que definen la función de rugosidad del lecho en función de los diferentes factores analizados.

La variable z_m ⁹³ representa la posición media del lecho y se ha empleado para definir la posición del lecho $z=0$. Es importante señalar que este parámetro no tiene por qué coincidir, y de hecho no coincide, con la posición media entre los senos y las crestas del lecho, z_c y z_t respectivamente (ver Figura 4.73). El parámetro σ_z representa la desviación estándar de la función de distribución de probabilidad acumulada de las cotas del lecho, que es a su vez la función de rugosidad de fondo $\phi_s(z)$ (Nikora *et al.*, 2001)

⁹³ En el texto y en las Tabla 4.29 y Tabla 4.45, z_m representa la distancia entre los senos del lecho z_t y el plano $z=0$

Tabla 4.29. Resumen de las características geométricas del lecho en función de los factores analizados para los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación estándar).

FACTOR		z_m (mm)	σ_z (mm)	$\Delta = z_c - z_t$ (mm)	z_c (mm)	z_0 (mm)
VELOCIDAD	V01	11.1 \pm 4.4	5.0 \pm 1.9	17.8 \pm 4.9	6.7 \pm 2.4	0.8 \pm 0.7
	V02	10.2 \pm 5.0	4.7 \pm 1.8	17.2 \pm 7.0	7.0 \pm 3.1	0.5 \pm 0.4
	V03	10.6 \pm 5.2	4.7 \pm 1.6	17.3 \pm 5.6	6.7 \pm 1.8	0.9 \pm 0.7
	V04	8.1 \pm 4.7	4.5 \pm 1.8	15.3 \pm 6.8	7.2 \pm 3.4	0.6 \pm 0.6
	V05	7.8 \pm 4.2	4.7 \pm 2.1	15.7 \pm 6.4	7.8 \pm 3.4	0.6 \pm 0.6
	V06	7.6 \pm 4.7	3.9 \pm 1.7	14.1 \pm 5.6	6.3 \pm 2.3	0.2 \pm 0.3
TALLA	15-20 mm	3.8 \pm 2.2	2.4 \pm 0.7	8.7 \pm 2.8	4.7 \pm 1.5	0.4 \pm 0.4
	20-25 mm	7.5 \pm 2.3	4.0 \pm 0.9	14.6 \pm 2.4	7.1 \pm 2.1	0.5 \pm 0.5
	25-30 mm	10.5 \pm 3.1	5.2 \pm 1.5	17.7 \pm 3.3	7.3 \pm 2.5	0.9 \pm 0.7
	30-35 mm	14.6 \pm 3.4	6.2 \pm 1.4	23.2 \pm 4.4	8.5 \pm 3.4	0.6 \pm 0.6
DENSIDAD	BAJA	7.5 \pm 3.9	5.3 \pm 1.6	15.8 \pm 5.2	8.1 \pm 2.6	0.8 \pm 0.7
	ALTA	10.7 \pm 5.1	4.0 \pm 1.7	16.6 \pm 6.8	5.9 \pm 2.5	0.4 \pm 0.4
ESTADO	VIVO	10.0 \pm 4.6	4.5 \pm 1.8	16.8 \pm 5.3	6.8 \pm 2.3	0.7 \pm 0.7
	MUERTO	8.5 \pm 4.9	4.6 \pm 1.8	15.6 \pm 6.7	7.1 \pm 3.2	0.5 \pm 0.4
TODOS LOS ENSAYOS		9.2 \pm 4.8	4.6 \pm 1.8	16.2 \pm 6.1	7 \pm 2.8	0.6 \pm 0.6

Por último, se presentan también los valores de la rugosidad característica del lecho $\Delta = z_c - z_t$ y de la rugosidad equivalente obtenida a partir del ajuste de la ley logarítmica de velocidades z_0 . Estos parámetros dan una idea del espesor de la capa rugosa y de los efectos de estela que provocan las rugosidades del lecho sobre el flujo en esta capa, respectivamente.

Si se analizan el valor de la **posición del fondo** z_m , o la **rugosidad característica del lecho** Δ , respecto del factor velocidad se puede observar cómo a medida que la velocidad del ensayo crece, la magnitud de estas variables se reduce debido a que en términos medios, existen menos berberechos en la zona de análisis porque estos son arrastrados (ver Tabla 4.29). El análisis de estos parámetros respecto a la talla refleja, tal y como cabría esperar, que existe una relación directa entre la posición z_m y la rugosidad equivalente del lecho con el tamaño de los moluscos. Así, la rugosidad característica vale 8.7 \pm 2.8 mm, 14.6 \pm 2.4 mm, 17.7 \pm 3.3 mm y 23.2 \pm 4.4 mm para las tallas de 15-20 mm a 30-35 mm respectivamente. Estas magnitudes representan unos 7.5 \pm 1.5 mm menos que la altura a media de cada grupo, por lo que este valor se podría tomar como el grado de enterramiento o de asentamiento de los moluscos en el lecho. En término medio, esta diferencia implica una reducción de la altura característica a en un ~30%, para las tallas analizadas.

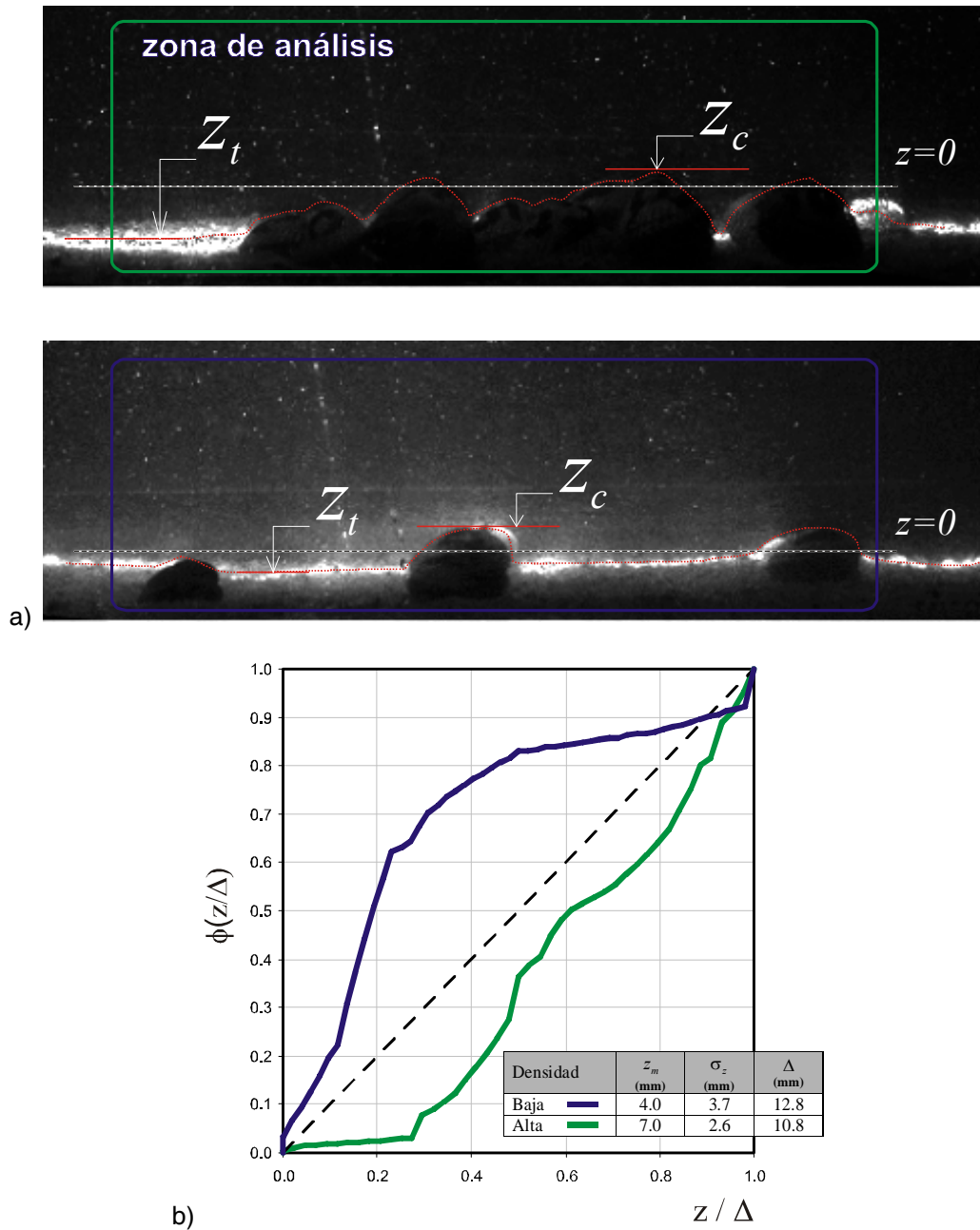


Figura 4.73. Ejemplo de obtención del perfil del lecho así como de los parámetros representativos del mismo: (a) imágenes de los ensayos de tamaño 20-25 mm para con densidades alta y baja (berberechos muertos, velocidad V05) y (b) función de rugosidad de fondo obtenida a partir del campo de imágenes.

Otro aspecto que se ha cuantificado con el análisis de la **función de rugosidad** es el grado de reclutamiento de los moluscos. Así, para las densidades más bajas existe mayor superficie de lecho liso y la rugosidad de los berberechos se asemeja más a una rugosidad de tipo $-k$ (flujo sobre obstáculo, §2.4.4), mientras que para las densidades de reclutamiento más altos, la rugosidad se parece más a una de tipo $-d$. Una medida indirecta de este fenómeno la proporciona la posición del lecho z_m , que se sitúa más arriba para las densidades altas, 10.7 ± 5.1 vs 7.5 ± 3.9 mm para la densidad más baja. También el análisis de la desviación estándar de la función de rugosidad refleja que σ_z es superior para las configuraciones con

menor densidad de moluscos (§Figura 4.73). La dispersión de estas medidas respecto al factor densidad se debe a que se están promediando los valores sobre todas las tallas (§Tabla 4.29).

Como se ha comentado en el Capítulo 2, el límite entre las situaciones de flujo rasante (tipo $-d$) y flujo sobre obstáculo (tipo $-k$) se suele establecer en el ratio $\lambda/\Delta=4-5$ (Jiménez, 2004). Si se tiene en cuenta que la zona de ensayo tiene una extensión de ~ 15 cm, y en ella se dispusieron tres filas de moluscos aproximadamente equiespaciadas para los ensayos de bajo reclutamiento, se tiene que los ratios λ/Δ de ~ 5.7 , ~ 3.4 , ~ 2.8 y ~ 2.2 para las tallas de 15-20 mm a 30-35 mm respectivamente. Con esta configuración geométrica únicamente se podrían esperar flujos tipo $-k$ sobre los moluscos más pequeños. Recordemos que en este tipo de flujos, las tensiones de Reynolds y las velocidades de fricción son mayores que para los flujos equivalentes rasantes, la tasa de transferencia de momentum sobre los moluscos será mayor, y por tanto, se encontrarán más expuestos al efecto de la corriente (§2.4.4.). A medida que los berberechos son mayores y la relación λ/Δ decrece, se podría decir que las filas de moluscos interactúan entre si reduciendo el efecto del arrastre (los moluscos se “abrigarían” más entre si).

Otra forma de medir este efecto es a través del valor de la **rugosidad característica de ley logarítmica** de velocidades z_0 . Este parámetro se puede considerar como un factor que mide la importancia de los efectos de estela y separación de flujo. A medida que z_0 crece, el lecho penetra más en la estructura de la capa límite y de la región interna del flujo. En la Tabla 4.29 se puede observar cómo este parámetro vale prácticamente el doble en los ensayos de baja densidad. También es significativo que para la velocidad más alta, así como para la talla más alta, no toma el valor máximo. Esto se atribuye a dos hechos. Respecto a las velocidades, el propio fenómeno de la movilización de los moluscos hace que las condiciones del lecho para la velocidad más alta sean parecidas a las condiciones de lecho liso de arena. Respecto a la talla, se ha comentado que esta configuración el flujo es muy rasante, por lo que la zona situada por debajo de las crestas del lecho es una zona poco activa hidráulicamente, y funcionaría como un lecho virtual situado a una cota superior a del lecho de sedimentos real.

Por último hay que señalar que el factor estado parece no influir demasiado sobre la rugosidad del lecho, como se puede ver también en las filas inferiores de la Tabla 4.29.

Para finalizar con el análisis general de los estadísticos descriptores del flujo, se presenta en la Tabla 4.30 los **parámetros y escalas geométricas** más relevantes en función de los factores analizados en los ensayos.

En primer lugar se puede señalar que el calado característico, $H = z_{ws} - z_m$, para los ensayos de grupos se reduce a un valor medio de $\sim 139.7 \pm 2.8$ mm por la presencia de los berberechos. La **posición de la velocidad máxima** δ_h presenta un comportamiento similar al encontrado en los ensayos con fondo liso, aunque con valores ligeramente inferiores como refleja el ratio de 0.34 ± 0.16 (media \pm desviación típica). Nuevamente, la posición δ_h / H se encuentra por debajo de los valores predichos por la fórmulas empíricas presentadas en el Cap. 2 y en el apartado 4.4.2.1.

En cualquier caso, la posición donde se encuentra la velocidad máxima presenta mucha dispersión, con desviaciones estándar que pueden llegar a representar hasta casi el 70% del valor medio de los niveles de cada factor (ver p.ej. la media para la velocidad V06). Esta dispersión se explica en parte por la dificultad de obtener el valor máximo de la velocidad porque el gradiente de velocidades en la vertical (du/dz) en el entorno del mismo es, en algunas ocasiones, prácticamente constante.

Tabla 4.30. Resumen de las escalas geométricas para los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación típica).

FACTOR		H	δ_h	δ_h / H	H / Δ	η
		(mm)	(mm)	(-)	(-)	(mm)
VELOCIDAD	V01	141.2 \pm 1.5	42.2 \pm 12.6	0.30 \pm 0.09	8.6 \pm 2.6	0.232 \pm 0.036
	V02	139.8 \pm 2.2	40.7 \pm 11.7	0.29 \pm 0.08	9.4 \pm 3.7	0.229 \pm 0.035
	V03	140.5 \pm 2.4	40.6 \pm 11.3	0.29 \pm 0.08	9.0 \pm 3.0	0.205 \pm 0.033
	V04	139.4 \pm 2.7	79.6 \pm 16.5	0.57 \pm 0.12	14 \pm 16.5	0.211 \pm 0.037
	V05	138.6 \pm 3.2	32.1 \pm 16.8	0.23 \pm 0.12	10.3 \pm 4.6	0.192 \pm 0.039
	V06	138.6 \pm 3.6	45.3 \pm 28.0	0.32 \pm 0.20	12.4 \pm 7.7	0.213 \pm 0.037
TALLA	15-20 mm	140.1 \pm 3.9	51.1 \pm 23.3	0.36 \pm 0.17	19.4 \pm 13.5	0.225 \pm 0.035
	20-25 mm	139.9 \pm 2.1	48.4 \pm 23.4	0.35 \pm 0.17	9.8 \pm 1.6	0.219 \pm 0.033
	25-30 mm	139.0 \pm 2.7	45.3 \pm 23.1	0.33 \pm 0.17	8.1 \pm 1.5	0.200 \pm 0.040
	30-35 mm	139.7 \pm 2.4	43.3 \pm 22.2	0.31 \pm 0.16	6.2 \pm 1.1	0.212 \pm 0.041
DENSIDAD	BAJA	140.9 \pm 2.7	52.8 \pm 25.4	0.37 \pm 0.18	11.3 \pm 10.3	0.205 \pm 0.037
	ALTA	138.6 \pm 2.5	41.5 \pm 18.9	0.30 \pm 0.14	10.1 \pm 5.4	0.221 \pm 0.038
ESTADO	VIVO	138.8 \pm 2.1	43.8 \pm 29.3	0.32 \pm 0.21	9.5 \pm 4.4	0.216 \pm 0.040
	MUERTO	140.4 \pm 3.2	49.9 \pm 13.7	0.36 \pm 0.10	11.8 \pm 10.5	0.211 \pm 0.036
TODOS LOS ENSAYOS		139.7 \pm 2.8	46.9 \pm 22.8	0.34 \pm 0.16	10.7 \pm 8.1	0.214 \pm 0.038

Sin embargo, parte de esta variabilidad debe atribuirse a que el flujo presenta diferente estructura entre los grupos de ensayos de velocidad baja y alta, y entre los ensayos de estado vivo y muerto. Esta circunstancia se ha comentado en el apartado 4.4.2.2.

Analizando las tendencias de la posición máxima o la relación δ_h / H se puede apreciar como para todas las velocidades, a excepción de la velocidad V04, la posición relativa δ_h / H se encuentra siempre en la mitad inferior del calado. El análisis por talla revela que, en promedio, a medida que la talla crece, la posición relativa δ_h / H desciende, posiblemente porque las velocidades verticales son mayores y el flujo se encuentra con un elemento de rugosidad relativa mayor. Se ha comentado en el Cap. 2 (§2.4.2 y §2.4.3) la relación existente entre las velocidades verticales y la posición del punto de velocidades máximas o *velocity dip* (ver entre otros Yang, 2005). Este efecto también se detecta al analizar la densidad de reclutamiento, siendo la relación δ_h / H inferior para las densidades más bajas (es decir, las que presentan mayor rugosidad).

El parámetro H/Δ representa el **grado de sumergencia** relativo del flujo. En este caso, es interesante analizar el valor de la sumergencia en función de la talla de los moluscos. Obviamente, a mayor talla, menor es el valor de este ratio, que vale 19.4 \pm 13.5, 9.8 \pm 1.6, 8.1 \pm 1.5 y 6.2 \pm 1.1 para las tallas de 15-20 mm a 30-35 mm respectivamente.

Ya se ha comentado en el Capítulo 2 que en situaciones de muy baja sumergencia es muy difícil encontrar argumentos teóricos que postulen la existencia de una ley logarítmica universal (Manes *et al.*, 2007). Así, algunos autores señalan que para valores de sumergencia $H/\Delta < 10$ la teoría de la capa límite falla (Katul *et al.*, 2002), mientras que en la última revisión sistemática

de las capas límites turbulentas recogida en el Annual Review of Fluid Mechanics (Jiménez, 2004), se recomienda que la hipótesis de semejanza sólo se puede aplicar para relaciones $H/\Delta > 40$.

En estas condiciones de baja sumergencia puede que el flujo no sea de Tipo I (ver §2.3.1) y entonces ni las leyes de velocidades, ni la estructura de las tensiones e intensidades turbulentas, siguen las distribuciones teóricas encontradas para flujos 2D uniformes. En §2.4.4 se han presentado otras formas para las leyes de velocidades encontradas en la literatura (perfiles en S, doblemente logarítmicos o en forma de cuña).

Hay que señalar que es muy difícil asignar intervalos de sumergencia relativa a cada uno de los Tipos de flujo porque, como ya se ha comentado, la forma y espaciado de las rugosidades influye en la estructura del flujo. Por este motivo, flujos con baja sumergencia pueden presentar una estructura de Tipo I, con una región logarítmica, si la forma del lecho es similar a la de las líneas de corriente. Es decir, si el lecho no presenta protuberancias aisladas que favorezcan la aparición de estelas.

En este caso, se puede decir que salvo en los ensayos para la talla más baja, el flujo presenta unas condiciones de sumergencia bajas, aunque sin llegar a los extremos de flujo Tipo III (rugoso), que se producirían únicamente para $H/\Delta < 3-4$. Estas condiciones, junto con la existencia de corrientes secundarias en la sección de análisis, han provocado en algunas ocasiones la validez de la ley logarítmica sea cuestionable. Este hecho retomará al analizar las intensidades y tensiones de corte (pág 4.138).

Por último, en la Tabla 4.30 se presenta también la microescala de Kolgomorov. La magnitud de ésta es proporcional al calado y al número de Reynolds calculado con la velocidad de fricción (ecuación (4.32)). Como sucedía con los ensayos de fondo liso, la resolución del equipo PIV está aproximadamente un orden magnitud por encima del valor de η .

Velocidades doblemente promediadas

A continuación se presentarán las principales características de los campos de velocidades determinados en los ensayos realizados. En el Apéndice 3 se presentan unas fichas con la representación gráfica de los perfiles doblemente promediados de velocidad, intensidades turbulentas y distribución de tensiones para los 96 ensayos de tallas de poblaciones y para los 36 de grupos estacionales. En ese Apéndice también se puede encontrar varias Tablas resumen con todos los estadísticos analizados en los epígrafes de Características generales de los Análisis hidrodinámicos (§4.4.3.2 y §4.4.4.2).

Como el análisis detallado de los campos de velocidades de los 96 ensayos de tallas es inabordable, en este apartado se mostrarán los campos de velocidades y los perfiles en varios casos que ilustran el comportamiento general de los ensayos. Así, los escenarios analizados a continuación son representativos del resto de ensayos.

Para ello, en los campos de vectores y magnitudes escalares se ha seleccionado una velocidad media-alta, una talla media y un estado cualquiera. El factor más importante en términos relativo para el estudio espacial de las velocidades es el reclutamientos por lo que en las siguientes figuras (Figura 4.74 a Figura 4.80) se presentan siempre los resultados para las dos densidades analizadas. En las representaciones gráficas de las distribuciones de velocidad y tensiones de corte (Figura 4.81 a Figura 4.91), se ha optado por presentar las magnitudes doblemente promediadas de un talla media, en función del reclutamiento y del estado. Las conclusiones extraídas de este análisis son extrapolables al resto de tallas.

En primer lugar se presentarán los **campos de velocidades** para el ensayo de la velocidad V05, con berberechos vivos de talla entre 25 y 30 mm (Talla T3), para los dos reclutamientos analizados: alto, en la Figura 4.74, y bajo, en la Figura 4.75. De modo abreviado, los ensayos se denominarán ensayos V05T3AV y V05T3BV, donde AV y BV hace referencia a la densidad alta y baja con los moluscos vivos respectivamente (ver nomenclatura de la Figura 4.69, pág 4.103). Con esta serie de figuras se pretende analizar la influencia del grado de reclutamiento, o rugosidad del lecho, en la estructura del campo de velocidades medias y velocidades doblemente promediadas.

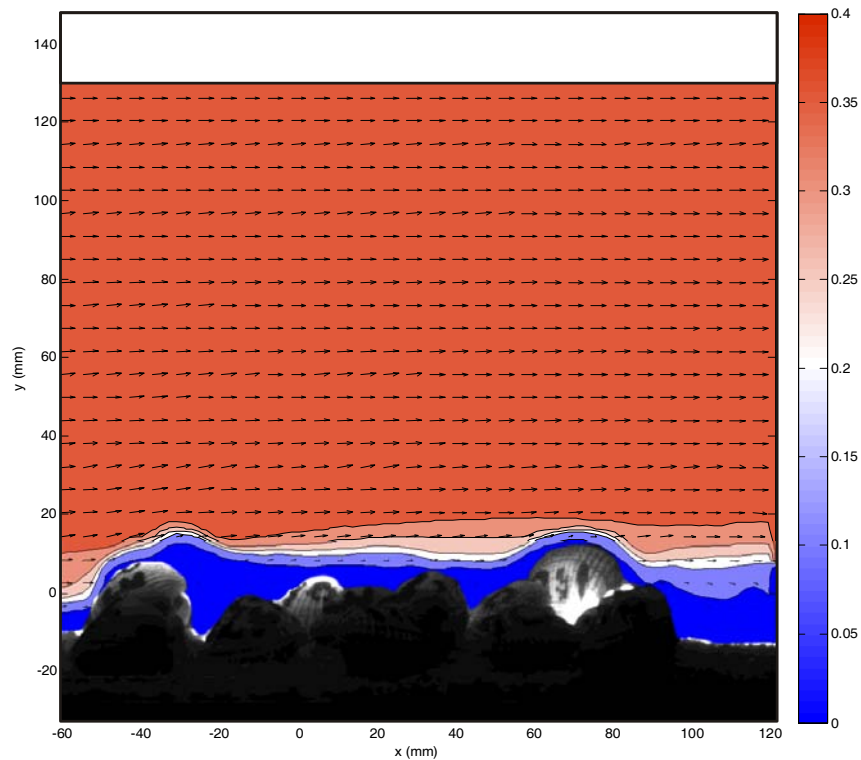


Figura 4.74. Campo de velocidades obtenido para el ensayo V05T3AV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media (0-0.4 cm/s) y únicamente 1 de cada 3 vectores para facilitar la visualización.

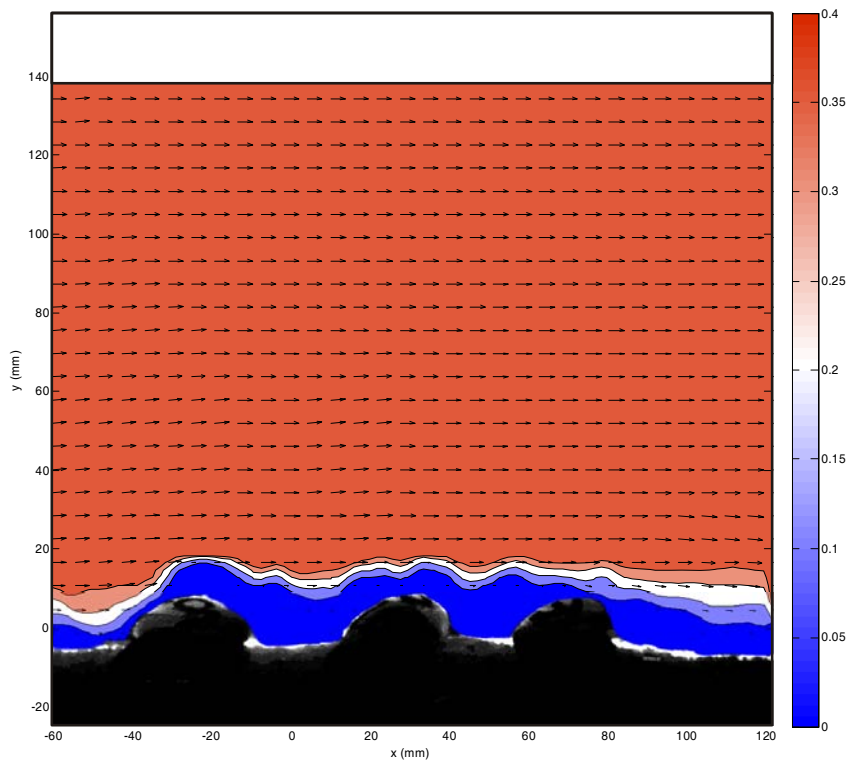


Figura 4.75. Campo de velocidades obtenido para el ensayo V05T3BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media (0-0.4 cm/s) y únicamente 1 de cada 3 vectores para facilitar la visualización.

En los campos de velocidades medias promediadas en el tiempo se puede observar como el flujo se acelera cuando pasa sobre los berberechos de la sección de análisis. Este fenómeno se aprecia al analizar las isolíneas de velocidad cerca del lecho (rango de color azul a rojo), que se comprimen al superar el primer bivalvo situado aguas arriba (ver flecha amarilla).

Esta aceleración provoca un incremento de las velocidades horizontales sobre los moluscos en la dirección de la corriente como se puede apreciar en la Figura 4.76. En esta figura también se pueden apreciar pequeñas diferencias en la estructura de las velocidades provocadas por las diferencias en la rugosidad del lecho. Así, el flujo sobre el lecho denso es mucho más rasante, mientras que para la densidad baja, es más parecido al flujo sobre un obstáculo aislado. De todas formas, y como se comentó anteriormente, para la talla representada en la figura en la densidad de reclutamiento baja, Figura 4.76(b), la relación H/Δ es ~ 3 . De este modo, y si la rugosidad introducida por los berberechos fuese como una rugosidad bidimensional, nos encontraríamos en un flujo tipo $-d$ o rasante. Se puede observar además cómo el flujo se estabiliza hacia aguas abajo. Así, entre el primer y segundo grupo de berberechos el flujo penetra más entre los berberechos, e incluso se forma una zona de recirculación (con velocidades negativas representadas en color amarillo). Entre el segundo y el tercer grupo, la penetración parece menor, es decir, el flujo es más rasante.

Este fenómeno de adaptación de la corriente al cambio de sección originada por los berberechos provoca que el flujo no sea uniforme espacialmente. De echo, y hasta el final del parche de berberechos, se puede considerar que el movimiento está ligeramente acelerado (las velocidades horizontales crecen hacia aguas abajo). Como se señalado en el Capítulo 2 (§), este tipo de no uniformidades afecta a la estructura de velocidades y tensiones de corte.

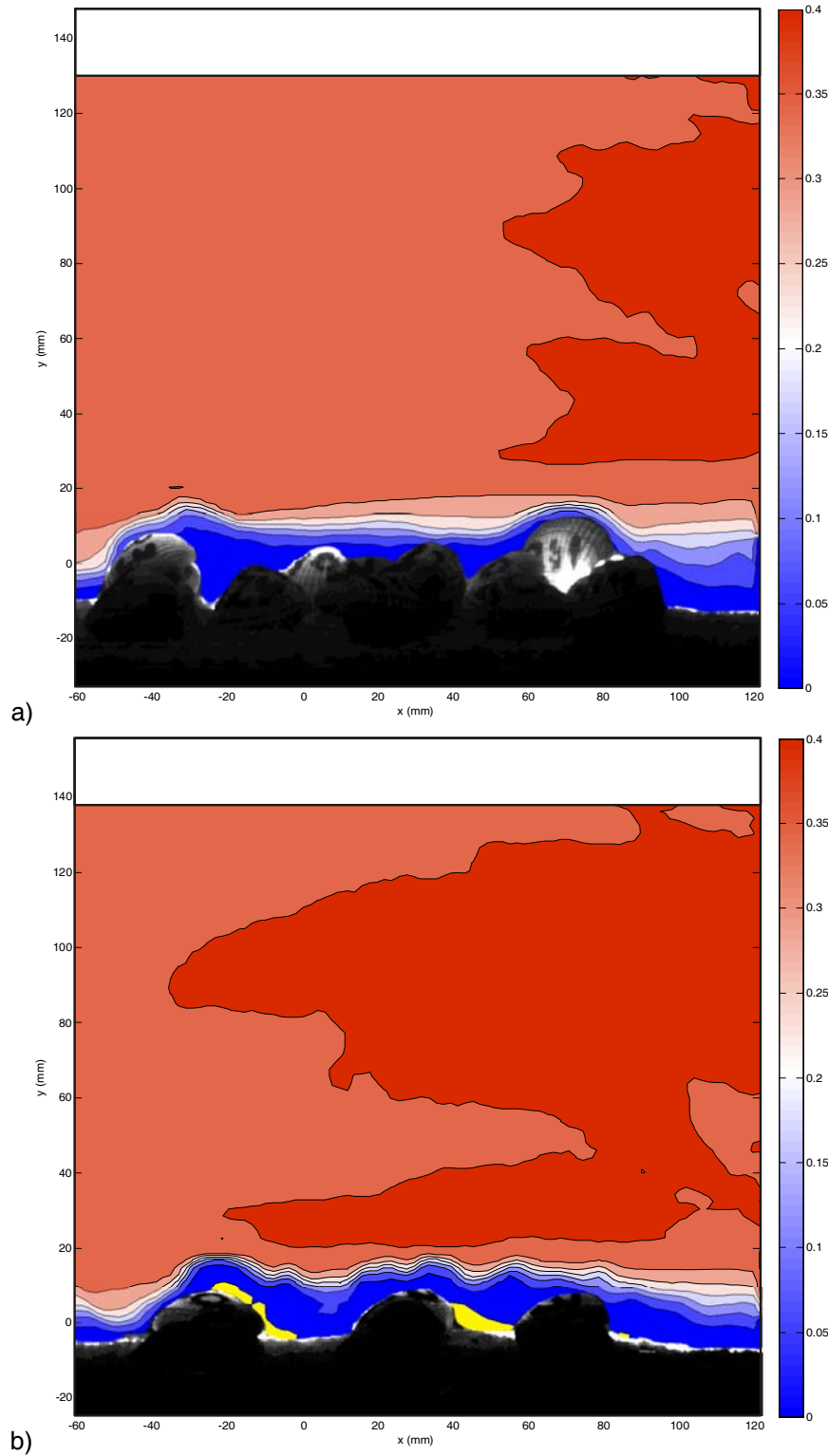


Figura 4.76. Campo de velocidades horizontales promediadas en el tiempo a) para el ensayo V05T3AV y b) para el ensayo V05T3BV. En la figura correspondiente al ensayo V05T3BV se ha representado en amarillo las zonas de velocidades negativas (inferiores a ~ 1 cm/s).

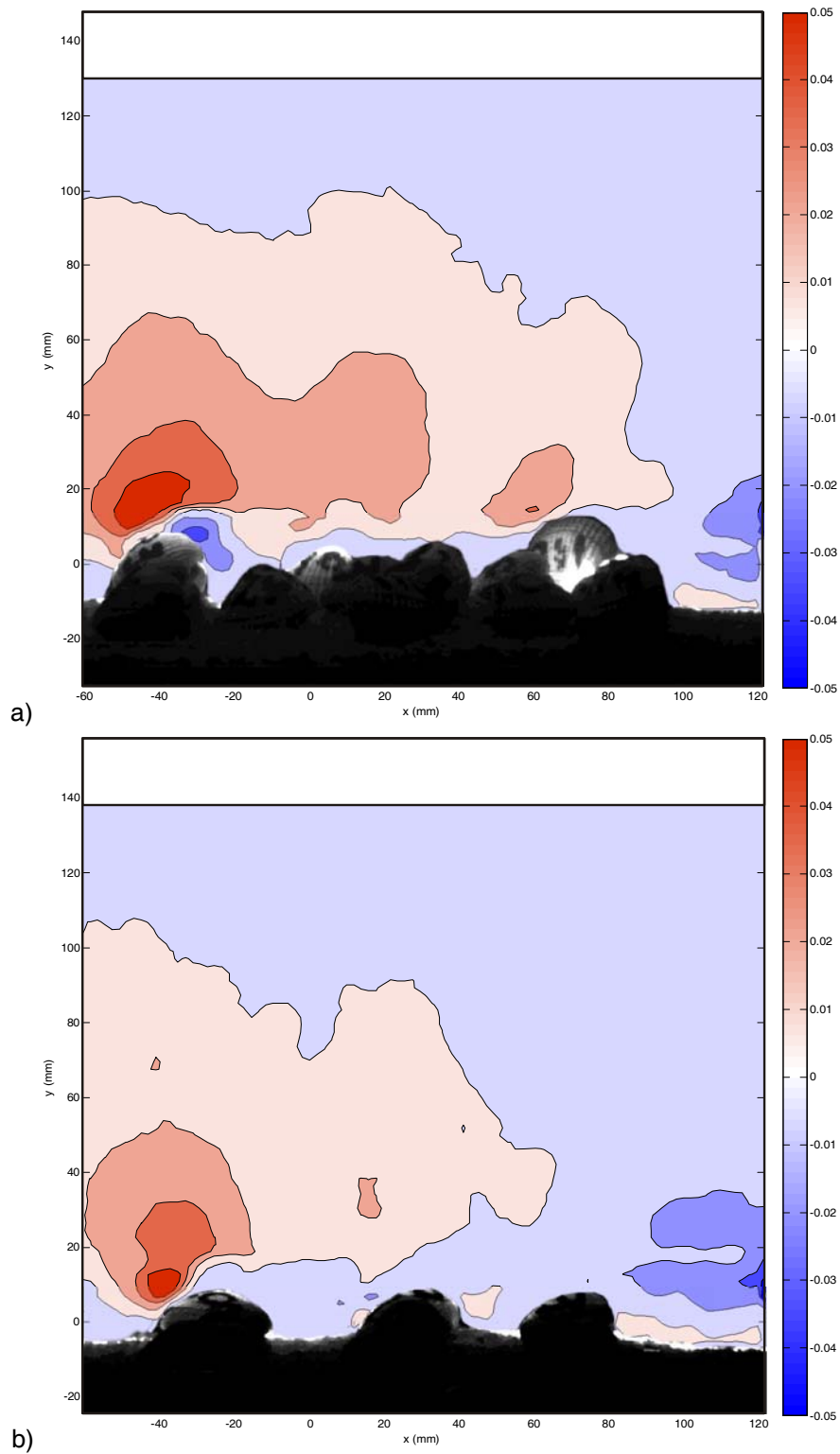


Figura 4.77. Campo de velocidades verticales promediadas en el tiempo a) para el ensayo V05T3AV y b) para el ensayo V05T3BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media entre -5 y 5 cm/s.

En la Figura 4.77 se presentan los campos de velocidades verticales medias promediadas en el tiempo. Para las dos densidades de reclutamiento se pueden observar la importancia de las aceleraciones verticales producidas cuando el flujo se encuentra con el primer molusco. En la Figura 4.77(a) se observa una zona importante de succiones aguas sobre la superficie del primer berberecho (en color azul oscuro). Además, tras el parche de berberechos se produce la readaptación del flujo al lecho liso, donde también se han registrado velocidades negativas.

La estructura de las velocidades sobre los berberechos también se puede analizar a partir de los **campos de las perturbaciones o fluctuaciones espaciales de velocidad** (\tilde{u}, \tilde{w}) , calculados como la diferencia entre la velocidad promediada espacialmente (\bar{u}, \bar{w}) y los perfiles de velocidad doblemente promediados $\langle \bar{u} \rangle$ y $\langle \bar{w} \rangle$. En la Figura 4.78 se presenta el campo vectorial con la perturbación espacial de la velocidad representada sobre la vorticidad de dicho campo para el ensayo V05T3AV.

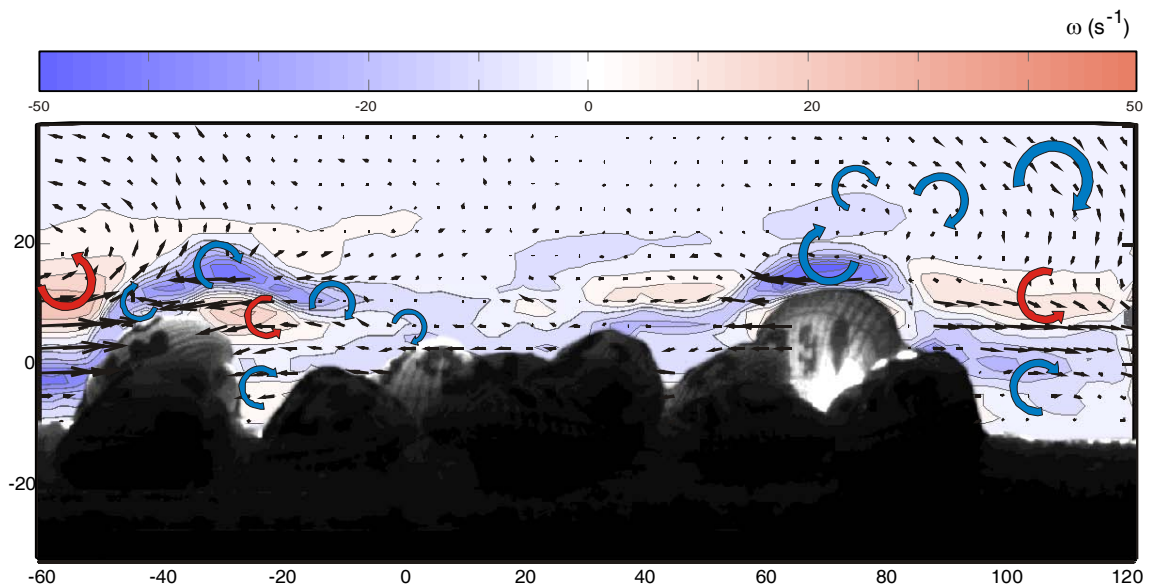


Figura 4.78. Campo vectorial de las perturbaciones espaciales de la velocidad (\tilde{u}, \tilde{w}) para el ensayo V05T3AV. En la figura se ha representado la vorticidad de dicho campo entre $\omega = -50$ y 50 s^{-1} y los vórtices asociados a las estelas persistentes formadas en el entorno de los berberechos más grandes del lecho.

La representación de este campo permite visualizar patrones organizados de flujo, provocados por la disposición de los moluscos, superpuestos al flujo medio. De forma similar al estudio de las estructuras coherentes en el dominio del tiempo, la representación vectorial de las perturbaciones de la velocidad permite observar estructuras y vórtices formados sobre los berberecho (Coleman *et al.*, 2007b; Pokrajac *et al.*, 2007).

Para la obtención de la perturbación espacial de la velocidad es necesario calcular en primer lugar el perfil de velocidad doblemente promediado para cada componente, u y w . En la Figura 4.79 y en la Figura 4.80 se recogen los campos escalares de las perturbaciones espaciales \tilde{u} y \tilde{w} respectivamente. En cada figura se han representado además los perfiles de velocidad doblemente promediados, $\langle \bar{u} \rangle$ y $\langle \bar{w} \rangle$ junto con la función de rugosidad de lecho $\phi(z)$.

El análisis de las perturbaciones espaciales de la componente horizontal revela que el flujo está ligeramente acelerado sobre la sección de análisis (se puede apreciar un ligero gradiente positivo en la velocidad de aguas arriba hacia aguas abajo). Otro aspecto reseñable de la distribución de perturbaciones horizontales es que lejos de las crestas del lecho es prácticamente nula, y es en el entorno y por debajo del nivel de éstas, donde existen grandes variaciones en \tilde{u} .

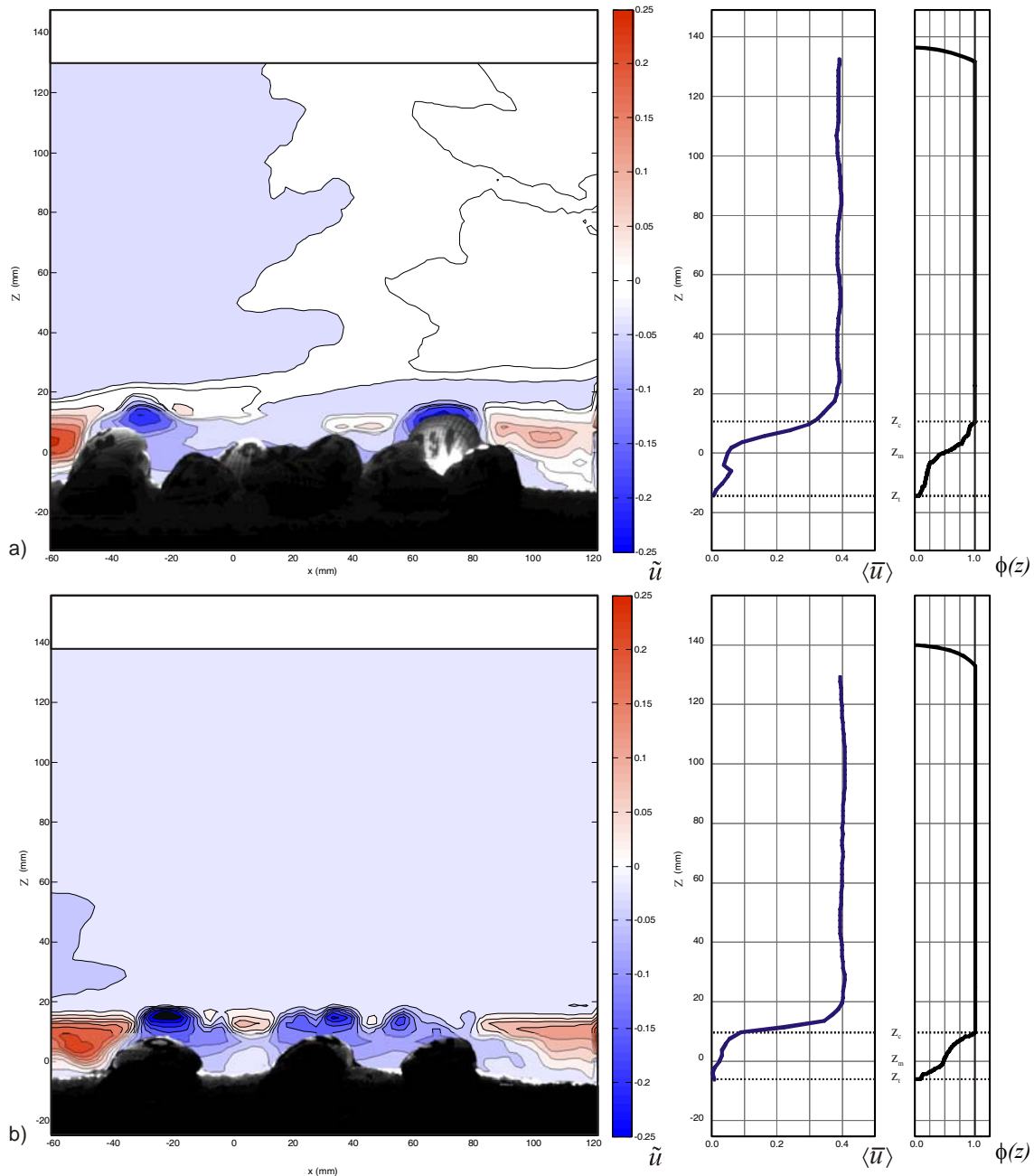


Figura 4.79. Campo de la perturbación espacial de la velocidad horizontal \tilde{u} a) para el ensayo V05T3AV y b) para el ensayo V05T3BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media entre -25 y 25 cm/s. A la derecha de cada mapa de velocidades se presenta el perfil doblemente promediado $\langle \bar{u} \rangle$ así como la función de rugosidad del lecho $\phi(z)$.

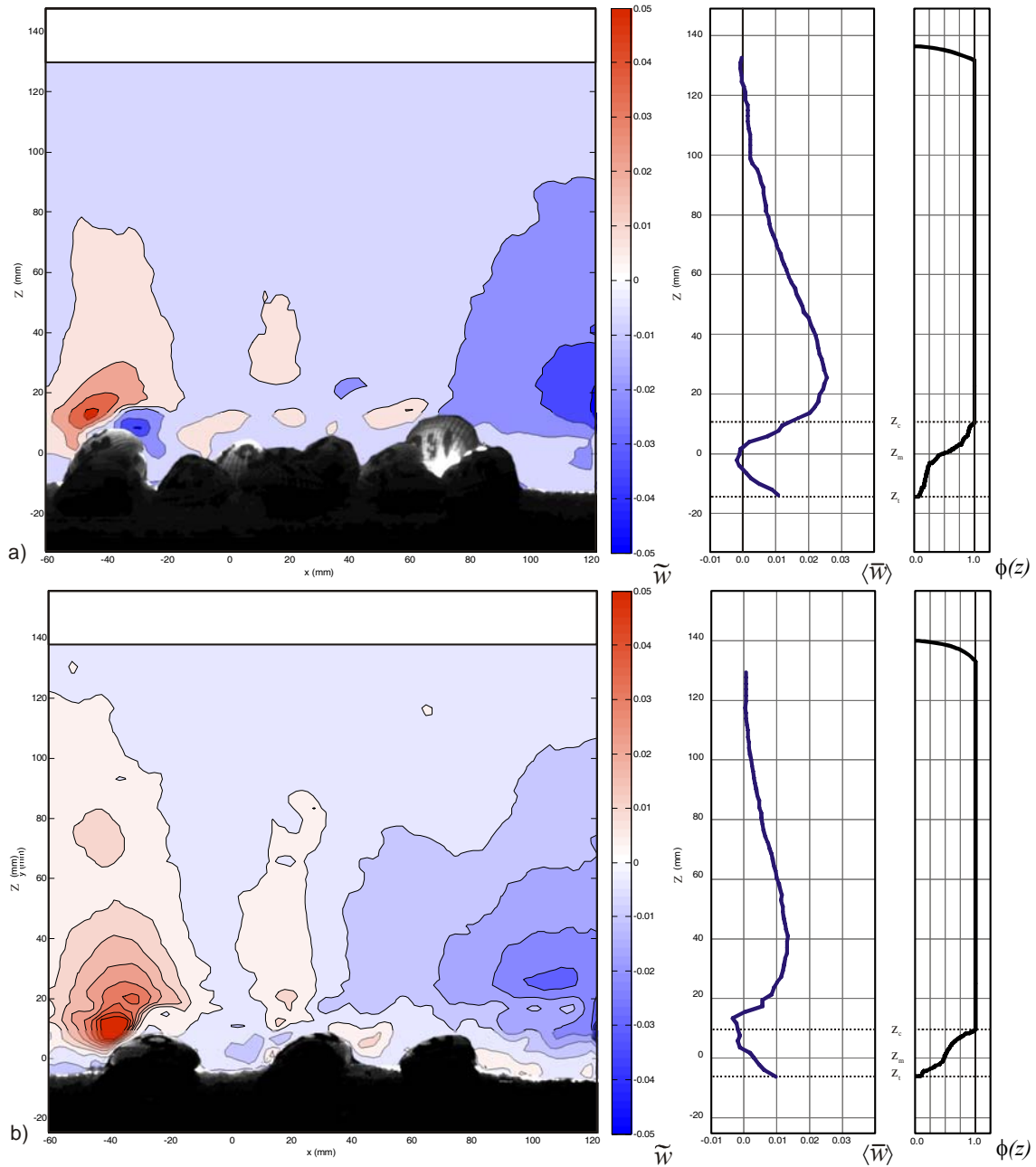


Figura 4.80. Campo de la perturbación espacial de la velocidad vertical \tilde{w} a) para el ensayo V05T3AV y b) para el ensayo V05T3BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media entre -25 y 25 cm/s. A la izquierda de cada mapa de velocidades se presenta el perfil doblemente promediado $\langle \bar{w} \rangle$ así como la función de rugosidad del lecho $\phi(z)$.

El comportamiento de la perturbación vertical de velocidades es ligeramente diferente al de la perturbación horizontal, ya que el efecto de la rugosidad de la sección de análisis se nota en todo el calado, especialmente sobre el primer y último molusco de la sección de análisis (ver Figura 4.80).

La metodología del doble promediado se ha aplicado sobre un dominio rectangular de unos ~16-17 cm de ancho sobre todo el calado del flujo. Esta sección es ligeramente más grande que la zona sobre la que se colocaron los berberechos (~15 cm). De esta forma, se ha tenido en cuenta en todos los ensayos la posición del lecho original de arena. Si se hubiesen tomado 15 cm en las configuraciones de densidad de reclutamiento alto, no se analizarían las zonas situadas inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de la zona de estudio, y la función de rugosidad no reflejaría la posición del lecho de arena.

En la Figura 4.81 se muestran las **velocidades horizontales doblemente promediadas** para la serie de ensayos con la Talla 3 y los berberechos vivos. Se puede observar como no existe una tendencia o patrón muy claro de comportamiento del perfil en la región del lecho y en la región rugosa en función de la velocidad de ensayo o en función del tipo de reclutamiento.

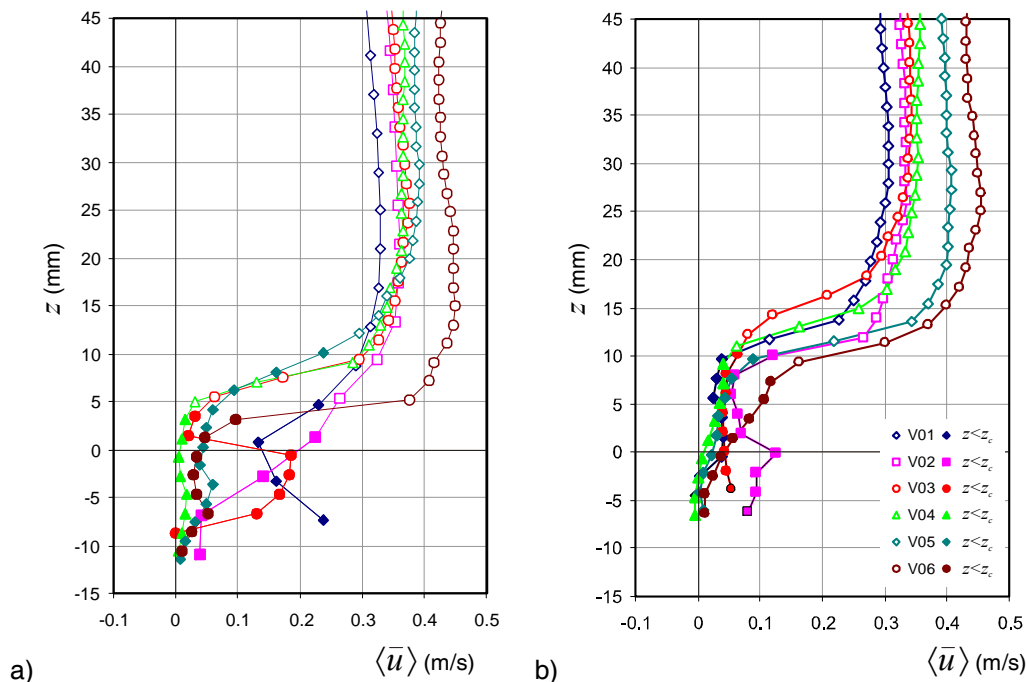


Figura 4.81. Comparación de las velocidades doblemente promediadas para la serie de ensayos con la talla 3 y estado vivo: a) densidad de reclutamiento alta y b) densidad de reclutamiento baja. Los símbolos rellenos representan la zona situada bajo las crestas del lecho para cada escenario analizado.

Se puede apreciar nuevamente cómo la posición del lecho z_m ($z=0$) está determinada por la densidad de reclutamiento (Figura 4.73), y cómo este hecho afecta al calado sobre el cual se produce el cambio del perfil de velocidades. Así, por encima del nivel de las crestas el flujo se acelera a una cota de $z \sim 5$ mm para los ensayos de alta densidad y $z \sim 10$ mm para los de baja densidad. A partir de esta cota, el perfil se desarrolla en los primeros milímetros con una forma logarítmica, aunque esta región es muy pequeña, ya que a partir de $z \sim 20 - 30$ mm (que se corresponde con $0.15-0.2 z/H$) comienza la influencia de la región intermedia y externa del flujo.

También se puede observar cómo la rugosidad afecta al campo de velocidades en la región externa. Para densidades de reclutamiento bajo, las diferencias entre las velocidades de ensayo son muy pequeñas, y todos los perfiles, a excepción del V01 y V06, parecen colapsar en uno único. Sin embargo, para el reclutamiento alto, si que se aprecia la gradación de velocidades similar a la encontrada para los ensayos de lecho liso (Figura 4.62).

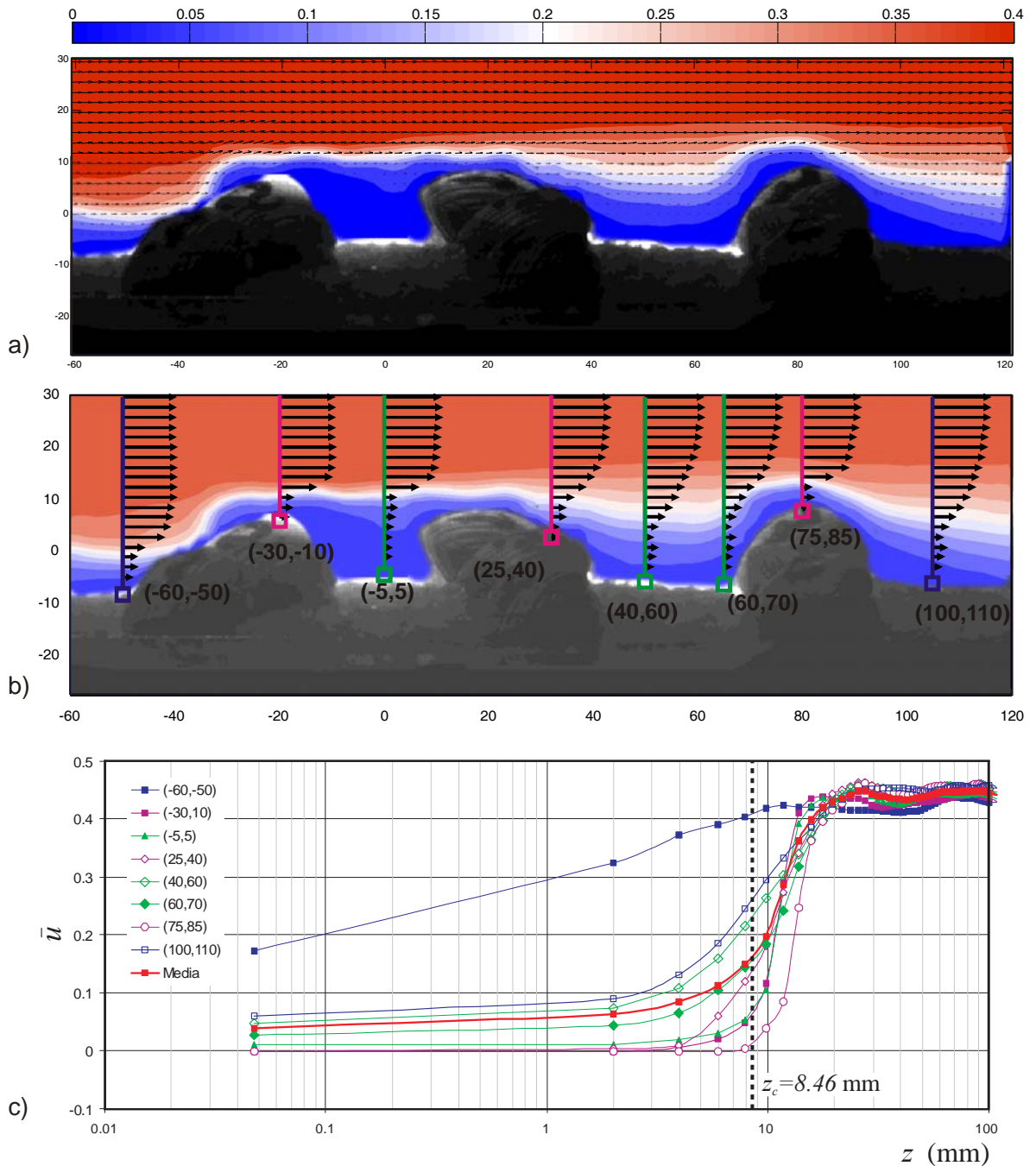


Figura 4.82. Evolución del perfil de velocidades sobre el lecho de berberechos en el ensayo V06T3BV: a) campo de velocidades sobre el módulo de velocidad, b) perfiles de velocidad horizontal doblemente promediados sobre las coordenadas señaladas bajo cada perfil y c) comparación de la forma de los diferentes perfiles de velocidad con el perfil doblemente promediado sobre todo el dominio de análisis.

Como se ha comentado, en la Figura 4.81, se puede observar cómo el flujo por debajo de las crestas del lecho (símbolos rellenos) está retardado respecto al perfil situado sobre los moluscos (símbolos vacíos). En la región del lecho o interfásica, la ley de velocidades sigue en general una tendencia lineal, constada en otros estudios de flujo rugoso sobre p.ej. gravas (ver

entre otros Nikora *et al.*, 2007 o Detert, 2008). En algunos perfiles se puede apreciar que el perfil presenta un máximo relativo localizado en dentro del lecho.

Estos máximos relativos se pueden explicar en parte por el hecho de incluir en el promedio de todo el perfil regiones con un perfil logarítmico desarrollado desde el lecho de arena, regiones con un perfil desarrollado sobre los berberechos y regiones influenciadas por las estelas formadas detrás de los moluscos. Estos tipos de perfiles se representan en la Figura 4.82, donde además se observa como el retardo del perfil es mayor sobre los moluscos (perfiles en color magenta) y mucho menor al inicio (donde no parece existir influencia del grupo de berberechos sobre el perfil) y al final de la zona de análisis (perfiles en color azul).

Estas circunstancias se han constatado en el resto de escenarios analizados (tallas y estados), aunque los patrones de comportamiento no se reproducen con total exactitud en el resto de ensayos debido a la variabilidad espacial del lecho. Es decir, a pesar del elevado número de ensayos realizado, no se ha encontrado un patrón de comportamiento “universal” del flujo sobre los berberechos fundamentalmente porque los lechos analizados son diferentes. Los procesos de colocación, recolocación y arrastre de los moluscos antes y durante los experimentos afectan a la estructura del flujo. Para poder analizar con detalle este tipo de patrones sería necesario realizar los ensayos sobre unas condiciones de lecho fijo (p.ej. pegando los berberechos al lecho o vaciándolos y rellenándolos de algún material denso como un mortero o canicas de acero).

Los perfiles de velocidad horizontal doblemente promediados se han empleado para determinar el valor de la **velocidad de fricción** con el método del ajuste de la ley logarítmica de velocidades. Siguiendo la metodología descrita en otros trabajos como Nikora *et al.*, (2001) Bigillon *et al.*, (2006) o Mignot *et al.*, (2009) se han empleado los puntos del perfil situados por encima del nivel de las crestas y por debajo de un calado de unos 20 – 25 mm ($\sim 0.15 - 0.20 z/H$). Para la obtención de las velocidades de fricción se empleó inicialmente la expresión logarítmica para lecho rugoso, ecuación (4.21)). Esta ecuación en su forma general presenta tres incógnitas: la velocidad de fricción u_* , la rugosidad características z_0 y la distancia a la que se sitúa el plano de velocidad nula d .

En algunos trabajos recientes (Detert, 2008 y Mignot *et al.*, 2009) de flujos rugosos sobre lecho de gravas la posición $z=d$ coincide prácticamente con la posición del plano $z=0$ (con variaciones del orden de ± 1 mm), obtenido como la posición media entre los senos y las crestas del lecho. Por este motivo, se optó por emplear directamente el valor $d=0$ en la ley logarítmica de velocidades⁹⁴:

$$\langle \bar{U} \rangle = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (4.34)$$

Para determinar el valor de la velocidad de fricción y de la rugosidad característica de la ley logarítmica, se he empleado la ToolBox de Matlab para interpolar nubes de de puntos con expresiones arbitrarias de ajuste Ezyfit® desarrollada por Frederic Moisy (<http://www.fast.u-psud.fr/eazyfit>).

⁹⁴ La validez de esta hipótesis también se comprobó en una serie de experimentos donde se ajustó la expresión general logarítmica para lechos rugosos, ecuación (4.19), y se determinó el valor de d en el orden de $\sim 10^{-1}$ mm.

Al emplear la ecuación (4.34) para estimar la velocidad de fricción, se está asumiendo que el plano de Nikuradse $z=d$ está situado a una distancia $z=-z_c$ (es decir, la distancia entre z_m y la posición de las crestas del lecho, Figura 4.83).

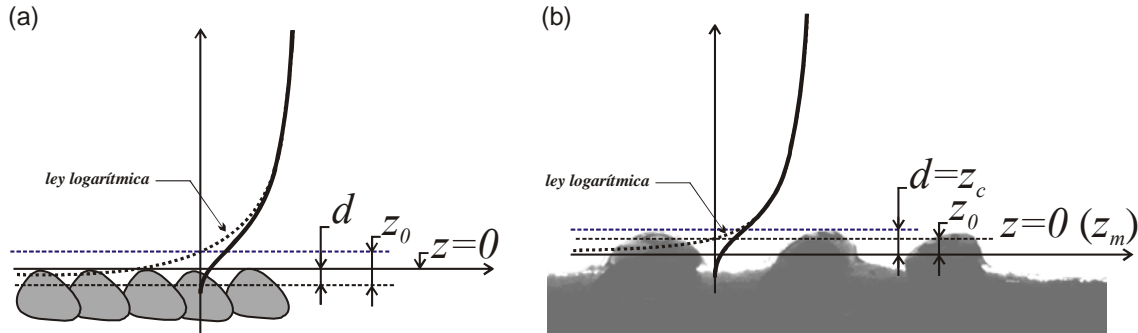


Figura 4.83. Definición geométrica de la ley logarítmica de velocidades (a) posición general de los planos y longitudes características, z_0 : intersección de la ley con las ordenadas y $z=\pm d$: asíntota de la ley logarítmica; (b) sistema de referencia y posición del plano $z=0$ en la determinación de las velocidades de corte estimadas en este trabajo.

Esta distancia se corresponde con $\sim 0.53 \pm 0.12$ veces el ratio z_c / Δ en los ensayos de baja densidad y $0.38 \pm 0.12 z_c / \Delta$ para los ensayos de alta densidad, como se recoge en la Tabla 4.31. En esta tabla se presenta la relación de este ratio con la talla de los ensayos, que como se puede apreciar es decreciente con el tamaño de los moluscos.

Tabla 4.31. Posición del plano $z=0$ relativa a la longitud característica de la rugosidad Δ y al diámetro medio de los moluscos en función de los factores talla y densidad de reclutamiento (valor medio \pm desviación típica).

FACTOR		z_c / Δ (-)	z_c / d_{50} (-)
TALLA	15-20 mm	0.57 \pm 0.13	0.29 \pm 0.07
	20-25 mm	0.49 \pm 0.13	0.32 \pm 0.10
	25-30 mm	0.41 \pm 0.13	0.27 \pm 0.09
	30-35 mm	0.37 \pm 0.11	0.27 \pm 0.11
DENSIDAD	BAJA	0.53 \pm 0.12	0.34 \pm 0.08
	ALTA	0.38 \pm 0.12	0.24 \pm 0.08

En la Tabla 4.31 también se presenta el ratio entre la posición del plano $z=d$ y el diámetro medio de los berberechos para cada talla (ver Figura 4.51). En este caso parece no existir una relación significativa de este ratio con la talla analizada, encontrándose un valor medio de $z_c / d_{50} \sim 0.28 \pm 0.08$. La variación de este ratio con la densidad de reclutamiento parece significativa, con valores de 0.34 ± 0.08 y 0.24 ± 0.08 para la densidad baja y alta respectivamente. Se puede decir que los valores encontrados están en el orden de magnitud de los valores citados en la literatura (0.15 a $0.30 z / d_{50}$, ver apartado 4.3.5 y Cap 2, §2.3.2).

En el apartado siguiente, tras exponer las principales características de las leyes de intensidades turbulentas y tensiones, se presentará una comparación de las velocidades de corte estimadas con esta metodología y con las determinadas a partir de los perfiles de tensiones de Reynolds y de forma.

Intensidades turbulentas y tensiones de corte

A continuación se presenta el análisis de las intensidades y tensiones de Reynolds y forma para los ensayos realizados con la talla de berberechos comprendidos entre los 20 y los 25 mm. Las tendencias encontradas para esta talla son extrapolables a los resultados obtenidos para resto de tallas analizadas, que se encuentran en el Apéndice 3.

En general, en este apartado se comprobará como **la estructura de las tensiones e intensidades está afectada por una serie de factores**. El primero será la presencia de corrientes secundarias, motivadas por el ratio B/H y porque las medidas no se realizaron en el centro del canal. Otro fenómeno que afectará a la estructura de tensiones e intensidades es la no uniformidad del flujo, provocado por la presencia del parche de berberechos y el incremento de velocidades localizado sobre el mismo (ver p.ej. Figura 4.77). La forma, tamaño, reclutamiento y distribución de los berberechos también se relacionará con la tridimensionalidad del flujo cerca del lecho, y esta tridimensionalidad también afectará a la distribución de tensiones e intensidades turbulentas de Reynolds y/o de forma.

Además de estas variables experimentales, la variabilidad entre los perfiles se puede atribuir a dos aspectos del desarrollo experimental. El primero es el tipo de motor empleado, que como se ha comentado en los experimentos de lecho liso, provoca que las distribuciones de las velocidades más bajas (V01 a V03) y las de las más altas (V04-V06) se asemejen entre ellas. El segundo factor son los pequeños cambios de alineación que pudieron sufrir los deflectores del canal, desmontados para las operaciones de limpieza efectuadas cuando se terminaban los experimentos con moluscos vivos (§4.3.4, §4.4.2).

En la Figura 4.84 y en la Figura 4.85 se presentan las **intensidades turbulentas horizontales** doblemente promediadas $\sigma_{\langle u \rangle}^-$ para los ensayos realizados con los moluscos de talla comprendida entre los 20 y los 25 mm.

El análisis de los perfiles revela que existe solape de las intensidades turbulentas en las dos familias de velocidades por encima del nivel de las crestas del lecho. Unos ~5 o ~10 mm por encima de este nivel ($z \sim 15$ mm y $z \sim 10$ mm para las densidades bajas y altas respectivamente), el colapso es todavía mayor y las diferencias entre los grupos de velocidades V01 a V03 y V04 a V06 (asociadas al tipo de motor) son ligeramente más claras.

Fuera de esta región, que se corresponde aproximadamente con la zona interfásica y rugosa, las intensidades turbulentas para las velocidades más bajas son ligeramente superiores a las de los escenarios equivalentes con las tres velocidades superiores. Sin embargo, en la región rugosa, donde se producen los valores máximos de las intensidades turbulentas, parece existir una relación de proporcionalidad entre la velocidad de ensayo y el pico de la intensidad turbulenta (ver Figura 4.85, a).

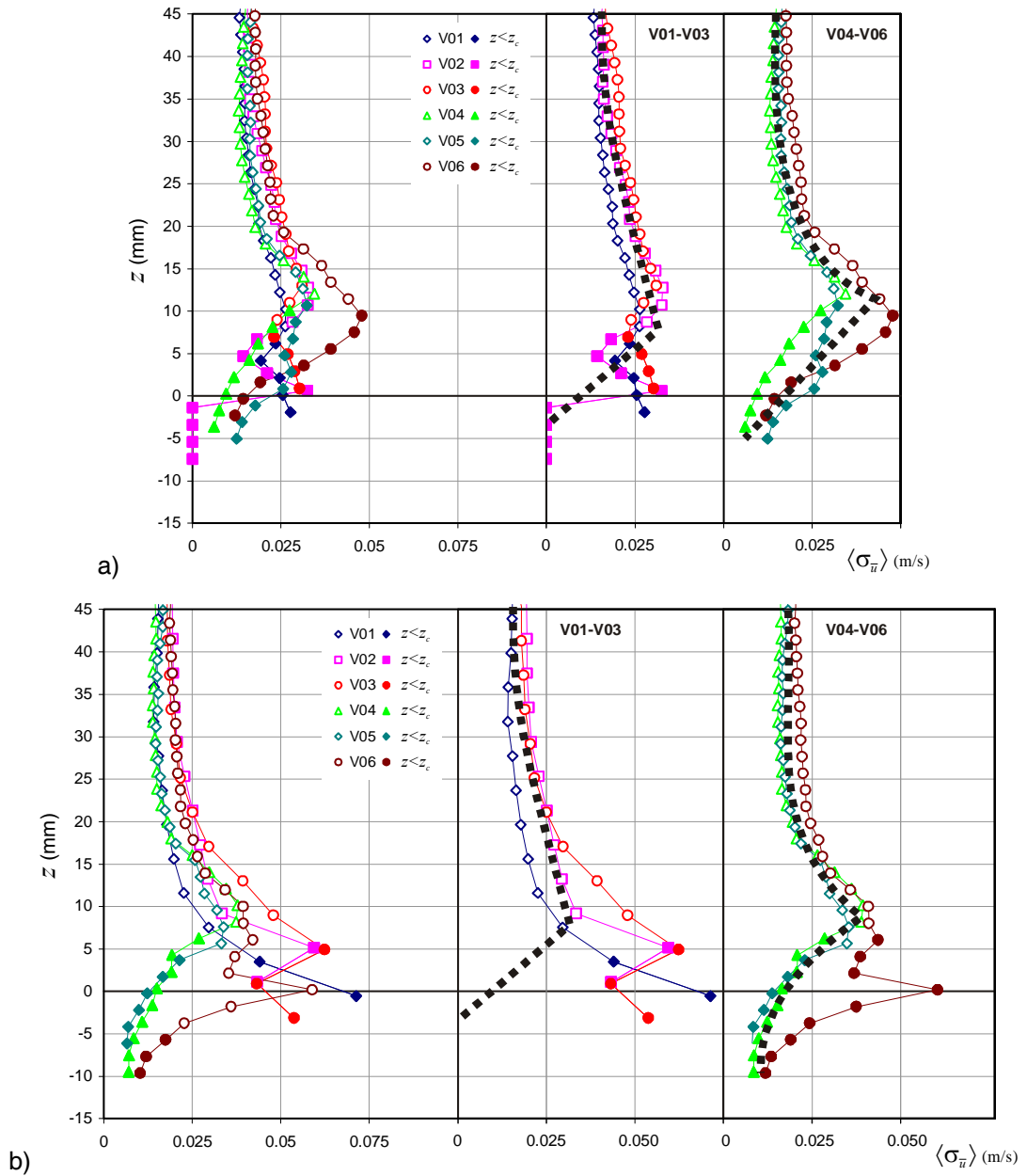


Figura 4.84. Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para la componente horizontal de la velocidad para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm con los moluscos vivos: a) densidad baja y b) densidad alta.

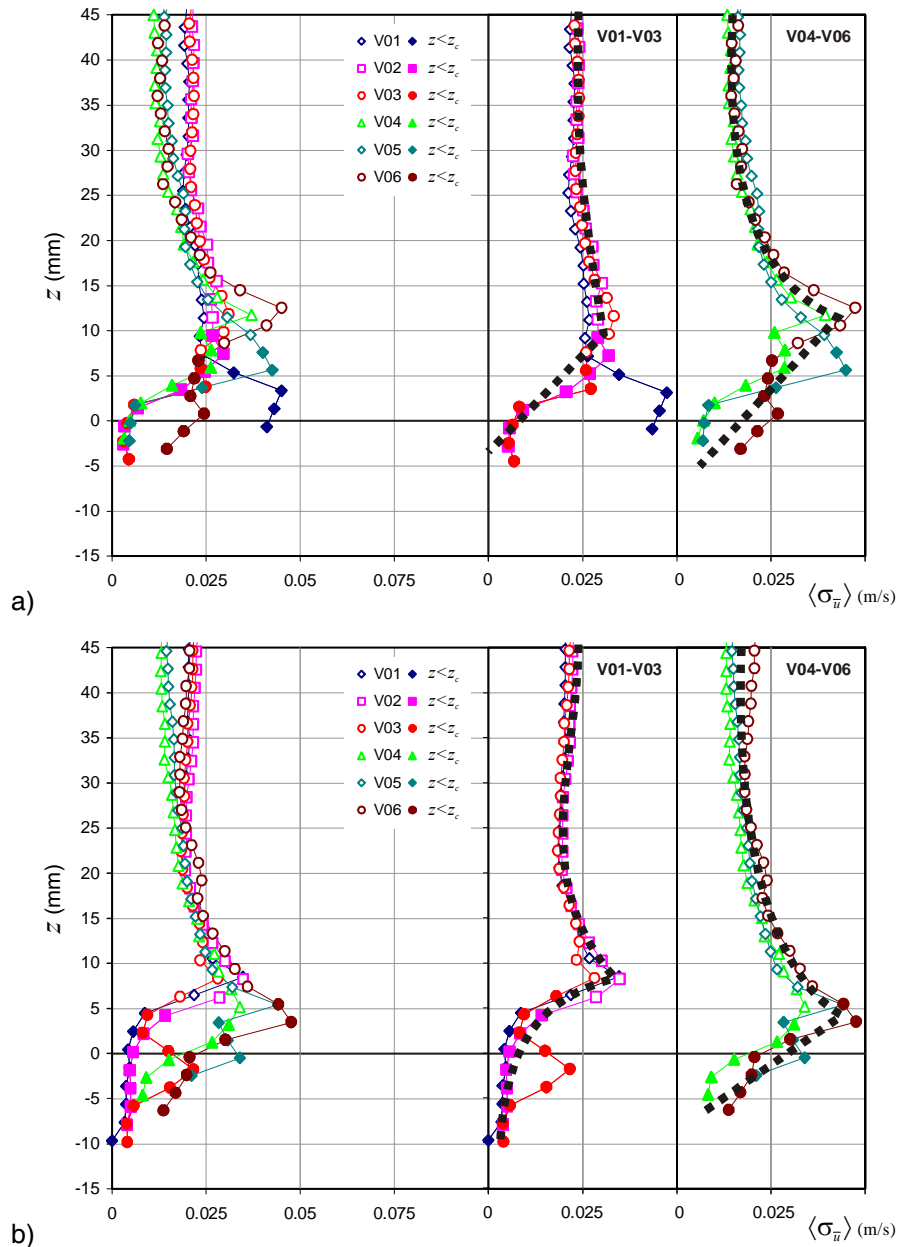


Figura 4.85. Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para la componente horizontal de la velocidad para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm con los moluscos muertos: a) densidad baja y b) densidad alta.

Hay que señalar que las intensidades turbulentas presentadas en las figuras anteriores no se han adimensionalizado con la variable interna de cada ensayo o la obtenida para los ensayos de fondo liso porque sino la dispersión entre las curvas sería mayor. Esta circunstancia también se ha constatado en algunos trabajos de la literatura de flujo sobre gravas (p.ej. Aberle *et al.*, 2008). Por otra parte, en la región rugosa e interfásica, muy cerca y por debajo de las crestas del lecho, las diferencias entre las intensidades turbulentas en los diferentes ensayos son mayores. Además, parece que con las densidades de reclutamiento más altas, las intensidades están más retardadas (parecen seguir una distribución cóncava, $d\sigma_{\bar{u}}/dz < 1$) mientras que para la densidad baja la distribución es más lineal o incluso convexa.

En la Figura 4.86 se recogen las intensidades turbulentas $\sigma_{\langle \bar{u} \rangle}$ para todo el calado, diferenciando únicamente los perfiles por su velocidad y estado. En la figura se pueden observar como no existen prácticamente diferencias para los dos reclutamientos analizados (p.ej. en la Figura 4.86 (a) y (b) las distribuciones de la misma velocidad se solapan). Además, y al contrario de lo que sucedía para la región rugosa e interfásica, el incremento en las velocidades se traduce en un aumento de las intensidades turbulentas. Sin embargo, este incremento no es lineal desde la velocidad más baja a la más alta. Así, por efecto del cambio de motor, el incremento se produce dentro de los grupos V01 a V03 y V04 a V06.

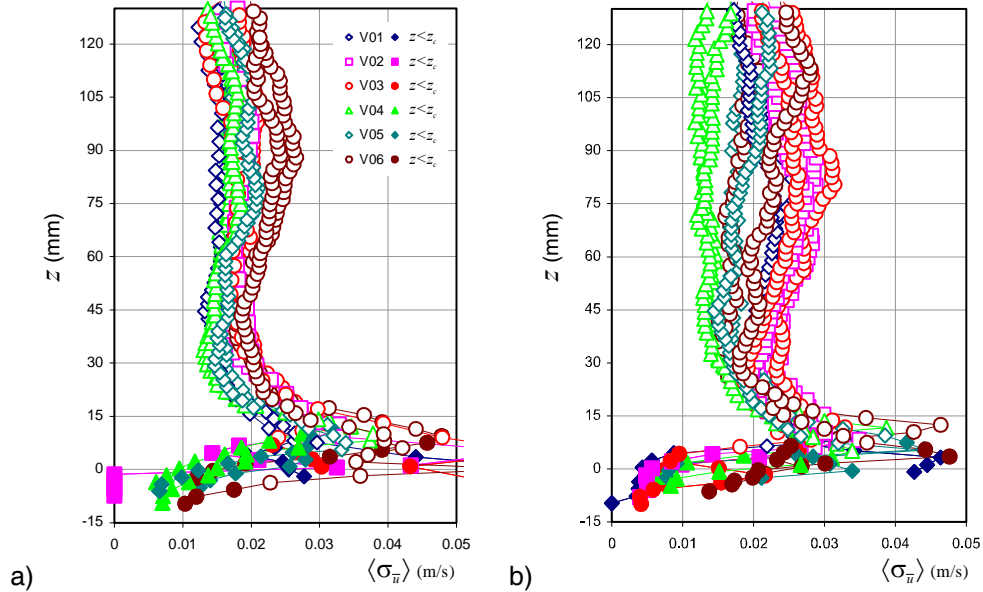


Figura 4.86. Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para la componente horizontal de la velocidad para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: a) moluscos vivos y b) moluscos muertos. En la figura se presentan las dos densidades de reclutamiento ensayadas y se puede apreciar como no existen prácticamente diferencias en el perfil atribuibles a este factor.

Las **intensidades turbulentas en la dirección vertical** $\sigma_{\langle \bar{w} \rangle}$, también para los moluscos de talla comprendida entre los 20 y los 25 mm, se presentan en la Figura 4.87. Respecto a este parámetro, se puede apreciar como no existen prácticamente diferencias en el perfil para las dos densidades de reclutamiento, dentro de las familias de velocidades V01-V03 y V04-V06. Sin embargo, en la Figura 4.87(a) se puede observar como para el estado vivo las dos familias de intensidades son diferentes a las del estado muerto, Figura 4.87(b). En esta ocasión, el aumento de velocidades no se traduce de una forma tan clara en un incremento de $\sigma_{\langle \bar{w} \rangle}$ en la región externa, como sucedía con $\sigma_{\langle \bar{u} \rangle}$. En la Figura 4.87(b) también se refleja el comportamiento anómalo de la distribución de velocidades para la densidad más baja. En esta situación

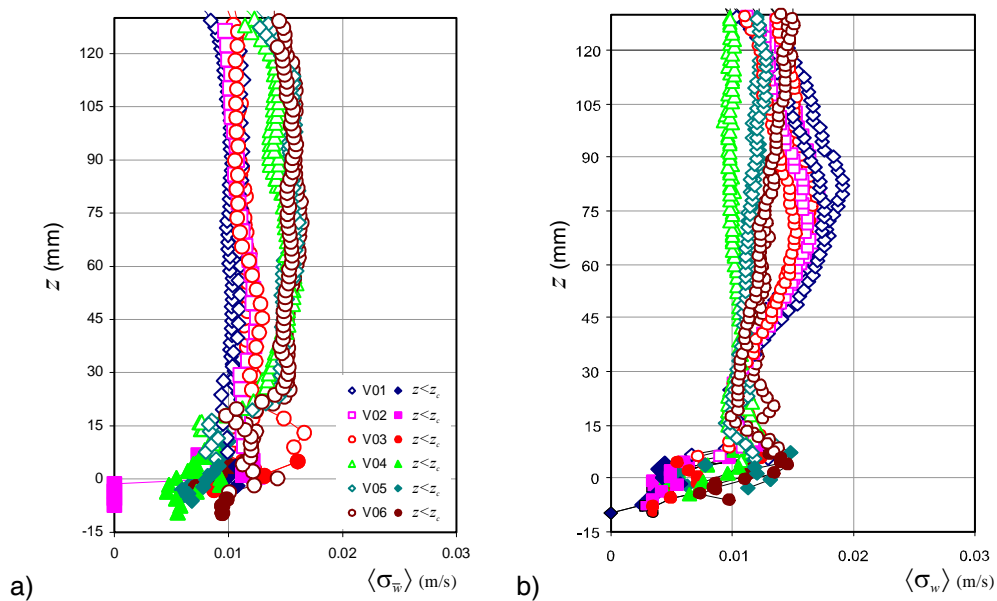


Figura 4.87. Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para la componente vertical de la velocidad para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: a) moluscos vivos y b) moluscos muertos. En la figura se presentan las dos densidades de reclutamiento ensayadas y se puede apreciar como no existen prácticamente diferencias en el perfil atribuibles a este factor.

En la Figura 4.88 se representan los **perfiles de intensidades turbulentas de forma** o de las perturbaciones espaciales también para el ensayo de la talla comprendida entre los 20 y los 25 mm. En la figura se puede apreciar como para cada ensayo desde la lámina libre hasta un calado de unos ~ 40 o ~ 50 mm, los perfiles para las tensiones de forma de la componente horizontal y vertical prácticamente se solapan.

Al analizar por separado las intensidades horizontales y verticales se puede observar como las primeras son prácticamente constantes en todo el calado, o para ser más exactos, crecen ligeramente con la profundidad hasta llegar al entorno de z_c , donde alcanzan su valor máximo. Como se ha comentado, las intensidades de forma verticales comienzan a separarse de las horizontales entorno a un calado de ~ 40 mm, medido desde z_m , alcanzado picos que doblan o triplican a las intensidades de forma horizontales, a una cota de unos ~ 15 mm. El máximo de las intensidades turbulentas verticales es mayor y mucho más pronunciado que su valor homólogo en intensidades de forma horizontales. Este hecho debe estar relacionado con el cambio provocado por la presencia de berberechos en la estructura de las velocidades, que es mucho más intenso y de mayor calado (afecta a una región vertical mucho mayor) en la componente vertical que en la horizontal de velocidades (ver Figura 4.80).

Respecto a las diferencias entre las configuraciones de los ensayos se puede señalar que para la densidad de reclutamiento más alta, parece que las tensiones de forma son mayores. Comparando el efecto del estado, parece que en los ensayos con berberechos muertos las intensidades turbulentas son menores a sus homólogas para los moluscos vivos.

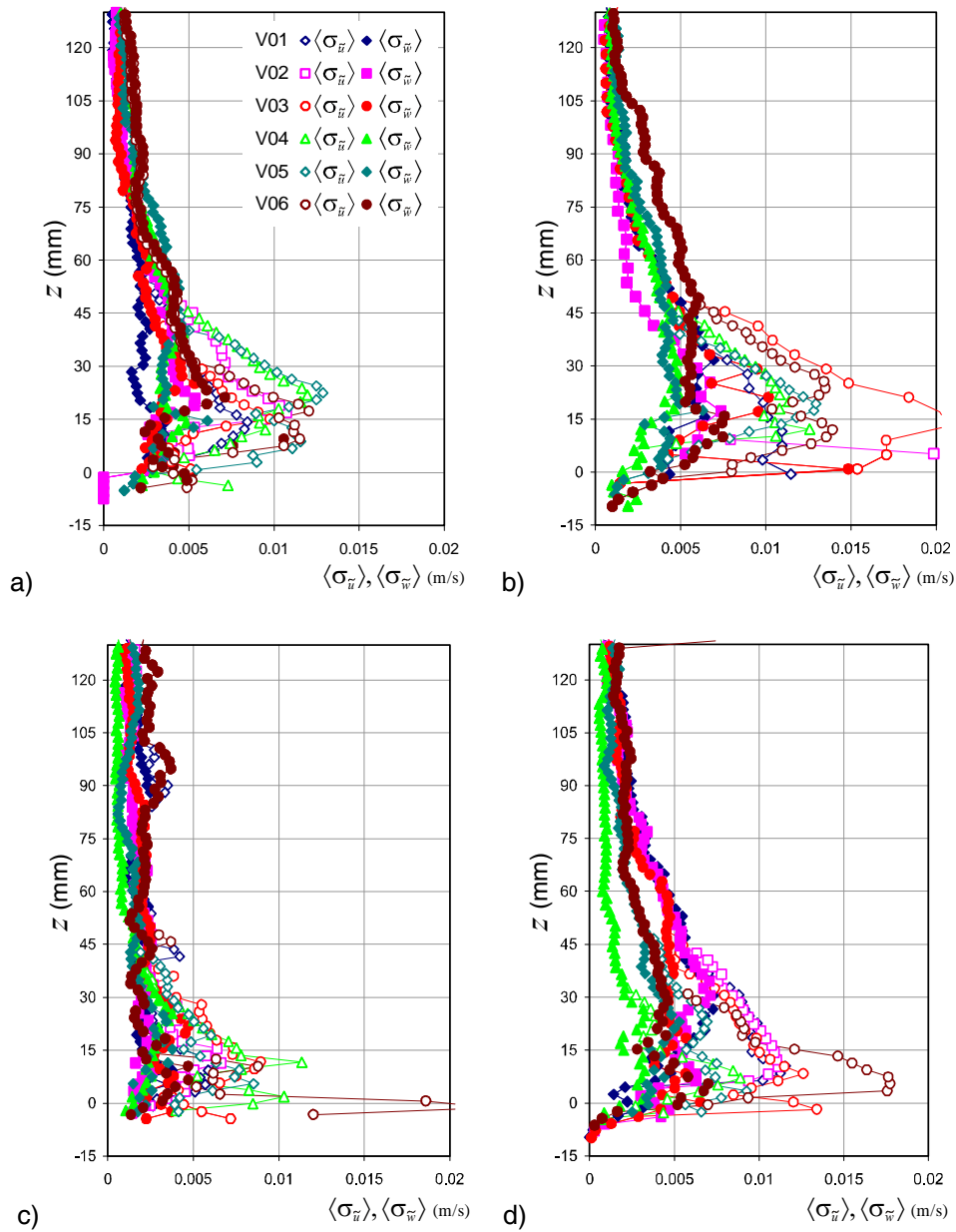


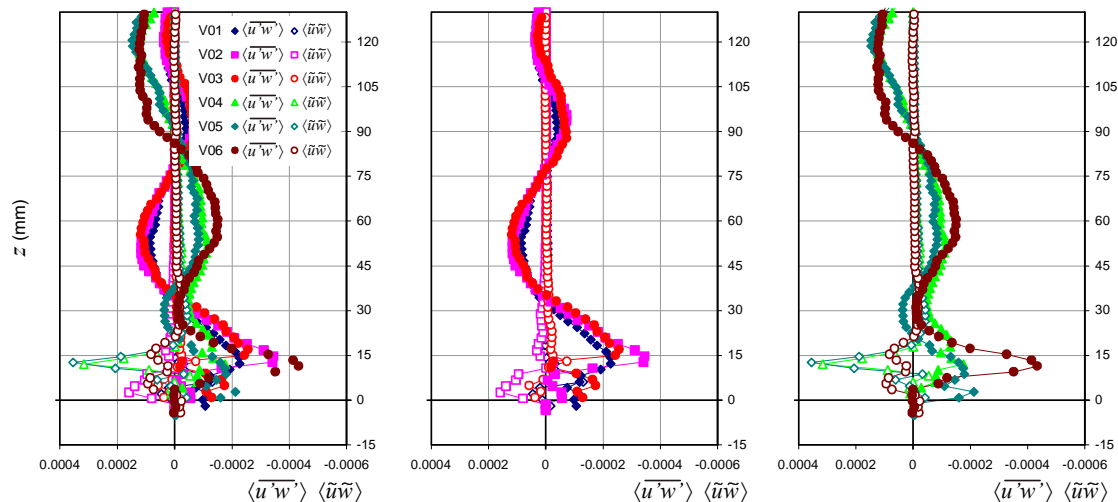
Figura 4.88. Perfiles de las intensidades turbulentas de forma horizontal y verticales (símbolos vacíos y rellenos respectivamente) para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: Moluscos vivos con densidad de reclutamiento baja (a) y alta (b) y moluscos muertos con densidad de reclutamiento baja (c) y alta (d).

Además, la variabilidad de los perfiles que se había encontrado en el apartado anterior en función del motor empleado (V01-V03 y V04-V06), la velocidad media de ensayo o el estado, desaparece. Parece por tanto que el estudio de las intensidades de forma no permite apreciar las pequeñas diferencias de configuración del canal de ensayo o incluso de velocidad de ensayo que si se determinaban al estudiar las intensidades turbulentas de Reynolds. Es decir, la estructura de las intensidades de forma es independiente de las velocidades y está fuertemente correlacionado con la estructura del lecho. Esta circunstancia ha sido constatada en otros trabajos de flujos rugosos como el de Aberle *et al.* (2008), que analizaron varios

caudales sobre un lecho fijo acorazado de gravas y no encontraron diferencias significativas en los perfiles de intensidades y tensiones de forma.

Los **esfuerzos de corte de Reynolds y forma** doblemente promediados para los berberechos de 20 – 25 mm para el estado vivo y muerto, en la Figura 4.89 y Figura 4.90 respectivamente. En estas figuras se aprecia el efecto combinado de las corrientes secundarias y de la no uniformidad del flujo en la zona de análisis, en la estructura de las **tensiones de Reynolds**. De hecho, la forma atípica de las distribuciones se podría asimilar a la suma o interacción entre las distribuciones habituales de flujo 3D uniforme en canal estrecho y flujo 2D (o 3D) acelerado. En la Figura 4.68 (c) y (d) se pueden encontrar dos ejemplos extraídos de Nezu y Nakagawa (1993) y Song, (1994).

va)



b)

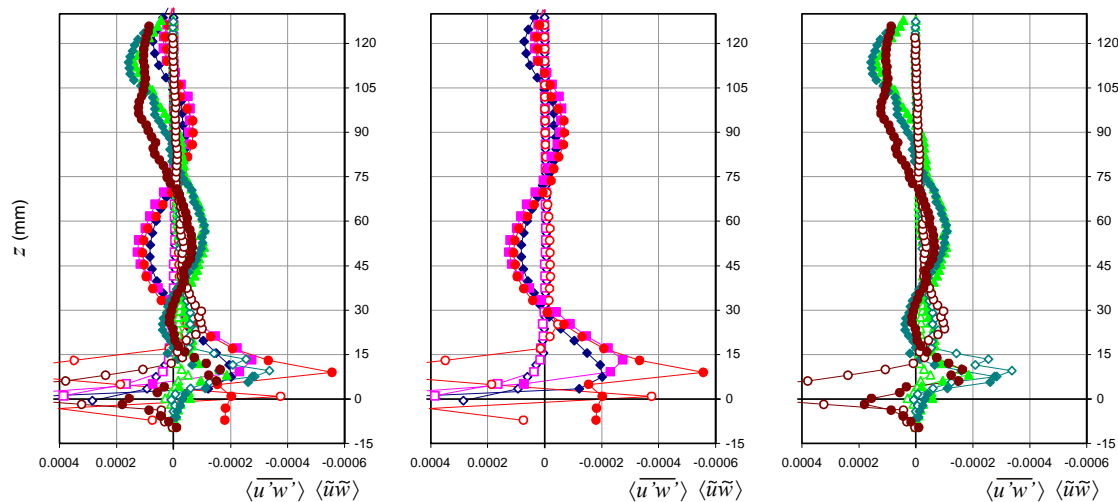


Figura 4.89. Perfiles de los esfuerzos de corte de Reynolds y forma doblemente promediados (símbolos rellenos y vacíos respectivamente) para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm y estado vivo: a) densidad baja y b) densidad alta.

También es significativo que las leyes de tensiones turbulentas presenten varios cambios de signo en la vertical. Esta estructura podría reflejar la superposición de varias celdas de recirculación en la sección, asociadas al efecto combinado corrientes secundarias, la no

uniformidad del flujo, pero también, relacionadas con la rugosidad del lecho. Así, cuando el lecho es más rugoso (el flujo es menos rasante), con las densidades de reclutamiento baja, parece que los cambios de signo de las tensiones de Reynolds se producen más arriba. Así, p.ej. para la velocidad V06 ● y el estado vivo -Figura 4.89- , el último tramo con tensiones positivas comienza en un calado de ~90 mm con la densidad baja y en un calado de ~75mm con la alta. Esto podría interpretarse como que las velocidades verticales tienen más importancia relativa y las fluctuaciones en el plano vertical uw son mayores cuando el lecho es más rugoso y provocan el ascenso de los patrones de recirculación.

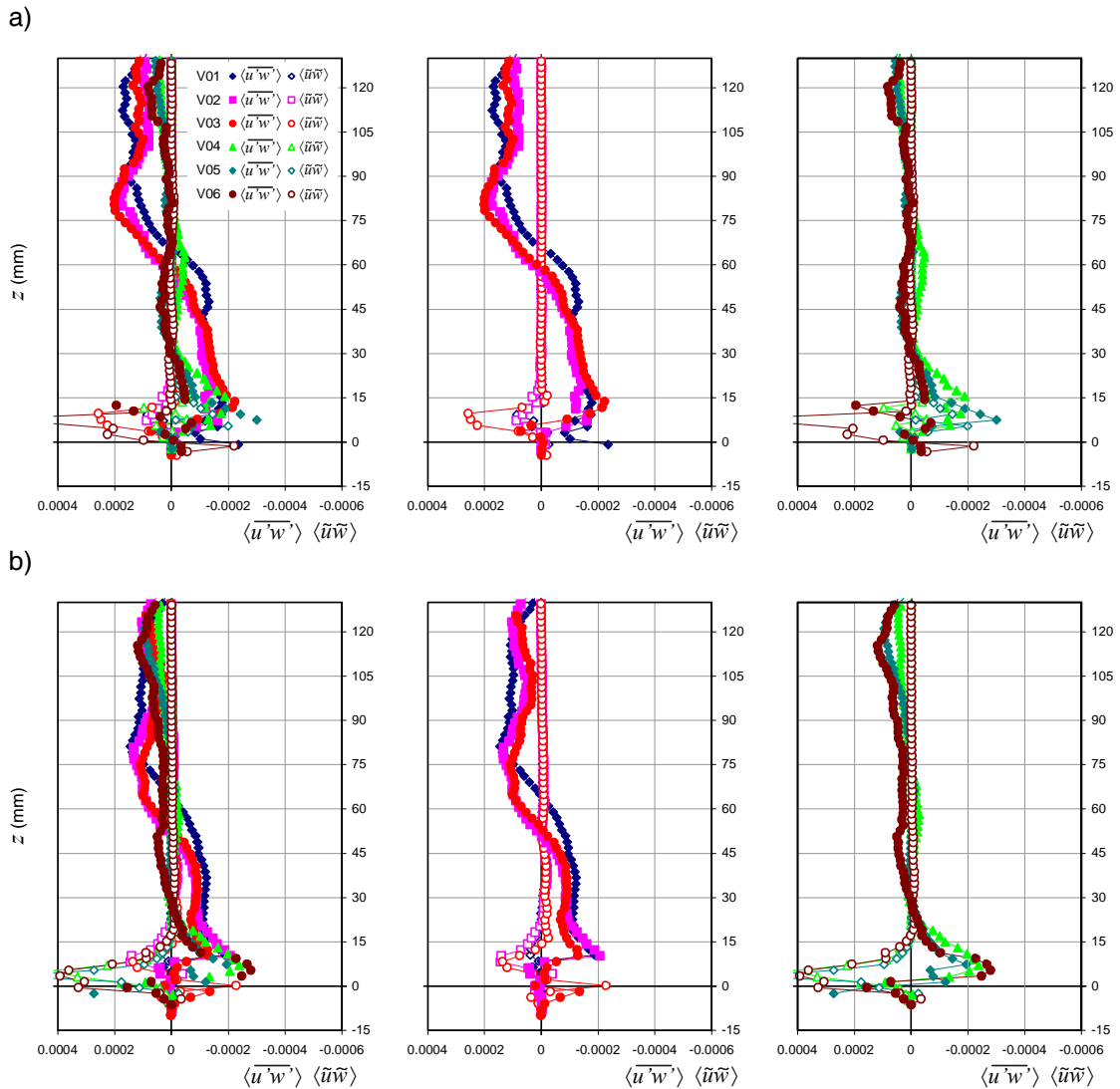


Figura 4.90. Perfiles de los esfuerzos de corte de Reynolds y forma doblemente promediados (símbolos rellenos y vacíos respectivamente) para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm y estado muerto: a) densidad baja y b) alta.

Sin embargo, es difícil asegurar con certeza cual o cuales son los factores más importantes que determinan la estructura vertical del flujo por varios motivos. Por ejemplo, la configuración del lecho es diferente en cada escenario analizado. Así, aunque mantiene la talla y el grado de reclutamiento, los berberechos se dispusieron aleatoriamente sobre la arena, y por el propio proceso de arrastre, la forma del lecho en cada ensayo era única. Este hecho limita en parte la posibilidad de comparar ensayos de diferente velocidad.

Además, también aparecen otros factores el agrupamiento de las distribuciones en familias en función del motor empleado (V01 a V03 y V04 a V06) o en función del estado (cambios originados en las diferencias en la alineación de los deflectores tras la limpieza del mismo). Así, analizando las tensiones de Reynolds también se puede observar que en general, y dentro de cada familia, el incremento de la velocidad de ensayo provoca un incremento en estos esfuerzos de corte. También se puede observar como las familias de tensiones del mismo grupo de ensayos talla x reclutamiento x estado no son directamente comparables ya que un incremento neto de la velocidad no tiene porque provocar un incremento de las tensiones (p.ej. en la Figura 4.89 (a) las tensiones de Reynolds para las velocidades V02 y V03 son superiores a las de las velocidades V04 y V05).

Respecto a las **tensiones de forma**, se puede indicar que en la mayoría de los escenarios son similares, con valores prácticamente nulos unos 2 o 3 cm por encima de las crestas del lecho. En la Figura 4.91 se presenta la distribución de esfuerzos de corte dispersivos en función del reclutamiento. Se puede apreciar como, en general, las tensiones de forma son positivas, de signo opuesto a las tensiones de Reynolds y con los valores máximos en el entorno de z_c .

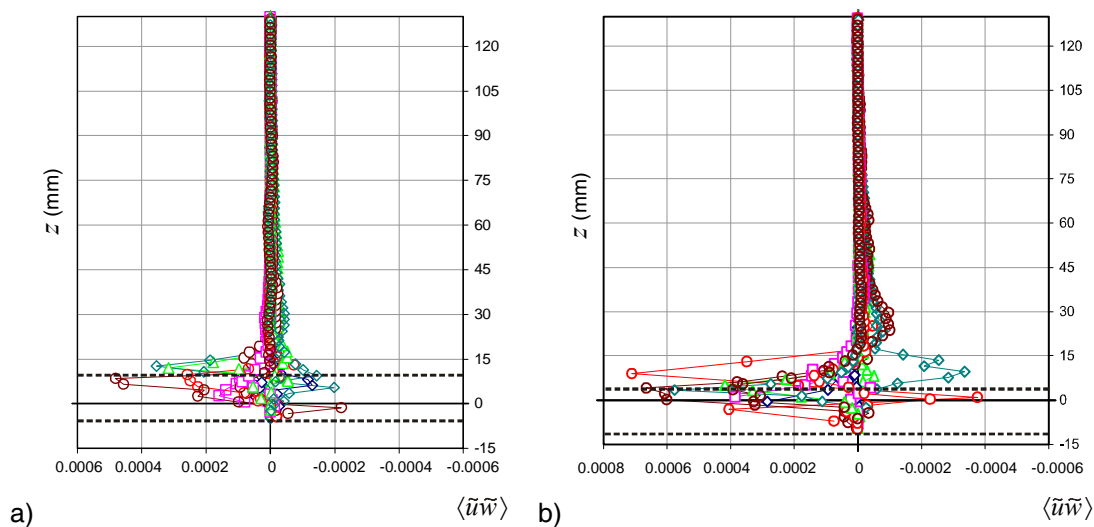


Figura 4.91. Perfiles de los esfuerzos dispersivos doblemente promediados para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: a) densidad baja y b) densidad alta. El resto de factores no se diferencian. Se representa la posición media de las crestas y de los senos del lecho con una línea discontinua.

Como sucedía con las intensidades dispersivas, la variabilidad de los tensiones de Reynolds asociada al motor o al estado del ensayo desaparece en las tensiones de forma, y aunque se pueden encontrar distribuciones negativas, la mayoría de las distribuciones son positivas. Además, y también como sucedía con las intensidades turbulentas de forma, las tensiones dispersivas son menores para el reclutamiento menor.

El comportamiento de este término dispersivo no está totalmente esclarecido en la literatura. En algunos trabajos de flujos 2D uniformes rugosos sobre gravas naturales (es habitual que el término dispersivo represente entorno a un 10-20% del valor de las tensiones de Reynolds y tenga el mismo signo que éstas (Mignot *et al.*, 2009). Manes *et al.* (2007) realizaron una serie de experimentos sobre esferas emulando un lecho de gravas y encontraron que la contribución de las tensiones dispersivas a la tensión total oscila entre un 20% y un 50%. Además, estos autores sugieren que a medida que la sumergencia relativa del flujo desciende ($H/\Delta \ll 1$), se

produce una redistribución en las tensiones de forma que absorben el incremento de tensión total. Un fenómeno similar fue sugerido por Giménez-Curto y Corniero-Lera (1996).

Sin embargo, Detert (2008) describe valores positivos para las tensiones de forma para un flujo rugoso sobre gravas y esferas, con una contribución cercana al 30% del término de Reynolds. Hay que señalar los experimentos de Detert se realizaron en un canal estrecho con corrientes secundarias ($B/H \sim 4.5$) y algunos con flujos ligeramente no uniformes.

Otro ejemplo de falta de universalidad en las distribuciones de tensiones dispersivas se puede encontrar en los estudios sobre rugosidades bidimensionales formadas por traviesas. Así, Coleman *et al.* (2007b), cuantificaron la contribución de las tensiones de forma en el esfuerzo tangencial total en un $\sim 20\%$ y un $\sim 5\%$ para rugosidades tipo $-d$ y $-k$ respectivamente, en ambos casos de sentido negativo. En un estudio similar, Pokrajac *et al.* (2008), señalan que la contribución para rugosidades tipo $-d$ es similar a la encontrada por Coleman *et al.*, pero en las rugosidades que representan los obstáculos aislados, los esfuerzos de forma son positivos y representan un $\sim 20\%$ de la tensión total.

En flujos sobre lechos de gravas naturales, otros autores como Aberle *et al.* (2008) determinaron perfiles dispersivos muy irregulares, con bastantes oscilaciones que se amplificaban entre las crestas y los senos del lecho, con valores positivos y negativos. Además, la forma y el signo del perfil dependen fuertemente de la posición del mismo en el lecho. Así, aguas arriba de un gran canto de gravas la distribución es negativa en el entorno del lecho, pero en una zona lateral puede ser positiva, como se puede ver en la Figura 4.92. Estos autores también señalan que la forma de las tensiones no depende de la velocidad del flujo.

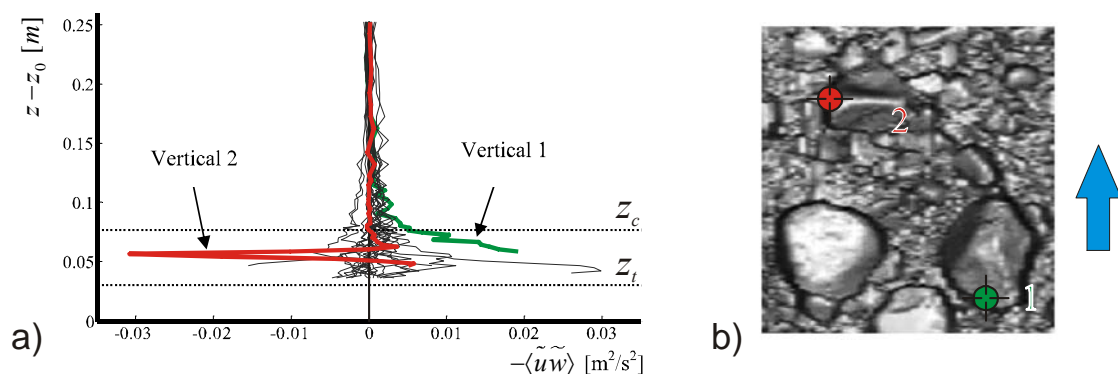


Figura 4.92. a) Distribución de las tensiones dispersivas en un lecho acorazado de gravas y su relación con b) la posición del punto de medida (Aberle *et al.*, 2008). La flecha azul señala la dirección del flujo.

Entonces, se podría decir que en general, en los ensayos con los grupos de berberechos se ha encontrado un comportamiento similar al reflejado por Aberle *et al.* (2008) sobre lechos tridimensionales de gravas.

La Figura 4.91 revela también que las tensiones de forma son muy importantes en estos ensayos, alcanzando valores que en algunos casos son del mismo orden de magnitud que las tensiones de Reynolds. En promedio, el ratio $\left| \frac{\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle}{\langle u'w' \rangle} \right|$ vale 0.53 ± 0.59 . Además, existe cierta relación entre este ratio y la talla ensayada, siendo las tensiones dispersivas más importantes cuanto mayor es el tamaño del molusco y, por tanto, mayor es la rugosidad. Así,

para la talla más pequeña la relación $\left| \frac{\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle}{\langle u'w' \rangle} \right|$ vale 0.36 ± 0.42 , y para la talla más grande 0.76 ± 0.62 (para las tallas intermedias vale 0.46 ± 0.70 y 0.54 ± 0.55). También se ha encontrado que las tensiones dispersivas son más importantes cuando la densidad de reclutamiento es alta, 0.58 ± 0.55 vs 0.48 ± 0.64 , y que los factores velocidad y estado no son significativos.

Por tanto, las tensiones dispersivas en estos experimentos parecen mucho más importantes que en otros flujos rugosos descritos en la literatura. Sin embargo, en los ensayos consultados no es frecuente encontrar situaciones con flujos no uniformes o con presencia de corrientes secundarias, al menos tan alta porque lo habitual es medir el flujo en el plano central del canal.

Respecto a la posición donde se producen los máximos en las distribuciones de tensiones se puede señalar que estos se producen ligeramente por encima de las crestas del lecho z_c , cuando hablamos de los esfuerzos de Reynolds, y sobre las crestas, cuando se trata de los términos dispersivos. Así, se ha determinado la posición media de las crestas del lecho en todos los ensayos en 7.0 ± 2.8 mm y la de los picos de las tensiones $\langle u'w' \rangle$ y $\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$ en 10.9 ± 11.6 mm y 7.7 ± 6.1 mm respectivamente.

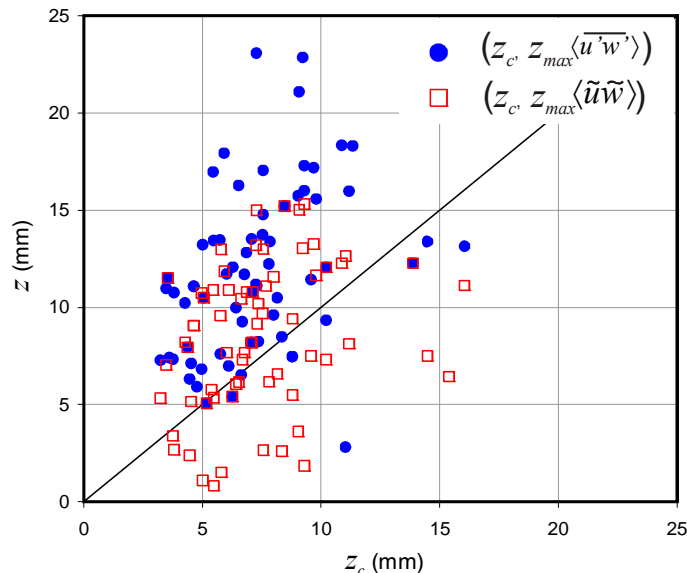


Figura 4.93. Relación entre la posición de las crestas del lecho y de los máximos de las distribuciones de esfuerzos de corte de Reynolds y de forma doblemente promediados. La línea recta representa el ajuste perfecto.

En la Figura 4.93 se ha representado la relación entre la posición de las crestas y la posición de los máximos de las distribuciones de tensiones, que como puede apreciarse, también presenta mucha dispersión. El análisis de las posiciones de los máximos de las intensidades turbulentas de Reynolds y forma también revela que estos datos presentan mucha incertidumbre. Así, el calado para las intensidades $\sigma_{\langle \bar{u} \rangle}$, $\sigma_{\langle \bar{w} \rangle}$, $\sigma_{\langle \tilde{u} \rangle}$ y $\sigma_{\langle \tilde{w} \rangle}$ es de 9.0 ± 14.1 mm, 41.9 ± 37.3 mm, 18.3 ± 11.2 mm y 11.7 ± 6.9 mm respectivamente. A pesar de esta dispersión, parece que existe una relación en la posición de las intensidades turbulentas horizontales y las intensidades dispersivas con la posición de las crestas del lecho, y una relación del pico de intensidades turbulentas verticales (41.9 ± 37.3 mm) y el calado donde se produce la velocidad máxima, δ_h , ubicado a 47.3 ± 22.9 mm.

Por último, se presenta a continuación una comparación entre las velocidades de corte estimadas a partir de la ley logarítmica de velocidades, u_{*log} , las estimadas a partir de la extrapolación de los perfiles de esfuerzos de Reynolds hasta los calados z_c y z_m ($z=0$), $u_{*uw,(z=z_c)}$ y $u_{*uw,(z=0)}$ y las determinadas a partir de la tensión máxima. $-\rho\langle u'w' \rangle - \rho\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$, $u_{*max,uw}$. Con este objeto, se presenta en primer lugar en la Tabla 4.32 el valor de las velocidades de fricción así determinadas en función de los factores velocidad-reclutamiento y talla-reclutamiento. En este análisis no se presenta el factor estado porque no se ha encontrado significativo. Hay que recordar que los valores medios de la velocidad de fricción característica para los factores analizados individualmente se recogen en la Tabla 4.27 y en la Tabla 4.28.

Tabla 4.32. Velocidades de fricción en los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación típica) para los factores velocidad-densidad y talla-densidad.

FACTOR		u_{*log} (m/s)	$u_{*uw(z=0)}$ (m/s)	$u_{*uw(z=z_c)}$ (m/s)	$u_{*max,uw}$ (m/s)
VELOCIDAD D.BAJA	V01	0.0418±0.01	0.0177±0.00	0.0159±0.00	0.0164±0.01
	V02	0.0413±0.01	0.0183±0.00	0.0166±0.00	0.0155±0.00
	V03	0.0442±0.01	0.0178±0.01	0.0161±0.00	0.0153±0.00
	V04	0.0476±0.01	0.0188±0.00	0.0132±0.01	0.0145±0.00
	V05	0.0508±0.01	0.0241±0.00	0.0166±0.01	0.0175±0.01
	V06	0.0448±0.01	0.0210±0.01	0.0143±0.01	0.0176±0.00
VELOCIDAD D.ALTA	V01	0.0342±0.01	0.0177±0.00	0.0162±0.00	0.0172±0.01
	V02	0.0356±0.01	0.0183±0.00	0.0167±0.00	0.0211±0.02
	V03	0.045±0.01	0.0207±0.01	0.0184±0.00	0.0167±0.01
	V04	0.0392±0.01	0.0199±0.00	0.0172±0.00	0.0179±0.01
	V05	0.0482±0.01	0.0234±0.01	0.0183±0.00	0.02±0.010
	V06	0.0407±0.01	0.0203±0.00	0.0172±0.00	0.0151±0.01
TALLA D.BAJA	15-20 mm	0.0367±0.00	0.0199±0.00	0.0106±0.01	0.017±0.00
	20-25 mm	0.0430±0.01	0.0189±0.01	0.0161±0.00	0.016±0.00
	25-30 mm	0.0525±0.01	0.0206±0.01	0.0177±0.00	0.015±0.01
	30-35 mm	0.0467±0.01	0.0193±0.00	0.0161±0.00	0.0167±0.01
TALLA D.ALTA	15-20 mm	0.0414±0.01	0.0196±0.00	0.0176±0.00	0.0176±0.01
	20-25 mm	0.0385±0.01	0.0191±0.00	0.0166±0.00	0.0140±0.01
	25-30 mm	0.0412±0.01	0.0206±0.00	0.0181±0.00	0.0217±0.01
	30-35 mm	0.0408±0.01	0.0209±0.01	0.017±0.00	0.0188±0.01

En la Tabla 4.32 se vuelve a comprobar como las velocidades de fricción estimadas a partir de la ley logarítmica de velocidades crecen con el factor velocidad y talla, aunque no lo hacen de un modo lineal. Así, para la velocidades V04 y V06 se produce un descenso en la velocidad de fricción u_{*log} .

La reducción de este parámetro entre las velocidades V03 y V04 se puede atribuir al proceso de interacción entre el transporte de berberechos y arena, ya comentado en el apartado 4.4.3.1. Para estas velocidades, se ha constatado visualmente que la movilización de la arena comenzaba a ser importante y los berberechos eran enterrados progresivamente provocando una reducción de la tasa de transporte. Para las velocidades más altas, los moluscos se movilizaban antes de que pudiesen ser enterrados, por lo que el comportamiento velocidad-velocidad de fricción vuelve a crecer aunque para el último escalón, la velocidad de fricción se vuelve a reducir debido a que, en este escenario, los moluscos se movilizan con más intensidad y el lecho se parece más a las condiciones de lecho liso.

Respecto al reclutamiento, se puede apreciar que para la densidad de ensayo baja, la velocidad de fricción es ligeramente superior a la encontrada para las condiciones de ensayo con densidad alta, como se puede observar en la Figura 4.94(a). Este fenómeno también se observa cuando se analiza la influencia del reclutamiento en la talla analizada, Figura 4.94(b).

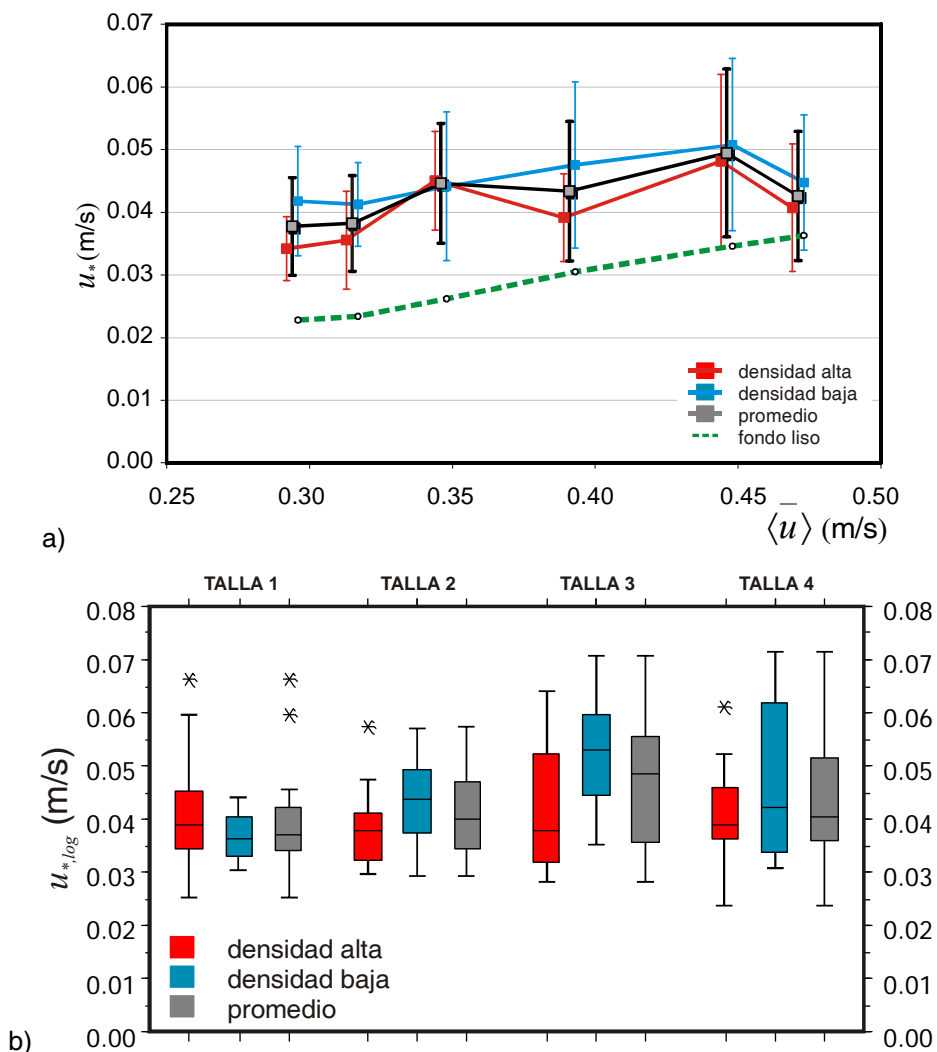


Figura 4.94. a) Relación entre la velocidad media de ensayo y la velocidad de fricción ($\pm SD$) para diferentes grados de reclutamiento (los datos relativos a la densidad baja y alta están desplazados ± 0.002 m/s en las abscisas para facilitar la visualización) y b) Gráfica de cajas y bigotes para la velocidad de fricción media en función del grado de reclutamiento.

En cualquier caso, lo que parece común al análisis fricción u^*_{log} respecto a cualquier factor es el grado de dispersión de la velocidad de corte que además se propaga cuadráticamente al estimar la tensión tangencial sobre el lecho. Esta dispersión se debe atribuir a la variabilidad de los perfiles de velocidad encontrados en los ensayos, motivada en parte por la disposición heterogénea del lecho de moluscos. Es decir, la colocación aleatoria de los berberechos, los movimientos de los mismos durante los ensayos, en definitiva, el haber realizado cada ensayo con una configuración de lecho diferente, influye de modo notable en la forma de los perfiles de velocidad doblemente promediados.

Sin embargo, tampoco se debe despreciar aquellos fenómenos que alejan la distribución de velocidades del perfil logarítmico. Estos aspectos, discutidos en el capítulo 2, son fundamentalmente el transporte de sedimentos (§2.4.4), la sumergencia relativa del flujo que para las tallas mayores de 20 mm es $H/\Delta < 10$, y, fundamentalmente la no uniformidad (§2.4.3), el efecto de las corrientes secundarias y la tridimensionalidad del flujo. Otros factores que también modificar la estructura del flujo son posibles efectos de flujo en curva o la propia distribución irregular en la rugosidad del lecho (el grado de reclutamiento), también afectan probablemente a los patrones de recirculación de flujo en los planos yz .

Todos estos factores afectan a la estructura vertical del flujo, es decir, a las leyes de velocidades, y también a las distribuciones de tensiones de corte e intensidades turbulentas. Por este motivo, las conocidas leyes para flujo 2D uniforme, presentadas en el apartado 2.4.2, no pueden aplicarse y además, no son reproducidas por el flujo. Por este motivo, las velocidades de fricción estimadas a partir de las distribuciones de tensiones son cuestionables, ya que no contemplan el efecto de las corrientes secundarias.

De hecho, si se analizan los valores de la velocidad de fricción estimada con estos procedimientos, se puede observar como prácticamente este parámetro no varía ni con la velocidad del flujo, ni con la talla ni el reclutamiento (Tabla 4.32). Este fenómeno también se presenta en la Figura 4.95, donde se han representado varios gráficos con la dispersión de las velocidades de fricción u^*_{log} , $u^*_{iw, (z=zc)}$, $u^*_{iw, (z=0)}$ y $u^*_{max, iw}$ en función de la velocidad media, máxima y la velocidad de fricción característica. Hay que señalar que la relación lineal perfecta entre u^*_{log} y u^* , es esperable porque las variables son iguales.

En esta figura se puede apreciar la dispersión u^*_{log} con la velocidad del ensayo, y como las velocidades estimadas a partir de los perfiles de tensiones son prácticamente constantes a lo largo de los ensayos realizados. Así, la velocidad de fricción estimada a la altura la posición media del lecho de 0.0199 ± 0.0048 m/s, y representa aproximadamente un $48.5\% \pm 13.6$ de la velocidad de fricción u^*_{log} . Sin embargo, si se analiza su contribución a la tensión tangencial sobre el lecho $\tau_0 (\propto u_*^2)$ ésta se reduce a un $25.3\% \pm 13.9\%$.

No es habitual encontrar este fenómeno en la literatura donde habitualmente se reproducen relaciones de proporcionalidad y ratios elevados entre las velocidad de fricción estimadas a partir del perfil logarítmico y las estimadas a partir de las tensiones tangenciales.

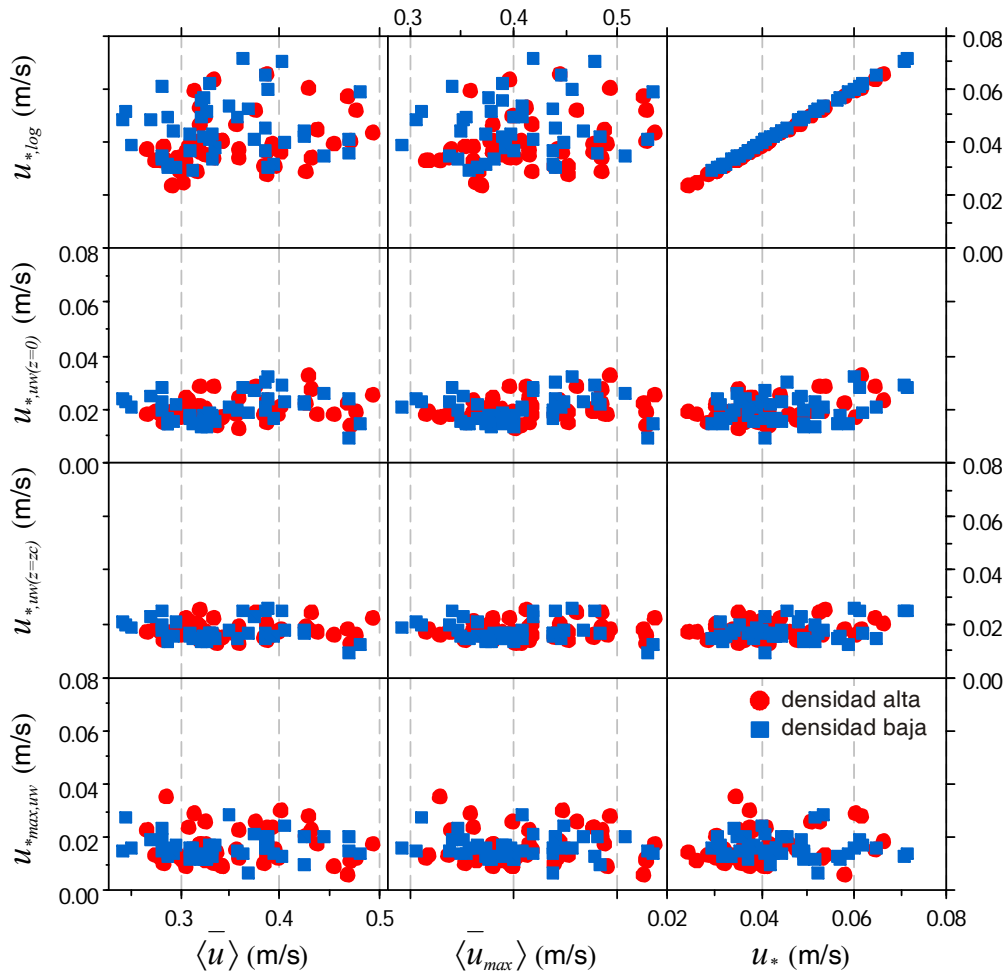


Figura 4.95. Matriz de correlación entre la velocidad doblemente promediada media y máxima y la velocidad de fricción característica con las velocidades de fricción estimadas a partir del perfil logarítmico $u_{*,log}$, de la extrapolación de las tensiones de Reynolds $u_{*,uv}(z=z_c)$, $u_{*,uv}(z=0)$ y a partir de la tensión tangencial total máxima $u_{*,max,uv}$, para los ensayos de tallasen función del grado de reclutamiento.

Estas cifras señalan la importancia de las corrientes secundarias en la sección analizada. Así, aproximadamente el 50% de la velocidad de fricción se origina por las fluctuaciones en el plano xz . El resto de factores que contribuyen al término $u_{*,log}$ son la no uniformidad del flujo, las diferencias en la rugosidad en la dirección y del canal, las corrientes secundarias y también, las incertidumbres asociadas a la determinación del perfil logarítmico de velocidades como la posición del plano $z=0$ o la propia aplicabilidad de esta ley a situaciones de flujo diferentes a 2D uniforme.

4.4.3.3. Desarrollo de funciones de transporte de fondo

En este apartado se intentará buscar una relación entre la velocidad de fricción y el grado de movilización de los berberechos. Para ello, se empleará un parámetro adimensional que representa dicha movilización, el número de Froude densimétrico o parámetro de Shields definido previamente en la ecuación (4.7), y las funciones de transporte de caudal sólido adimensional establecidas en las ecuaciones (4.14) y (4.15).

El parámetro de Shields es proporcional a la tensión tangencial sobre el lecho e inversamente proporcional al peso sumergido del “sedimento”, que en nuestro caso son los berberechos. Para determinar la tensión sobre el lecho se han empleado las velocidades de fricción calculadas a partir de la ley logarítmica de velocidades en los ensayos de transporte (§4.4.3.2) y también las velocidades de corte críticas correspondientes a la configuración con el lecho sin berberechos (§4.4.2.1). Para determinar el peso sumergido se han empleado los datos de densidad de los moluscos correspondientes al diámetro medio de cada talla (Tabla 4.11) y para caracterizar el diámetro, se ha usado el diámetro nominal D_n , estimado en función de la anchura del berberecho c con la expresión (4.27).

Se han usado las velocidades de fricción estimadas a partir de las leyes logarítmicas porque se consideran más representativas de la tensión tangencial del fondo (recordemos que debido a la presencia de las corrientes secundarias, las tensiones de Reynolds no representan correctamente la tensión total). Como se puede apreciar en las figuras siguientes, si se emplean las velocidades de fricción para lecho liso, el análisis tiene menos dispersión.

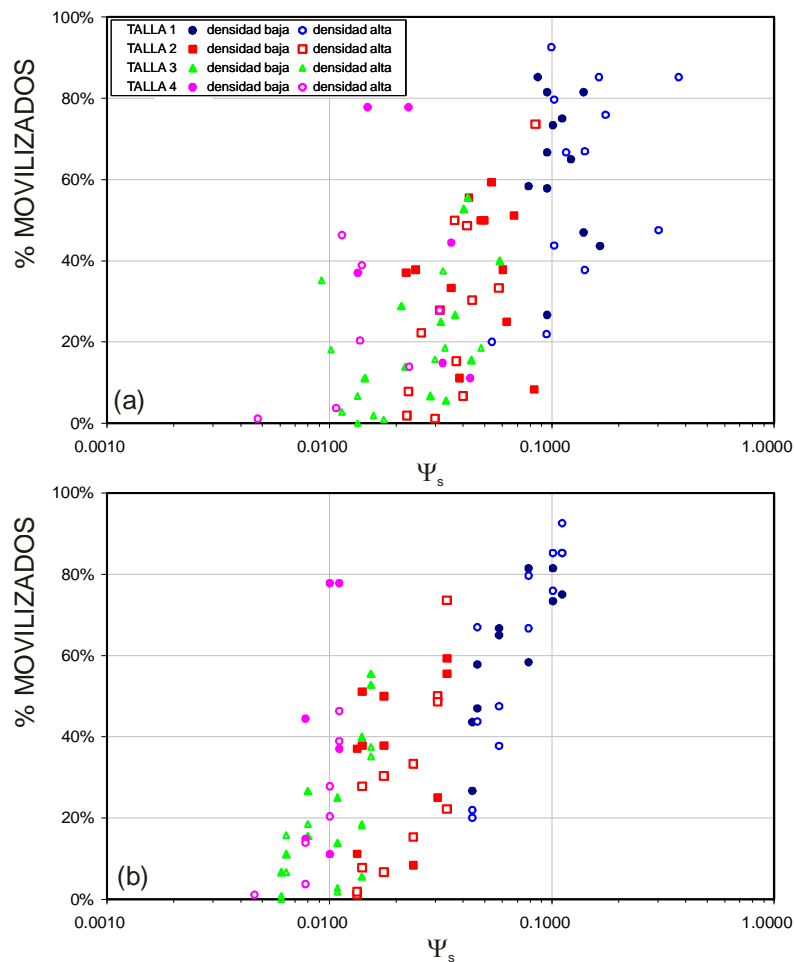


Figura 4.96. Relación entre el porcentaje de los moluscos movilizados y el parámetro de Shields Ψ_s en función de la densidad de reclutamiento, de la talla y de la velocidad de fricción: (a) velocidades de fricción determinadas en los ensayos con berberchos y (b) velocidades de fricción para fondo sin berberchos, ver Tabla 4.27.

Aunque las velocidades de corte determinadas en las condiciones de lecho sin moluscos quizás no son tan representativas de la tensión ejercida por el flujo sobre los berberechos en cada escenario, si que pueden ser útiles para analizar, p.ej. con un modelo numérico, en que zonas y bajo que caudales es previsible que se produzca la movilización de los bivalvos.

En la Figura 4.96 se ha representado el porcentaje de moluscos movilizados en función del parámetro de Shields. Se puede apreciar como a medida que el tamaño de los moluscos se incrementa también lo hace la dispersión de berberechos arrastrados. Además, la dispersión es menor cuando se emplean las velocidades de corte de los ensayos de fondo liso.

En este análisis, no se emplea una función de caudal sólido que, como se ha comentado en el apartado 4.2.5, cuantifica la respuesta del lecho ante el evento de transporte. En las figuras Figura 4.97 y Figura 4.98 se representa la movilización en función de las funciones de transporte adimensionales Φ_q y Φ_E (ecuaciones (4.14) y (4.15)), calculadas a partir del caudal sólido de transporte por fondo y al ratio de movilización E (ecuaciones (4.12) y (4.11) respectivamente).

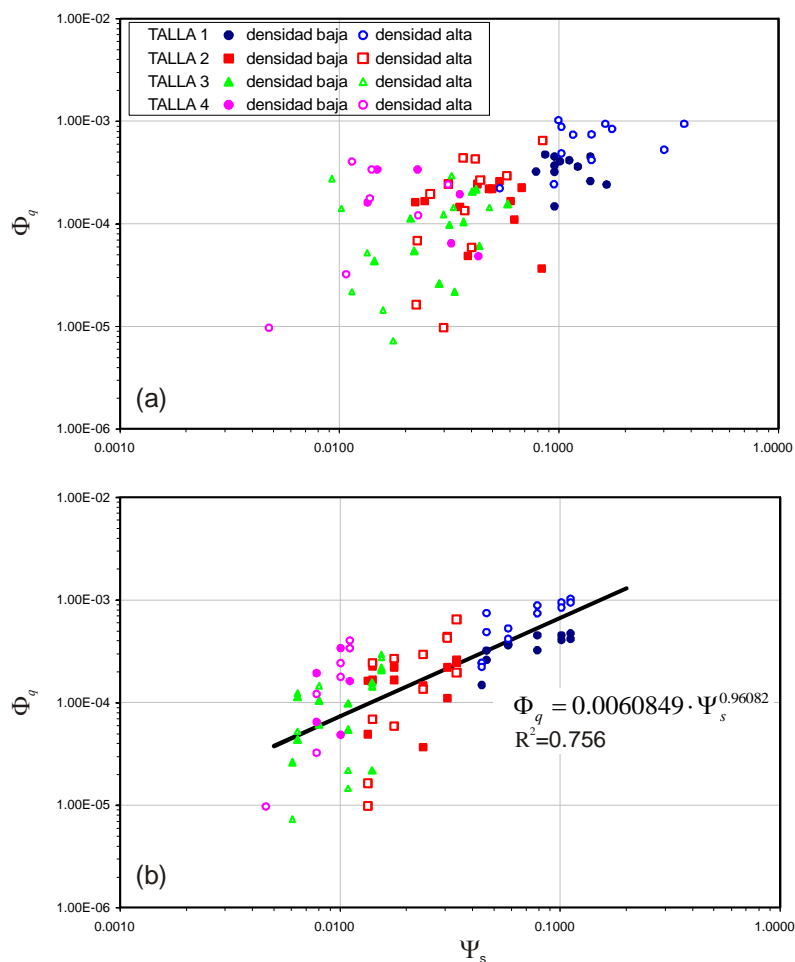


Figura 4.97. Relación entre el caudal sólido de fondo adimensional Φ_q y el parámetro de Shields Ψ_s en función de la densidad de reclutamiento, de la talla y de la velocidad de fricción: (a) velocidades de fricción determinadas en los ensayos con berberechos y (b) velocidades de fricción para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27.

Nuevamente, se puede apreciar como la relación obtenida con las velocidades de fricción determinadas para cada ensayo presentan mayor dispersión. Con los datos determinados con la velocidad de fricción para el lecho sin moluscos, Figura 4.97 (b), se ha ajustado la siguiente función de transporte de tipo potencial:

$$\Phi_q = 0.0060849 \cdot \Psi_s^{0.96082} \quad (4.35)$$

Si se mide la bondad del ajuste a partir del coeficiente de correlación cruzada, $R^2=0.75$, podemos afirmar que estamos en un nivel de significancia similar al de otros estudios de transporte de gravas (ver p.ej. Hoan, 2008).

Las funciones de transporte definidas anteriormente están ideadas para situaciones en las que todo el lecho está formado por sedimentos más o menos uniformes. Existen varias formas de contemplar la no uniformidad de las granulometrías aluviales. En este trabajo, el lecho está compuesto por dos materiales con características geométricas e hidrodinámicas muy diferenciadas.

Para contemplar este efecto, en el ratio de movilidad del sedimento E , definido en la ecuación (4.11) como $E = nd^3 / AT$, se ha empleado como área de sedimentos A , el valor correspondiente al área ocupado únicamente por los moluscos. De este modo, se pretende incluir en la función de transporte el efecto del porcentaje de recubrimiento de la superficie de arena por los berberechos. De esta forma, para la misma densidad de moluscos, los organismos de menor tamaño presentan menor cobertura de la superficie, por lo parece que estarán más expuestos a la corriente porque, p.ej. las fuerzas de trabazón o rozamiento interno entre cuerpos son menores que cuando el grupo de berberechos ocupa toda la superficie de análisis.

Para ello, se ha calculado el área ocupada por los moluscos a partir del número de berberechos ensayados en cada densidad y la proyección de su área en planta, determinada a partir del área de la elipse de ejes c y b (ver Figura 4.56). Para estimar el área para un molusco de anchura característica genérica c , se ha ajustado la siguiente relación potencial entre el área y el valor de c :

$$A_{cb} \approx 0.7623 \cdot c^{1.9738} \quad (4.36)$$

donde A_{cb} es la proyección en planta de los moluscos en mm^2 . El coeficiente de correlación obtenido en el ajuste anterior es de 0.96.

A partir del ratio de movilidad así definido y del parámetro de Shields, se ha determinado las funciones de transporte representadas en la Figura 4.98. La relación Φ_E ajustada con las velocidades de fricción determinadas en los ensayos sin moluscos quedaría como :

$$\Phi_E = 0.00018259 \cdot \Psi_s^{1.1104} \quad (4.37)$$

Para la determinación de esta expresión, se han eliminado 6 pares (Ψ_s, Φ_E) tras una inspección visual de los datos. De este modo, el coeficiente de correlación determinado es ~ 0.85 .

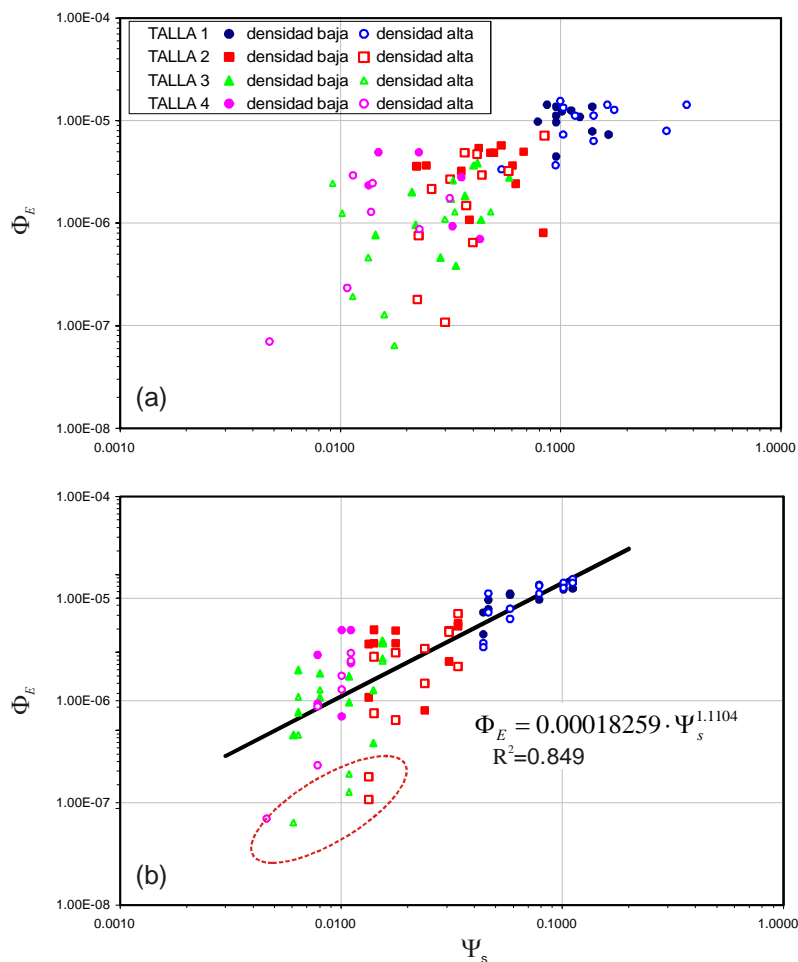


Figura 4.98. Relación entre el ratio de movilización Φ_E y el parámetro de Shields Ψ_s en función de la densidad de reclutamiento, de la talla y de la velocidad de fricción: (a) velocidades de fricción determinadas en los ensayos con berberchos y (b) velocidades de fricción para fondo sin berberchos, ver Tabla 4.27. En (b) se han representado dentro de una elipse los datos eliminados en el ajuste de la función de transporte.

Si se empleasen todos los datos, este coeficiente disminuye hasta ~ 0.78 , obteniéndose así una relación potencial muy similar a la de la ecuación anterior:

$$\Phi_E = 0.000217979 \cdot \Psi_s^{1.1626} \quad (4.38)$$

Otra vez, si determinamos la bondad del ajuste a partir del valor del coeficiente de correlación, las funciones de transporte definidas a partir de la movilidad de los moluscos, tienen una significación similar a la de otros trabajos de transporte de gravas.

4.4.4. Ensayos por grupos estacionales

4.4.4.1. Análisis estadístico

Análisis exploratorio

A continuación se presenta el análisis realizado para los ensayos de grupos estacionales, que sigue la misma metodología y esquema que el análisis para grupos de tamaños presentado en el apartado 4.4.3.1. Para realizar el análisis exploratorio los porcentajes de berberechos movilizados se han jerarquizado empleando los mismos factores y niveles que posteriormente se emplearon en el ANOVA:

- Velocidad: 6 niveles, empleando la velocidad media de cada ensayo calculada como se recoge en el apartado 4.4.2 (0.30, 0.32, 0.35, 0.39, 0.45 y 0.47 m/s)
- Talla: 2 niveles correspondientes al grupo de media aritmética ~21 y ~24 mm.
- Reclutamiento: 2 niveles: bajo (500 ind/m²) y alto (1000 ind/m²).
- Estado: 2 niveles: moluscos vivos y muertos.

A partir de estos factores, se ha elaborado una nomenclatura similar a la empleada en los ensayos de tamaños (Figura 4.69), para definir cualquier ensayo de una manera rápida y concisa. Así, de forma general los experimentos poblaciones estacionales se denominarán como una secuencia de 8 caracteres donde los tres primeros hacen referencia a la velocidad del ensayo (V01 a V06), la población analizada (D21 para la de otoño y D24 para la primavera), el reclutamiento (B y A, para el bajo, 500 ind/m², y el alto, 1000 ind/m²) y el estado (V o M, en referencia a vivo o muerto). Por ejemplo, el ensayo V03D21AV hace referencia al tercer escalón de velocidad (0.35 m/s), la población de primavera con una densidad de reclutamiento de 1000 ind/m² y con los bivalvos vivos. Esta nomenclatura se recoge también gráficamente en la Figura 4.99.

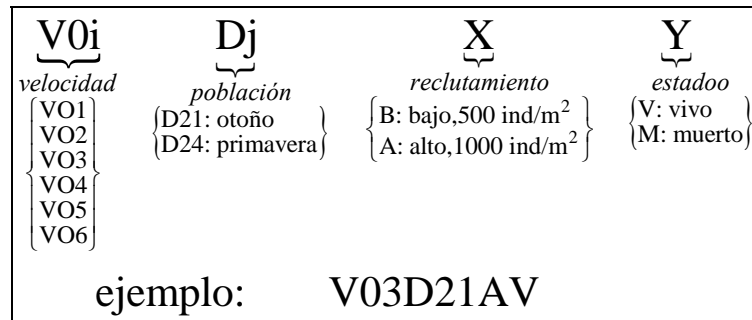


Figura 4.99. Esquema con la nomenclatura empleada en la denominación de los ensayos de poblaciones estacionales.

El primer paso del análisis exploratorio consistió en comprobar la normalidad de cada uno de los niveles analizados. Los contrastes de Shapiro-Wilk y Kolgomorov-Smirnov señalan los datos agrupados por factores no presentan no-normalidades.

El siguiente paso fue el de determinar las gráficas de cajas y bigotes para las variables analizadas. Estas gráficas se presentan en la Figura 4.100. Como en el apartado 4.4.3.1, se ha optado por presentar los datos referidos a las variables sin transformar, para facilitar su interpretación.

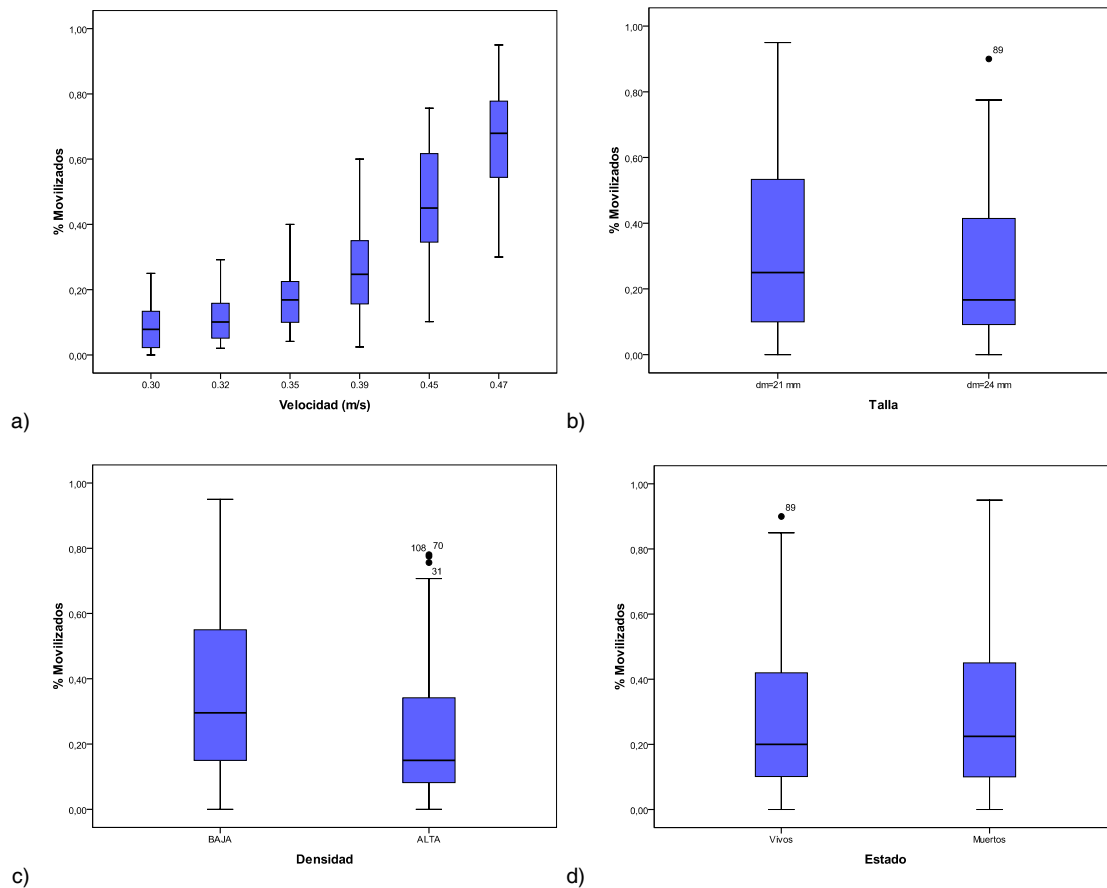


Figura 4.100. Gráficos de cajas y bigotes con el porcentaje de berberchos movilizados en cada uno de los factores: a) velocidad, b) talla, c) reclutamiento y d) estado.

Como sucedía con los datos de los ensayos de tallas (Figura 4.70), las medias de los berberchos movilizados para cada uno de los factores presenta cierta dispersión, aunque en este caso menor que para los ensayos anteriores. Esta disminución de la dispersión se atribuye, principalmente, a dos factores: el número de berberchos ensayados ha sido mayor ya que el área de ensayo se ha incrementado (ver Figura 4.52) y también al hecho de que los grupos analizados son similares, ya que tienen una granulometría con un diámetro medio que no difiere en más de 4 mm.

Tabla 4.33. Porcentaje de berberchos movilizado en función de la velocidad de la corriente y de la talla. Valores medios y error estándar (σ/\sqrt{n}). Los parámetros estado y reclutamiento están agregados en los anteriores.

TALLA	% MOVILIZADOS	VELOCIDAD						
		0.298 m/s	0.315 m/s	0.346 m/s	0.391 m/s	0.446 m/s	0.471 m/s	TODOS
$d_m \sim 21$ mm	Media	8.5%	13.7%	20.1%	29.6%	53.1%	72.7%	33.0%
	SE (n=12, 72)	0.021	0.026	0.026	0.038	0.041	0.034	0.026
$d_m \sim 24$ mm	Media	8.0%	9.8%	15.0%	24.1%	41.2%	57.4%	25.9%
	SE (n=12, 72)	0.026	0.019	0.015	0.035	0.048	0.042	0.022
TODOS	Media	8.3%	11.8%	17.6%	26.9%	47.2%	65.1%	29.4%
	SE (n=24, 144)	0.023	0.026	0.011	0.018	0.023	0.021	0.012

Nuevamente, las tendencias reflejadas en la Figura 4.100 se cuantifican en la Tabla 4.33 y Tabla 4.34, donde se presentan los porcentajes de berberechos movilizados en función de la velocidad de la corriente y talla, y en función del estado y densidad respectivamente.

Con respecto a la **velocidad** se puede señalar que a mayor velocidad de la corriente, mayor grado de movilización de los berberechos (ver Tabla 4.33). Así, para una velocidad media de ~0.3 m/s el porcentaje de berberechos medio movilizado es de un ~8% mientras que para una velocidad de ~0.5 m/s asciende a un ~65%. Al contrario que lo que sucedía en el ensayo de tallas, donde se detectó cierta interacción el transporte de fondo de la arena y la movilización de los berberechos en los escalones 2 y 3 de velocidades, en el análisis de poblaciones el número de berberechos arrastrados es siempre proporcional a la velocidad de la corriente.

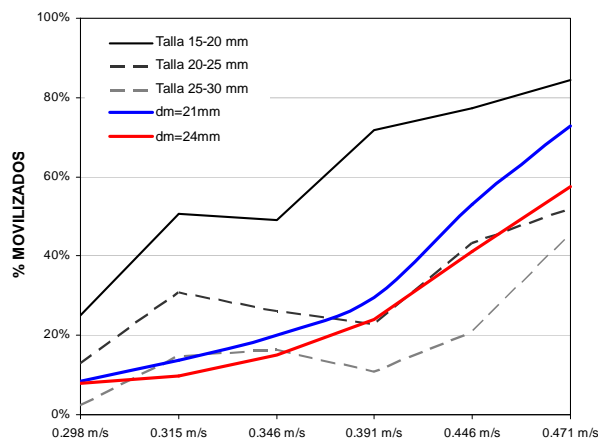


Figura 4.101. Comparación de la media de berberechos movilizados en función de la velocidad de la corriente y del tipo de ensayo.

Esta circunstancia se puede comprobar en la Figura 4.101 donde se han comparado los resultados medios de berberechos movilizados para las Tallas 15-20, 20-25 y 25-30 del ensayo anterior, con las Tallas de diámetro medio 21 y 24 mm. En esta gráfica se puede comprobar como la no-linealidad detectada en los ensayos de tallas entre velocidades de 0.31 y 0.39 m/s no se reproduce en estos ensayos.

Por este motivo, se puede observar como para las velocidades más bajas, la movilización de los berberechos se asemeja más a la del grupo de 15-20 mm, mientras que para las velocidades más altas, el comportamiento es más parecido al de la talla de 20-25 mm.

Las diferencias que se producen entre los grupos de tallas y las poblaciones estacionales son similares a las que se encuentran cuando se estudia el transporte de dos mezclas de sedimento con el mismo tamaño medio pero diferente distribución granulométrica. Así, una distribución de sedimento aluvial uniforme será movilizada cuando se supere cierta tensión tangencial sobre el fondo, p.ej. la proporcionada por el diagrama Shields.

En una mezcla de sedimentos con tamaños de grano variados, se producen fenómenos de ocultamiento de los granos más pequeños y de exposición de los más grandes. Este proceso, favorece que los sedimentos más pequeños de la mezcla tengan una tensión crítica mayor que la equivalente a la de un lecho del mismo tamaño pero con granulometría uniforme. De modo opuesto, los granos gruesos de una mezcla tienen una tensión crítica relativa menor que cuando la distribución es uniforme.

Para cuantificar la influencia de este proceso, se puede emplear la siguiente expresión simplificada generalizada válida para lechos aluviales de gravas no uniformes (ver detalles en Parker, 1989; García, 2006):

$$\tau_{bc,i} = \tau_{bc,sg} \left(\frac{D_i}{D_{sg}} \right)^{1-\beta} \cong \tau_{bc,sg} \left(\frac{D_i}{D_{sg}} \right)^{0.1} \quad (4.39)$$

donde $\tau_{bc,i}$ y $\tau_{bc,sg}$ son las tensiones sobre el lecho críticas (no adimensionales) que movilizan una fracción de sedimento cualquiera i de tamaño D_i que pertenece a una mezcla de media geométrica D_{sg} , respectivamente. El parámetro β es un indicador del efecto de la gradación de la mezcla en su erosión, y vale ≈ 0.9 para sedimentos no uniformes y ≈ 0 para sedimentos uniformes.

Así, si tenemos un sedimento uniforme de tamaño cuatro veces superior a otro, de la ecuación (4.39) se tiene que la tensión crítica de arrastre es también cuatro veces mayor. Sin embargo, para esta diferencia en una mezcla de sedimentos no uniforme, la tensión crítica para el sedimento más grueso es de $4^{0.1} \sim 1.15$ veces superior a la del tamaño más fino. Por tanto, en mezclas de sedimentos, las diferencias entre los diferentes tamaños se reducen de un modo muy notable.

Si este efecto se reproduce en los ensayos de transporte de berberechos, se tendrá que para las distribuciones de bivalvos no uniformes la distribución de poblaciones presenta una tensión de arrastre relativamente mayor que una con el mismo tamaño pero de distribución uniforme. Por este motivo, los moluscos de poblaciones son más resistentes al arrastre que los de la talla de 20-25 mm para las velocidades más bajas. Una vez superado el umbral de movimiento de la distribución no uniforme, las diferencias con la talla homogénea desaparecen.

Por último, también se aprecian diferencias entre la **talla** de las dos poblaciones analizadas, siendo la de menor diámetro medio la más fácilmente movilizable. Esta última circunstancia se probará en líneas posteriores, a través del análisis ANOVA.

Tabla 4.34. Porcentaje de berberechos movilizado en función del estado y el reclutamiento. Valores medios y error estándar (σ/\sqrt{n}). Los parámetros velocidad de la corriente y talla están agregados en los anteriores.

DENSIDAD	% MOVILIZADOS	ESTADO		
		Vivos	Muertos	TODOS
BAJA (500 ind/m²)	Media	37.0%	32.8%	34.9%
	SE (n=96, 192)	0.071	0.065	0.048
ALTA (1000 ind/m²)	Media	22.2%	25.8%	24.0%
	SE (n=96, 192)	0.060	0.062	0.016
TODOS	Media	29.6%	29.3%	29.4%
	SE (n=192, 384)	0.084	0.017	0.012

Este fenómeno se explica porque la rugosidad del lecho con mayor densidad de berberechos es menor y la estructura del flujo es similar a un flujo rasante sobre traviesas muy poco espaciadas. En estas circunstancias, las tensiones de corte de Reynolds son menores que las que se producirían en unas condiciones de flujo similar, pero con un mayor espaciamiento entre las rugosidades (Coleman *et al.*, 2007b)

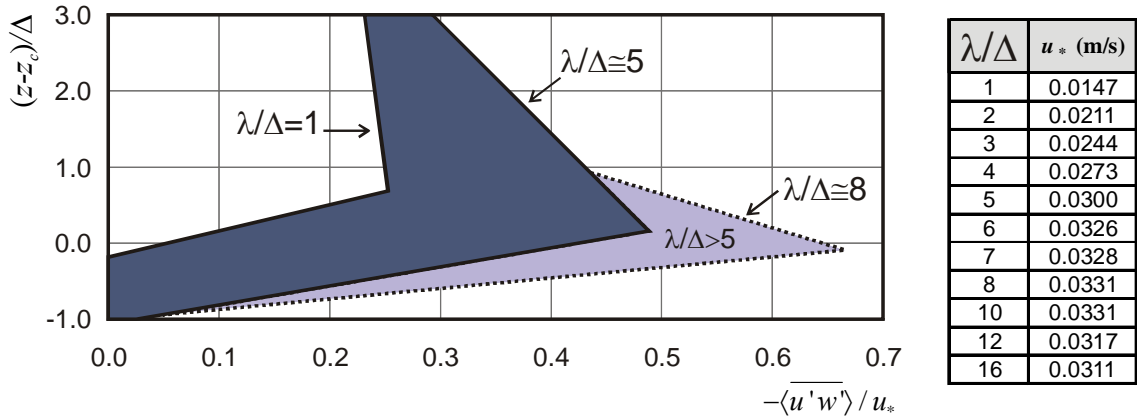


Figura 4.102. Variación de las tensiones de Reynolds con el espaciamiento λ/Δ en flujo sobre traviesas de sección cuadrada (adaptado de Coleman et al., 2007b). Se puede apreciar como a medida que la rugosidad incrementa, λ/Δ crece, el pico de las tensiones es más pronunciado y las velocidades de fricción también lo hacen para las mismas condiciones de caudal.

Esta circunstancia, que también se ha constatado en los ensayos de grupos de tamaños, se refleja en la Figura 4.102 en la que se ha representado la distribución de tensiones de Reynolds en un flujo sobre traviesas y diferentes relaciones λ/Δ . Además de la contribución relativa de los esfuerzos de Reynolds a la tensión total, en la figura también se han representado las velocidades de fricción que aumentan con la rugosidad para las mismas condiciones de calado y caudal. Al incrementar la velocidad de corte también se produce un incremento cuadrático de las tensiones sobre el lecho.

Los parámetros medios de movilización en función del **reclutamiento** y el estado se presentan en la Tabla 4.34. Como en los experimentos anteriores, se puede indicar que la movilización es mayor en términos medios para el menor reclutamiento, ~35% frente al ~24% para la mayor densidad.

Estos valores son prácticamente idénticos a los obtenidos en el ensayo anterior (recordemos, ~37% vs ~26%). Sin embargo, y al contrario que para los grupos de tallas, en este experimento parece que el **estado** de los berberechos no influye sobre la movilización de los mismos. Nuevamente, esta circunstancia se comprobará en el ANOVA.

Los datos correspondientes a cada uno de los escenarios analizados se presentan en las tablas siguientes (Tabla 4.35 y Tabla 4.36).

Tabla 4.35. Porcentaje medio de berberechos vivos movilizados en los ensayos por grupos de poblaciones. Valores medios y error estándar (σ / \sqrt{n}).

DENSI DAD	TALLA	% MOVILIZADOS	VELOCIDAD (m/s)					
			0.298	0.315	0.346	0.391	0.446	0.471
BAJA 500 ind/m ²	d _m ~21	Media	13.3%	15.0%	21.7%	41.7%	58.3%	80.0%
		SE (n=3)	0.044	0.029	0.060	0.101	0.120	0.050
	d _m ~24	Media	12.5%	16.7%	18.8%	40.0%	56.7%	70.0%
		SE (n=3)	0.072	0.072	0.012	0.050	0.117	0.115
ALTA 1000 ind/m ²	d _m ~21	Media	3.3%	6.5%	13.8%	13.4%	51.2%	61.8%
		SE (n=4)	0.022	0.022	0.022	0.063	0.125	0.089
	d _m ~24	Media	5.1%	8.2%	14.2%	16.3%	24.2%	48.3%
		SE (n=4)	0.029	0.035	0.024	0.007	0.058	0.147

Tabla 4.36. Porcentaje medio de berberechos muertos movilizados en los ensayos por grupos de de poblaciones. Valores medios y error estándar (σ / \sqrt{n}).

DENSI DAD	TALLA	% MOVILIZADOS	VELOCIDAD (m/s)					
			0.298	0.315	0.346	0.391	0.446	0.471
BAJA 500 ind/m ²	d _m ~21	Media	10.0%	23.3%	31.7%	33.3%	56.7%	77.6%
		SE (n=3)	0.000	0.017	0.044	0.073	0.060	0.108
	d _m ~24	Media	6.2%	6.2%	11.6%	30.0%	50.0%	56.7%
		SE (n=3)	0.042	0.020	0.055	0.076	0.050	0.017
ALTA 1000 ind/m ²	d _m ~21	Media	7.5%	10.0%	13.3%	30.1%	46.3%	71.5%
		SE (n=4)	0.043	0.038	0.046	0.041	0.106	0.035
	d _m ~24	Media	8.2%	8.2%	15.3%	10.9%	35.7%	54.7%
		SE (n=4)	0.035	0.012	0.041	0.026	0.087	0.059

Análisis de la varianza

Para corroborar las tendencias reflejadas por el análisis exploratorio de datos se ha realizado un análisis ANOVA de todos los factores con un modelo de 4 factores fijos de tipo factorial, en el que se han incluido todas las interacciones. Conceptualmente, el modelo es idéntico al del apartado 4.4.3.1, y difiere únicamente en el número de factores del nivel Talla que se reduce de 4 a 2.

Nuevamente, antes de ejecutar el ANOVA, se ha realizado el test de Cochran para comprobar la homogeneidad de las varianzas. Dado que los datos analizados varían en un rango de 0 al 100%, estos fueron previamente los datos fueron arcsin transformados (ver apartado 4.3.6).

El valor de estadístico C, calculado de acuerdo con la ecuación (4.24), ha sido de 0.0697. El valor de la función de distribución $C[a, v; \alpha]$, para $a=48$ varianzas (6 velocidades x 2 tallas x 2 reclutamientos x 2 estados), $v=2$ grados de libertad de cada varianza ($n-1$ repeticiones) y un

nivel de significancia $\alpha=0.05$, es de 0.1359, superior al del estadístico C, por lo que se puede considerar que las varianzas son homogéneas.

En la Tabla 4.37 se presenta el resumen del ANOVA. Se puede observar como todos los factores principales afectan a la media de una manera muy significativa ($p < 0.001$) a excepción de la variable Estado. Además, únicamente aparece un término de interacción de primer orden significativa, Densidad x Estado, aunque tiene muy poca potencia estadística (<55%).

Tabla 4.37. Análisis de la varianza de 4 factores con un modelo factorial con todas las interacciones para el análisis de la velocidad, talla, reclutamiento y estado sobre el porcentaje de berberechos movilizados. Ensayo de grupos estacionales.

Fuente de Variación	SS Suma de Cuadrados	df Grados de libertad	MS Media cuadrática	F	P Nivel significancia	1- β Potencia estadística ^b
Modelo	51.993 ^a	48	1.083	50.491	<0.001*	>0.999
Velocidad (VEL)	8.514	5	1.703	79.374	<0.001*	>0.999
Talla (TALLA)	0.262	1	0.262	12.223	0.001*	0.933
Densidad (DEN)	0.670	1	0.670	31.235	<0.001*	>0.999
Estado (EST)	0.001	1	0.001	0.009	0.924	0.051
VEL x TALLA	0.083	5	0.017	0.774	0.571	0.268
VEL x DEN	0.097	5	0.019	0.901	0.484	0.310
VEL x EST	0.003	5	0.001	0.029	1.000	0.056
TALLA x DEN	0.011	1	0.011	0.508	0.478	0.109
TALLA x EST	0.064	1	0.064	2.961	0.088	0.399
DEN x EST	0.091	1	0.091	4.221	0.043*	0.530
VEL x TALLA x DEN	0.140	5	0.028	1.301	0.270	0.443
VEL x TALLA x EST	0.053	5	0.011	0.497	0.778	0.179
VEL x DEN x EST	0.037	5	0.007	0.347	0.883	0.135
TALLA x DEN x EST	0.019	1	0.019	0.896	0.346	0.155
VEL x TALLA x DEN x EST	0.081	5	0.016	0.755	0.584	0.261
Error	2.060	96	0.021			
Total	54.053	144				

^a. $R^2 = 0.962$ (R^2 ajustado = 0.943)

^b. Potencia 1- β calculada para $\alpha = 0.05$

*. $P < 0.05$

Por lo tanto, del ANOVA se puede concluir que tanto la velocidad, como la talla y el reclutamiento influyen significativamente en la movilización de los berberechos. Además, en estos ensayos, la variable estado no afecta al arrastre de los moluscos para las velocidades, tallas y densidades analizadas.

Como el factor Estado no es una fuente de variación de la variable analizada, éste se puede quitar del modelo. Al quitar este término del análisis, pasamos de un modelo factorial de 4 factores: 6 velocidades x 2 tallas x 2 densidades x 2 estados (3 repeticiones), a un modelo factorial de 3 factores: 6 velocidades x 2 tallas x 2 densidades (6 repeticiones). Este procedimiento de unir los datos de una fuente de variación no significativa al análisis se denomina *pooling* y se describe p. ej. en Underwood (1981).

Esta técnica permite mejorar la potencia de los contrastes ANOVA, pero no debe realizarse con factores que afecten significativamente a la media, ya que estamos desvirtuando los resultados

del test. Además, aunque se eliminase un término del modelo, su interacción, si es que existe, no desaparecerá.

Los resultados del nuevo análisis ANOVA se presentan en la Tabla 4.38. Antes de realizar este análisis se ha comprobado con el test Cochran la homogeneidad de las varianzas. El valor de estadístico C ha sido de 0.0968. El valor de la función de distribución $C[a, v; \alpha]$, para $a=24$ varianzas (6 velocidades x 2 tallas x 2 reclutamientos), $v=5$ grados de libertad de cada varianza ($n-1$ repeticiones) y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, es de 0.1491, superior al del estadístico C por lo que se puede considerar que las varianzas son homogéneas.

Tabla 4.38. Análisis de la varianza de 3 factores con un modelo factorial con todas las interacciones para el análisis de la velocidad, talla y reclutamiento sobre el porcentaje de berberechos movilizados. El factor estado se ha agrupado.

Fuente de Variación	SS Suma de Cuadrados	df Grados de libertad	MS Media cuadrática	F	P Nivel significancia	1- β Potencia estadística ^b
Modelo	51,645 ^a	24	2,152	107,252	<0,001*	>0,999
Velocidad (VEL)	8,514	5	1,703	84,871	<0,001*	>0,999
Talla (TALLA)	0,262	1	0,262	13,069	<0,001*	0,948
Densidad (DEN)	0,670	1	0,670	33,399	<0,001*	>0,999
VEL x TALLA	0,083	5	0,017	0,828	0,532	0,289
VEL x DEN	0,097	5	0,019	0,963	0,443	0,334
TALLA x DEN	0,011	1	0,011	0,543	0,462	0,113
VEL x TALLA x DEN	0,140	5	0,028	1,392	0,232	0,477
Error	2,408	120	0,020			
Total	54,053	144				

^a. $R^2 = 0.955$ (R^2 ajustado = 0.947)

^b. Potencia 1- β calculada para $\alpha= 0.05$

*. $P<0.05$

El análisis ANOVA con los datos agrupados ofrece los mismos resultados que el realizado inicialmente, es decir, los factores Velocidad, Talla y Densidad influyen significativamente ($p<<<0.001$) en la movilización de los berberechos. Con este nuevo análisis, no se han encontrado términos de interacción de orden superior, y además, se ha mejorado la potencia del contraste, aunque sólo ligeramente⁹⁵.

Análisis a posteriori de los factores principales

Como no existen términos de interacción significativos, los contrastes de comparación múltiples se deben realizar sobre los factores principales. Como en el apartado 4.4.3.1, se han empleado los test SNK, complementado con el de Ryan, y el contraste Tukey HSD, para el análisis de la velocidad. Para los factores talla y estado, que cuentan únicamente con dos niveles, se ha empleado el contraste t de Student.

⁹⁵ Se puede comprobar como los ratios F del nuevo contraste (Tabla 4.38) son ligeramente superiores a los del primer análisis (Tabla 4.37) por lo que la mejora introducida en el contraste no ha sido demasiado significativa (ver Apéndice 2 y Underwood, 1981).

Los resultados del test SNK y Ryan para las velocidades se presentan en la Tabla 4.39. En la Tabla 4.40 se presentan los resultados del contraste Tukey HSD. El procedimiento de obtención del contraste SNK se recoge en el apartado 4.4.3.1 (pág. 4.112).

Tabla 4.39. Aplicación del método de comparaciones múltiples SNK y Ryan para el factor principal velocidad. La significancia del test ($\alpha=0.05$) SNK se marca en tipografía negra y la del test de Ryan con un asterisco.

VELOCIDAD ^a	0.298	0.346	0.315	0.391	0.446	0.471	TEST SNK			TEST RYAN		
ORDEN	1	2	3	4	5	6	<i>g</i>	<i>Q</i> ^b	<i>D=Q · SE</i> ^c	α'	<i>Q</i>	<i>D=Q · SE</i>
MEDIA ^a	0.204	0.401	0.411	0.537	0.706	0.879						
COMPARACIONES	6-1 0.700*						6	4.373	0.103	0.050	4.373	0.103
	5-1 0.503*	6-2 0.618*					5	4.166	0.098	0.042	4.277	0.101
	4-1 0.277*	5-2 0.421*	6-3 0.529*				4	3.901	0.092	0.034	4.149	0.098
	3-1 0.171*	4-2 0.195*	5-3 0.332*	6-4 0.422*			3	3.532	0.083	0.025	3.961	0.094
	2-1 0.082	3-2 0.089*	4-3 0.106*	5-4 0.225*	6-5 0.197*		2	2.919	0.069	0.017	3.615	0.085

^a. arcsin $\sqrt{}$ transformada
^b. para $\nu=24$ grados de libertad
^c. $SE=\sqrt{(MS_{error}/36)}=0.0383$

El test SNK señala que todas las comparaciones son significativamente diferentes, es decir, todos los escalones de **velocidad** ensayados afectan a la movilización de los moluscos. El contraste de Ryan indica que todos los escalones son significativamente diferentes, a excepción de la pareja formada por las velocidades 0.298 m/s y 0.346 m/s, es decir, la media de berberechos movilizados por la velocidad más baja y la siguiente no son significativamente diferentes.

Los resultados del contraste de Tukey en este caso no arrojan una hipótesis alternativa a la de la igualdad de las medias de berberechos movilizados para todas velocidad ya que se forman grupos similares un tanto extraños. Así, y según los resultados recogidos en la Tabla 4.40, se pueden formar los grupos similares 1-2, 1-2-3, 3-2-4 y 3-4, que no permiten extraer una conclusión clara de cómo afectan las velocidades a la movilización de los berberechos. Únicamente se contrasta la diferencia entre las velocidades de los escalones 5 y 6 con el resto de velocidades ensayadas.

Tabla 4.40. Aplicación del método de comparaciones múltiples Tukey HSD para el factor principal velocidad. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.

VELOCIDAD	(i)	(j)	Diferencia media (i-j)	P - Nivel significancia	I.C. 95%	
					Lím. inf.	Lím. sup.
0.298 m/s	1	2	-0.082	0.345	-0.200	0.036
		3	-0.171*	0.001	-0.289	-0.053
		4	-0.277*	<0.001	-0.396	-0.159
		5	-0.503*	<0.001	-0.621	-0.384
		6	-0.700*	<0.001	-0.818	-0.581
0.315 m/s	2	1	0.082	0.345	-0.036	0.200
		3	-0.089	0.257	-0.207	0.029
		4	-0.195*	<0.001	-0.314	-0.077
		5	-0.421*	<0.001	-0.539	-0.302
		6	-0.618*	<0.001	-0.736	-0.499
0.346 m/s	3	1	0.171*	0.001	0.053	0.289
		2	0.089	0.257	-0.029	0.207
		4	-0.106	0.105	-0.225	0.012
		5	-0.332*	<0.001	-0.450	-0.213
		6	-0.529*	<0.001	-0.647	-0.410
0.391 m/s	4	1	0.277*	<0.001	0.159	0.396
		2	0.195*	<0.001	0.077	0.314
		3	0.106	0.105	-0.012	0.225
		5	-0.225*	<0.001	-0.344	-0.107
		6	-0.422	<0.001	-0.541	-0.304
0.446 m/s	5	1	0.503*	<0.001	0.384	0.621
		2	0.421*	<0.001	0.302	0.539
		3	0.332*	<0.001	0.213	0.450
		4	0.225*	<0.001	0.107	0.344
		6	-0.197*	<0.001	-0.315	-0.079
0.471 m/s	6	1	0.700*	<0.001	0.581	0.818
		2	0.618*	<0.001	0.499	0.736
		3	0.529*	<0.001	0.410	0.647
		4	0.422*	<0.001	0.304	0.541
		5	0.197*	<0.001	0.079	0.315

Para los factores **Talla** y **Densidad** se ha aplicado el contraste *t* de *Student*, también con el paquete SPSS©. El contraste se ha realizado asumiendo, y comprobando, la homogeneidad de las varianzas con el test de Levene.

Los resultados del test, recogidos en la Tabla 4.41, señalan que el reclutamiento afecta a la cantidad de berberechos movilizados, tal y como sucedía con los ensayos de grupos de tamaños. Sin embargo, el contraste *t* de *Student* para el factor talla no es significativo.

Tabla 4.41. Aplicación del contraste *t* de *Student* a los factores *Densidad* y *Estado*. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.

Factor	t	df Grados de libertad	P -Nivel significancia (t dos colas)	diferencia media ^a	SE diferencia ^a	I.C. 95%	
						Lím. inf.	Lím. sup.
Talla	1,767	142	0,079	0,085	0,048	-0,010	0,181
Densidad	2,875	142	0,005*	0,136	0,047	0,043	0,230

^a. arcsin √ transformada

Que el contraste *t* de *Student* no muestre diferencias entre las tallas cuando el análisis ANOVA si lo hace parece contradictorio. Sin embargo, es posible que los contrastes múltiples no arrojen diferencias significativas mientras que el análisis de la varianza si las marque (Underwood, 1997). Esto se debe a que la potencia estadística del ANOVA, basado en el test de los ratios *F*, es mucho mayor que la de los test de contraste múltiple⁹⁶. Además, es mucho más sencillo rechazar la hipótesis nula, las medias son diferentes, que encontrar una hipótesis alternativa a la misma.

En cualquier caso, también se ha realizado un contraste SNK, que aunque no tiene tanto sentido en comparación de dos niveles, se puede aplicar a este tipo de casos⁹⁷. Los resultados de este contraste, recogidos en la Tabla 4.42, son iguales a los del contraste *t* de *Student*.

Tabla 4.42. Aplicación del método de comparaciones múltiples SNK para el factor principal *talla*. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se marca con un asterisco.

TALLA	d _{m~21}	d _{m~24}	TEST SNK		
ORDEN	1	2	g	Q	D=Q · SE ^b
MEDIA ^a	0.497	0.582			
COMPARACIONES	²⁻¹ 0.085		2	3,081	0,1260

^a. arcsin √ transformada
^b. SE=√(MS_{error}/12)=0.0409

⁹⁶ Como se indica en el Apéndice 2, que un test tenga mayor potencia permite detectar, para un número determinado de repeticiones, variaciones menores en las diferencias de las medias de cada factor y/o nivel analizado. También permitiría reducir el número de repeticiones, respecto a otro test con menor potencia, para detectar una umbral de variación predeterminado.

⁹⁷ En este caso el contraste de Ryan si que no tiene sentido, porque ofrece los mismos resultados que el contraste SNK.

Por lo tanto, se puede llegar a la conclusión de que, aunque las tallas analizadas se movilizan de modo diferente, según el análisis ANOVA, las diferencias no son demasiado significativas, cómo reflejan los contrastes múltiples SNK o el test *t*.

Análisis a posteriori de las interacciones

Siguiendo la metodología de los ensayos de tallas uniformes, se ha elaborado una gráfica de interacciones entre los factores del análisis. De la lectura de esta gráfica, representada en la Figura 4.103, se pueden extraer ciertos resultados interesantes.

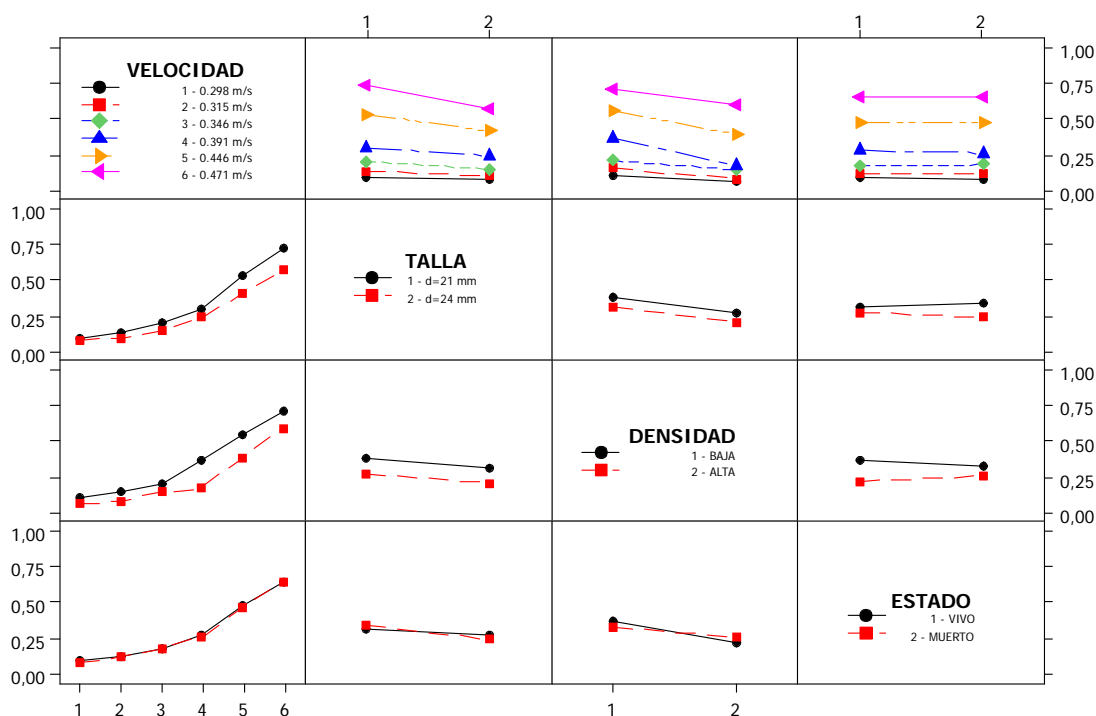


Figura 4.103. Gráfica de interacciones entre los factores principales del análisis. Ensayo de poblaciones estacionales.

En primer lugar, hay que señalar que el contraste ANOVA no ha revelado ninguna interacción significativa entre los factores principales, por lo que las siguientes conclusiones son meramente cualitativas.

Si se analiza la relación entre la velocidad y las tallas se puede observar como a medida que la velocidad crece, las diferencias entre la talla de 21 mm y la de 24 mm son más importantes (Figura 4.103, subfigura 1-2). Este fenómeno también sucede, aunque en menor medida, con la relación velocidad-densidad (Figura 4.103, subfigura 1-3). En las gráficas de relaciones talla-densidad, se corrobora que la movilización es mayor para el menor índice de reclutamiento y para la talla más baja. Por último, también se puede apreciar como las curvas de estado vs velocidad, talla y densidad se solapan (ver celdas 4-1 a 4-3 de la Figura 4.103). Este fenómeno concuerda con el hecho de que el estado no sea un factor que determine la movilización de los berberechos, para estos ensayos.

4.4.4.2. Análisis hidrodinámico

Características generales

Como sucedía con el análisis hidrodinámico de los parámetros representativos del flujo para los ensayos de tallas –apartado 4.4.3.2–, el estudio que se presentará a continuación sobre las interacciones entre los parámetros hidrodinámicos y los factores analizados se basará en el análisis exploratorio de los datos y no en contrastes estadísticos. Además, hay que señalar que por problemas con el equipo PIV no se ha podido determinar las propiedades hidrodinámicas de las velocidades más bajas (V01 a V03) con la población de berberechos de mayor tamaño, de diámetro medio ~24 mm.

En la Tabla 4.43 se recogen las principales variables del flujo en función del **factor velocidad**. Los valores medios obtenidos para las velocidades medias y máximas, así como los números adimensionales derivados de éstas, son similares a los calculados en los ensayos de fondo liso (§4.4.2.1, Tabla 4.12) y de grupos de tamaños (§4.4.3.2, Tabla 4.27).

Tabla 4.43. Resumen de las propiedades del flujo en los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio ± desviación típica).

FACTOR VELOCIDAD	$\langle \bar{U}_{med} \rangle$ (m/s)	$\langle \bar{U}_{max} \rangle$ (m/s)	u_* (m/s)	Re_h ($\times 10^{-3}$)	Re_{*h} ($\times 10^{-3}$)	Fr_h (-)	$Fr_{*\Delta}$ (-)
V01	0.282±0.02	0.338±0.03	0.0262±0.01	41.0±5.0	3.8±0.9	0.237±0.02	0.040±0.02
V02	0.317±0.03	0.371±0.04	0.0367±0.01	46.0±5.2	5.3±0.8	0.265±0.03	0.083±0.03
V03	0.320±0.03	0.373±0.03	0.0380±0.01	46.2±5.2	5.5±0.2	0.269±0.02	0.098±0.02
V04	0.364±0.03	0.414±0.03	0.0437±0.01	51.2±4.2	6.1±1.1	0.310±0.03	0.113±0.06
V05	0.378±0.04	0.437±0.05	0.0481±0.01	53.2±5.3	6.8±1.5	0.322±0.04	0.126±0.06
V06	0.413±0.04	0.476±0.05	0.0538±0.02	57.9±5.2	7.5±2.0	0.352±0.03	0.217±0.19

Las relaciones lineales, el ratio medio entre el parámetro para el ensayo de tallas y para fondo liso ± desviación típica, valen 0.91±0.06 para la velocidad media doblemente promediada, 0.95±0.05 para la velocidad máxima y 0.86±0.06 y 0.94±0.05 para los números de Reynolds y Froude respectivamente. Estos resultados son prácticamente los mismos que los determinados en los ensayos de grupos de tallas. Además, también presentan una relación lineal directa de proporcionalidad entre el factor velocidad (V01 a V06) y el parámetro analizado.

En el análisis anterior hay que considerar que para las velocidades más bajas no hay información de la talla más grande. Por este motivo, al estudiar el comportamiento de las variables del flujo con respecto a la talla se ha optado por estudiarlas también en función de la velocidad. Este análisis (no se representa aquí) muestra que las velocidades y variables adimensionales derivadas no están afectadas por la talla.

Las variables densidad y estado se han analizado en función de la talla, para contemplar el efecto del menor número de datos en la talla más grande. Con respecto a la densidad, se puede indicar que este factor no afecta a las velocidades registradas. Sin embargo, se han determinado velocidades ligeramente mayores en los ensayos con los moluscos muertos (0.391±0.05 vs 0.330±0.04). Estas diferencias son similares a las encontradas en los ensayos

de tallas y podrían estar relacionadas con la actividad filtradora de los moluscos en la estructura de las velocidades.

Las **velocidades de corte** y las magnitudes derivadas recogidas en la Tabla 4.43 (número de Reynolds para la escala característica de calado y velocidad de fricción, y número de Froude densimétrico), también presentan una relación de proporcionalidad con los parámetros estimados para los ensayos de fondo liso. En este caso, de 1.42 ± 0.11 , 1.33 ± 0.11 y 2.07 ± 0.47 para u_* , Re_{*h} y Fr_{*d} , respectivamente. Estas relaciones presentan más dispersión que las determinadas con las velocidades del flujo, pero si se comparan con la de los ensayos de grupos de tallas, es aproximadamente la mitad.

También es importante señalar que ahora las relaciones de proporcionalidad son prácticamente lineales, y no presentan un descenso en ningún escalón de velocidad como para los ensayos de grupos de tallas. De hecho, el ajuste por mínimos cuadrados del ratio velocidad de fricción para poblaciones estacionales y fondo de liso tiene una coeficiente de correlación muy significativo, $R^2=0.88$.

En la Tabla 4.44 se presentan los valores medios de las velocidades de corte para el resto de factores analizados. Hay que señalar que las diferencias en el factor talla no son reales porque en el análisis de la talla más grande sólo se han promediado las velocidades más altas, por eso el valor reflejado es mayor. Al repetir este análisis en las dos tallas con las velocidades mayores, los valores medios de la velocidad de fricción son de 0.048 ± 0.01 y 0.050 ± 0.01 m/s para la más pequeña y grande respectivamente. Por tanto, se puede apreciar una pequeña diferencia en las velocidades de fricción, ligeramente superiores para la distribución de bivalvos de mayor edad.

Tabla 4.44. Velocidad de fricción media en función de los factores talla, densidad de reclutamiento y estado para los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica).

FACTOR		u_* (m/s)	FACTOR		u_* (m/s)	FACTOR		u_* (m/s)
TALLA	~21 mm	0.0406 \pm 0.01	DENSIDAD	BAJA	ESTADO	VIVO	0.0380 \pm 0.01	
	~24 mm	0.0495 \pm 0.01		ALTA		MUERTO	0.0498 \pm 0.01	

El análisis de la densidad refleja como en los ensayos de grupos de tallas, que para las mayores densidades la velocidad de fricción es inferior. En el factor estado se ha encontrado que para el estado muerto, las velocidades de fricción son significativamente superiores. Sin embargo, esto se contradice con los resultados de los trabajos de van Duren *et al.* (2006) realizados sobre un lecho de mejillones que cuando estaban en actividad filtradora incrementaban los valores de la velocidad de fricción (§4.2.5). Esta circunstancia podría estar relacionada con la velocidad media y máxima del flujo, que para el grupo de berberechos muertos ha sido un 20% superior en términos medios.

También es significativo que en los ensayos de grupos de tallas el factor estado es estadísticamente significativo en la movilización de los moluscos (ver ANOVA, Tabla 4.19), pero las diferencias en las velocidades de fricción medias del análisis exploratorio sólo arrojaban una diferencia en la velocidad de fricción inferior al ~2% (0.042 ± 0.012 vs 0.043 ± 0.10 , §Tabla 4.28). Por el contrario, en el ensayo de poblaciones estacionales el ANOVA no refleja

diferencias significativas con el factor estado (§Tabla 4.37) pero las diferencias en u_* son del orden del ~28% (§Tabla 4.44).

En la Tabla 4.45 se presentan los principales parámetros que definen la **función de rugosidad del lecho** (z_m , σ_z y z_0), la rugosidad característica del mismo Δ y la rugosidad característica de la ley logarítmica de velocidades z_c .

Tabla 4.45. Resumen de las características geométricas del lecho en función de los factores analizados para los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica).

FACTOR		z_m (mm)	σ_z (mm)	$\Delta = z_c - z_t$ (mm)	z_c (mm)	z_0 (mm)
VELOCIDAD	V01	8.4±1.5	3.1±0.3	13.4±1.8	5.1±0.9	0.2±0.1
	V02	8.2±1.5	3.8±0.9	14.5±1.2	6.2±1.7	0.4±0.2
	V03	7.2±1.2	3.6±0.8	14.1±3.2	7±2.2	0.4±0.1
	V04	9.3±2.8	4.5±1	16.9±3.5	7.6±1.6	0.5±0.4
	V05	9.8±2.5	4.9±1.1	17.9±3.0	8.1±2.7	0.6±0.5
	V06	8.0±2.5	4.5±0.5	16.3±2.0	8.2±1.5	0.6±0.5
TALLA	~21 mm	8.3±2.0	4.0±0.9	15.2±2.4	6.9±1.9	0.5±0.4
	~24 mm	9.5±2.7	4.9±1.0	17.6±3.4	8.1±2.2	0.6±0.3
DENSIDAD	BAJA	9.8±2.6	4.4±1.1	16.7±3.8	6.9±2.3	0.5±0.4
	ALTA	7.6±1.4	4.2±0.9	15.4±1.6	7.8±1.7	0.5±0.4
ESTADO	VIVO	8.9±2.5	4.1±0.8	15.6±2.7	6.7±1.9	0.4±0.3
	MUERTO	8.4±2.2	4.5±1.2	16.5±3.3	8.1±1.9	0.6±0.4
TODOS LOS ENSAYOS		8.7±2.3	4.3±1.0	16.0±3.0	7.3±2.0	0.5±0.4

Los resultados obtenidos del análisis de las propiedades geométricas presentan ciertas diferencias con los obtenidos en los ensayos de grupos de tamaños. Así, la posición del plano $z=0$ (z_m) o la rugosidad característica del lecho Δ no se reducen con velocidades crecientes, sino que se incrementan ligeramente, aunque ahora el fenómeno no es tan claro como sucedía con los ensayos de grupos de tallas. Al estudiar estos parámetros respecto a la talla si se observa una relación directa con la misma. Nuevamente, por efecto de la carencia de datos para las velocidades más bajas en la talla de ~24 mm, estas relaciones están ligeramente afectadas. De echo, si se analizan sólo las velocidades más altas, donde el análisis está equilibrado, la posición media del lecho se mantiene prácticamente como en la Tabla 4.45 (8.6±2.5 mm vs 9.5±2.7 mm) pero las diferencias en la rugosidad característica prácticamente desaparecen (16.4±2.1 vs 16.1±4.4 para la población más joven y más vieja respectivamente).

El grado de reclutamiento también afecta a la posición del plano $z=0$ cómo en los ensayos de grupo de tamaños: a menor densidad hay más rugosidad, y el plano se sitúa más cerca de la posición del lecho de arena. Con una densidad alta, el efecto es opuesto.

La **rugosidad** también se puede medir a través de la escala z_0 de la ley de velocidades. Para la densidad baja la rugosidad es un 50% mayor que la densidad más alta, 0.6±0.4 mm y 0.4±0.3

mm respectivamente. Además, la rugosidad es similar a la encontrada para las tallas 15-20 y 20-25 mm de valor 0.4 ± 0.4 y 0.5 ± 0.5 mm respectivamente.

Por último, se presenta en la Tabla 4.46 los parámetros y escalas geométricas más relevantes en función de los factores estudiados.

Tabla 4.46. Resumen de las escalas geométricas para los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica).

FACTOR		H	δ_h	δ_h / H	H / Δ	η
		(mm)	(mm)	(-)	(-)	(mm)
VELOCIDAD	V01	145.0 \pm 7.1	40.0 \pm 15.7	0.27 \pm 0.10	10.9 \pm 1.1	0.306 \pm 0.044
	V02	145.1 \pm 2.3	37.3 \pm 14.4	0.26 \pm 0.10	10.1 \pm 0.7	0.236 \pm 0.028
	V03	144.3 \pm 3.9	38.2 \pm 13.5	0.26 \pm 0.09	10.7 \pm 2.7	0.227 \pm 0.006
	V04	140.7 \pm 3.5	85.1 \pm 25.8	0.60 \pm 0.18	8.6 \pm 1.5	0.207 \pm 0.035
	V05	140.8 \pm 3.3	65.4 \pm 46.5	0.46 \pm 0.33	8.0 \pm 1.1	0.195 \pm 0.040
	V06	140.1 \pm 2.6	69.6 \pm 49.9	0.50 \pm 0.36	8.7 \pm 0.9	0.18 \pm 0.033
TALLA	~21 mm	143.3 \pm 4.3	54.5 \pm 30.2	0.38 \pm 0.21	9.6 \pm 1.6	0.229 \pm 0.053
	~24 mm	139.3 \pm 1.2	76.2 \pm 48.5	0.55 \pm 0.35	8.2 \pm 1.4	0.187 \pm 0.023
DENSIDAD	BAJA	142.0 \pm 3.7	66.3 \pm 44.5	0.47 \pm 0.31	9.0 \pm 2.1	0.229 \pm 0.054
	ALTA	141.9 \pm 4.5	56.7 \pm 29.7	0.40 \pm 0.22	9.3 \pm 1.1	0.199 \pm 0.039
ESTADO	VIVO	142.2 \pm 4.2	75.1 \pm 48.0	0.53 \pm 0.34	9.4 \pm 1.7	0.235 \pm 0.05
	MUERTO	141.7 \pm 4.0	46.8 \pm 11.0	0.33 \pm 0.08	8.9 \pm 1.6	0.192 \pm 0.038
TODOS LOS ENSAYOS		141.9 \pm 4.0	61.7 \pm 38	0.44 \pm 0.27	9.1 \pm 1.7	0.215 \pm 0.049

Por la presencia de los berberechos el calado característico, $H = z_{ws} - z_m$, se reduce a un valor medio de $\sim 141.9 \pm 4.0$ mm, valor ligeramente superior al encontrado en los ensayos de tallas: $\sim 139.6 \pm 0.8$ mm. La **posición de la velocidad máxima** δ_h presenta un comportamiento más irregular que el encontrado en los ensayos con fondo liso y en los ensayos de grupos de tallas. En estos ensayos la posición con respecto de la velocidad tiene más dispersión como refleja el ratio δ_h / H : 0.44 ± 0.27 . Además, en general para las velocidades más altas la relación δ_h / H se encuentra por encima o muy cerca de la mitad del calado, aunque por debajo de los valores predichos por la fórmulas empíricas presentadas en el Cap. 2 y en el apartado 4.4.2.1.

Como se ha comentado, la posición donde se encuentra la velocidad máxima presenta mucha dispersión, con desviaciones estándar que pueden llegar a representar hasta más del 70% del valor medio de los niveles de cada factor (ver p.ej. la media para la velocidad V06). Como se ha comentado, esta dispersión se explica en parte por la dificultad de obtener el máximo correctamente en una zona con poco gradiente, pero también por las diferencia en la estructura del entre los grupos de ensayos de velocidad baja y alta, y entre los ensayos de estado vivo y muerto.

El análisis por talla revela la posición relativa δ_h / H está inversamente relacionada con la talla. Lo mismo sucede con el reclutamiento, que cuando presenta mayor rugosidad hace más pronunciado el descenso de la velocidad.

El parámetro H/Δ representa el **grado de sumergencia** relativo del flujo. Con respecto a este parámetro se puede señalar que la sumergencia en los ensayos de poblaciones estacionales es intermedia, con un valor medio de 9.1 ± 1.7 . Por último, y como era previsible, la microescala de Kolgomorov tiene el mismo orden de magnitud que la registrada en las otras configuraciones analizadas.

Velocidades doblemente promediadas

A continuación se presentarán las principales características de los campos de velocidades determinados en los ensayos de poblaciones estacionales. En el Apéndice 3 se recogen unas fichas con la representación gráfica de los perfiles doblemente promediados de velocidad, intensidades turbulentas y distribución de tensiones para los 36 de grupos estacionales así como varias Tablas resumen con todos los estadísticos analizados en el epígrafe anterior.

Como en el apartado 4.4.3.2, únicamente se presentarán los campos de velocidades de algunos ensayos para reflejar la influencia de la rugosidad, medida como el grado de reclutamiento, en la estructura de las velocidades medias y doblemente promediadas.

En las figuras Figura 4.104 y Figura 4.105 se representa el campo de velocidades medias promediadas en el tiempo para el ensayo realizado con la población de otoño, con la velocidad de ~ 0.44 m/s y los moluscos vivos, para los reclutamientos alto y bajo respectivamente. De modo abreviado, se denominarán ensayos V05D21AV y V05D21BV.

Las características generales de los **campos de velocidades** en los ensayos de grupos de poblaciones son similares a las de los ensayos realizados con las tallas intermedias y con la densidad alta. En los ensayos de poblaciones de baja densidad, el lecho de berberechos es más homogéneo espacialmente que en los ensayos de grupos de baja densidad por la gradación de tamaños y la disposición de los berberechos. Así, si se comparan las Figura 4.73 y la Figura 4.105, se puede observar como la separación entre las rugosidades es mucho menor en los ensayos de poblaciones (~ 30 - 40 mm vs ~ 10 - 20 mm), por lo que el flujo será más rasante y uniforme en estos ensayos.

Además, las diferencias en la estructura y características del flujo en los ensayos de poblaciones originadas por el factor reclutamiento son menores que en los ensayos de grupos de tallas. Por este motivo, el análisis se realizará a partir de este momento únicamente para el escenario de reclutamiento alto (V05D21AV).

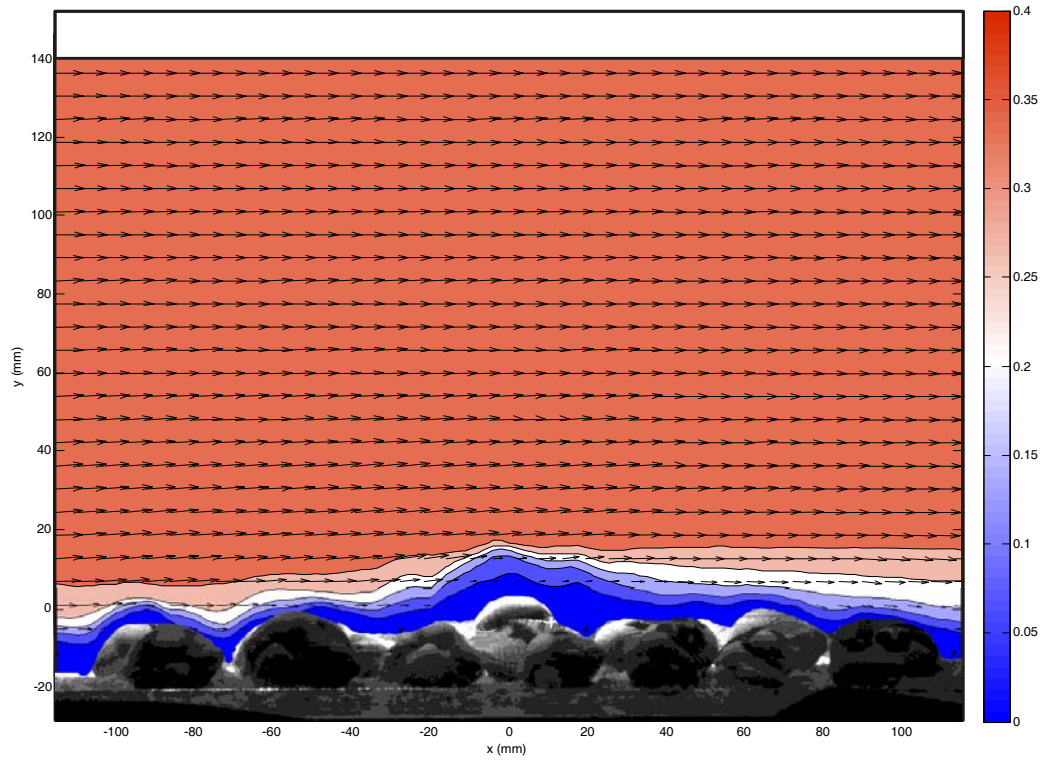


Figura 4.104. Campo de velocidades obtenido para el ensayo V05D21AV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media (0-0.4 cm/s) y únicamente 1 de cada 3 vectores para facilitar la visualización.

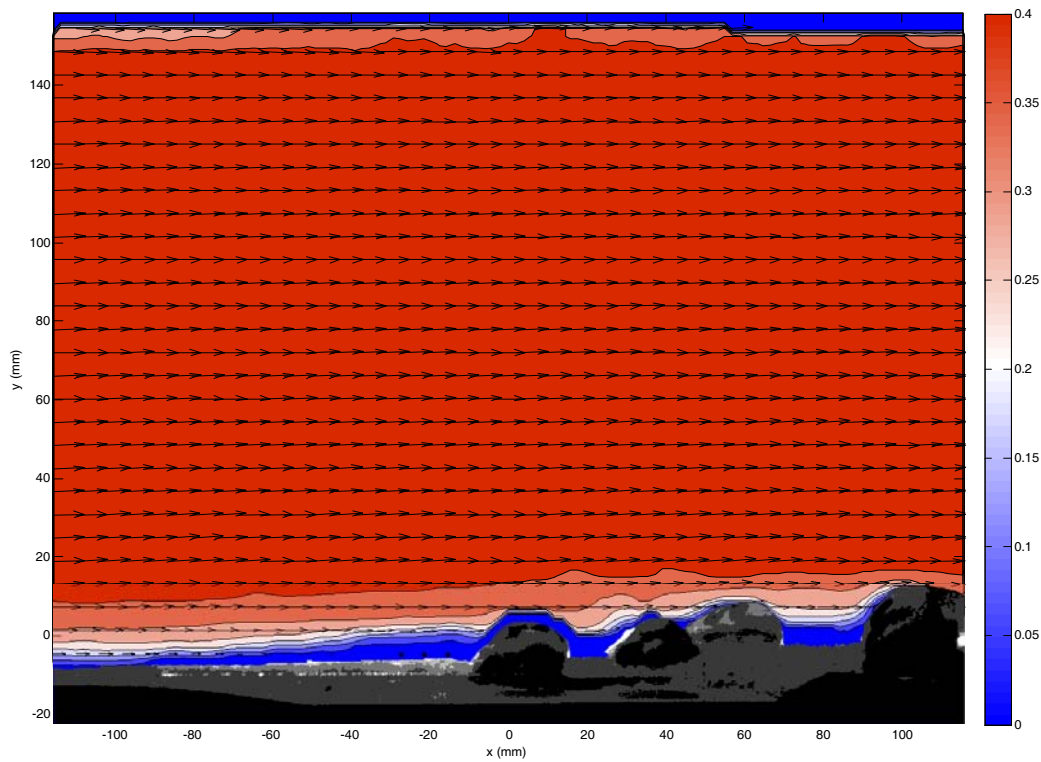


Figura 4.105. Campo de velocidades obtenido para el ensayo V05D21BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media (0-0.4 cm/s) y únicamente 1 de cada 3 vectores para facilitar la visualización.

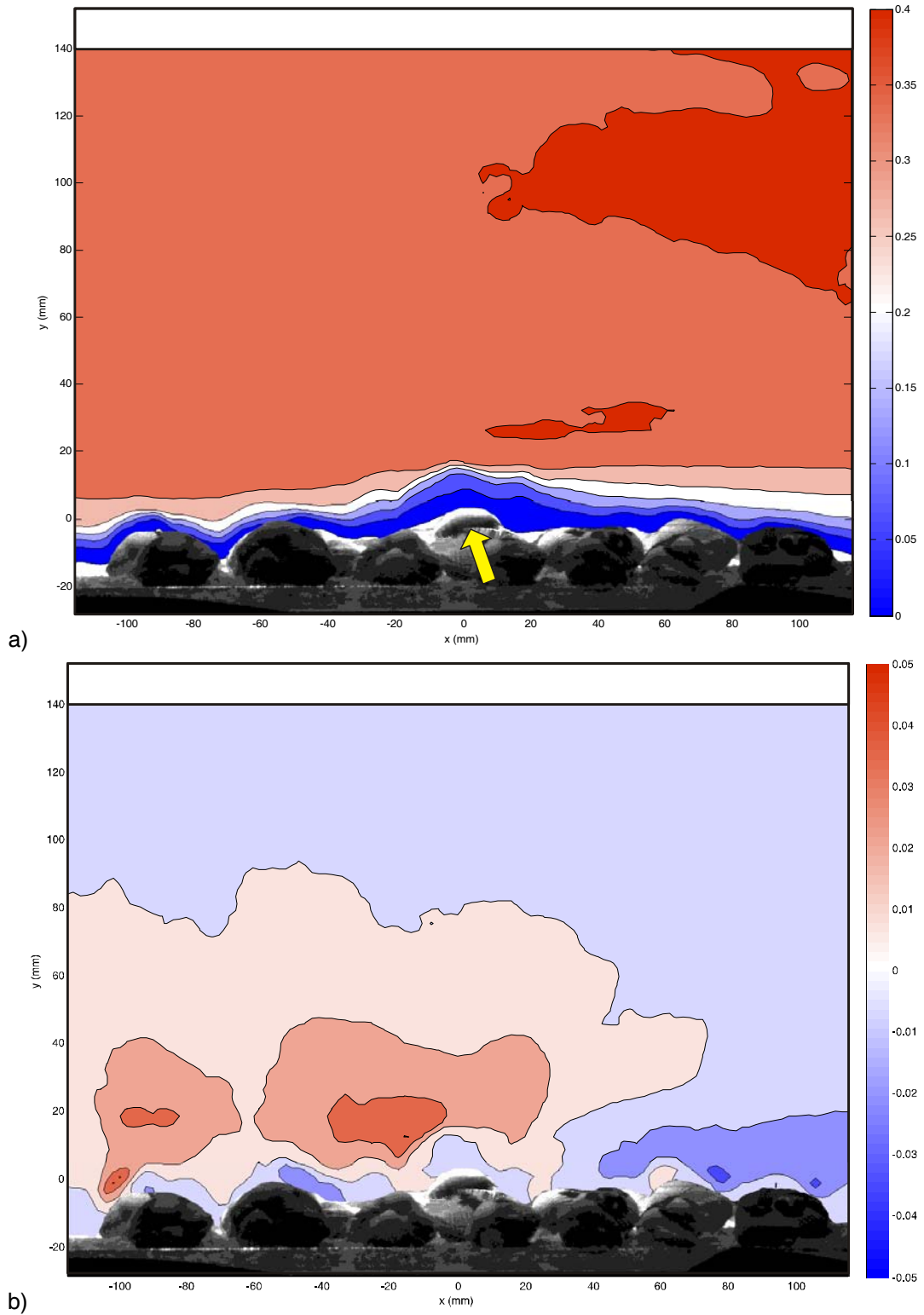


Figura 4.106. Campo de velocidades promediadas en el tiempo para el ensayo V05D21AV: a) velocidades horizontales y b) velocidades verticales. La flecha amarilla señala la posición de un berberecho recolocado por el flujo en una dimensión mayor que el resto del parche.

En la Figura 4.106 se representa el campo escalar de las **velocidades horizontales y verticales** promediadas en el tiempo. Se puede apreciar como un berberecho recolocado por la corriente altera la estructura del flujo en horizontal, éste se acelera y comprime sobre el bivalvo, y en la vertical, se producen aceleraciones verticales aguas arriba del bivalvo y succiones aguas abajo del mismo.

El análisis de las **perturbaciones espaciales** de la velocidad, presentado en la Figura 4.107, revela que el flujo está ligeramente acelerado aguas arriba del parche de berberechos, y que en la zona de generación de estelas (en la flecha amarilla) las velocidades se reducen. Como sucedía con los ensayos de grupos de tallas, las velocidades horizontales son espacialmente uniformes a poca distancia de las crestas del lecho.

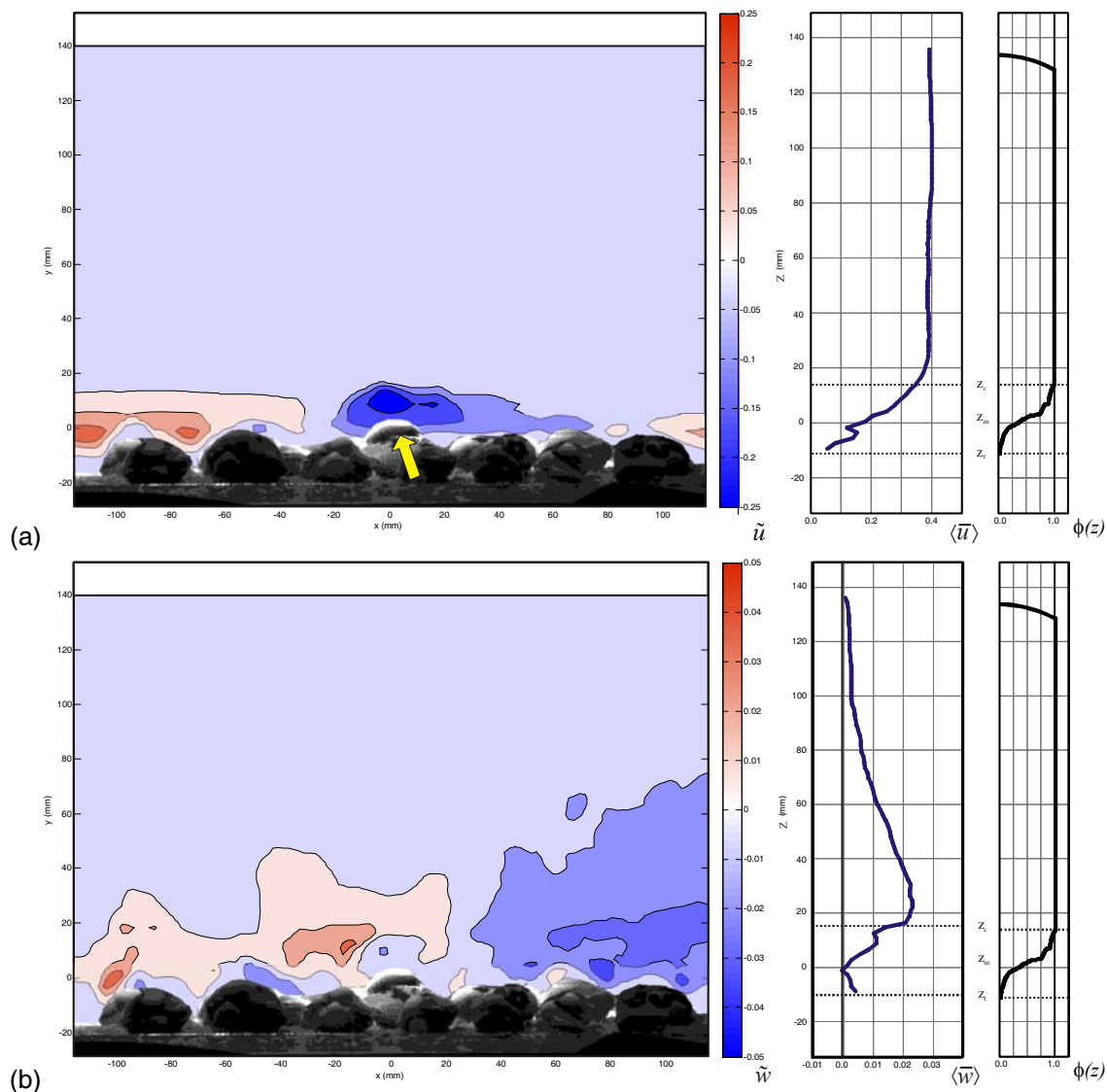


Figura 4.107. (a) Campo de la perturbación espacial de la velocidad horizontal $\langle \tilde{u} \rangle$ y (b)

vertical $\langle \tilde{w} \rangle$ para el ensayo V05D21AV. La flecha amarilla señala la posición de un berberecho recolocado por el flujo en una dimensión mayor que el resto del parche. A la derecha se represente el perfil de velocidades doblemente promediado así como la función de rugosidad de lecho $\phi(z)$.

Las perturbaciones espaciales de la velocidad vertical presentan un patrón similar al encontrado en los ensayos de grupos de tallas para el reclutamiento más bajo, con velocidades ascendentes antes de los principales obstáculos (el primer berberecho y el recolocado), y descendentes fundamentalmente hacia aguas abajo de la sección de estudio. En este caso, la estructura vertical se ve afectada hasta casi la totalidad del calado, aunque menos que en los ensayos de grupos de tamaño de baja densidad.

La estructura de la velocidad para los ensayos de poblaciones estacionales con el menor grado de reclutamiento (no presentado aquí) es similar al mostrado en las figuras anteriores (Figura 4.104, Figura 4.106 y Figura 4.107).

En la Figura 4.108 se muestran las velocidades horizontales doblemente promediadas en el tercio inferior del calado para el ensayo realizado con la población más joven viva. Ahora, y al contrario de lo que sucedía con los ensayos de grupos de tallas, parece que la forma del perfil de velocidades y la magnitud de las mismas no depende del reclutamiento. Esto se puede atribuir a que las diferencias en la rugosidad del lecho para los ensayos de poblaciones estacionales no son tan pronunciadas como en los ensayos anteriores.

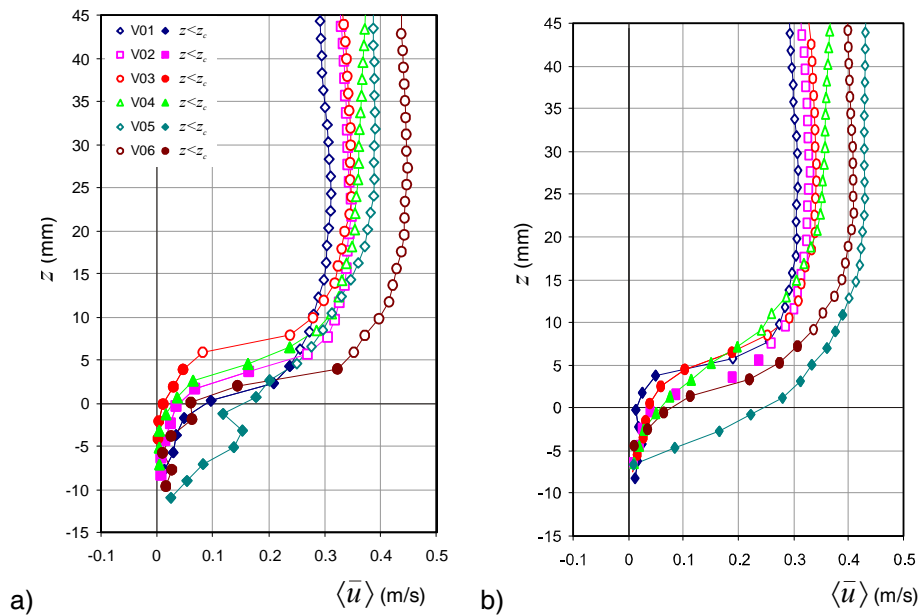


Figura 4.108. Comparación de las velocidades doblemente promediadas para la serie de ensayos de la población de $d=21$ mm y estado vivo: a) densidad de reclutamiento alta y b) densidad de reclutamiento baja. Los símbolos rellenos representan la zona situada bajo las crestas del lecho.

También se puede observar como la velocidad V05 para la densidad baja, Figura 4.108 (b), es mayor que la velocidad más alta de ensayo V06. Estas diferencias se atribuyen a que en el momento de hacer la grabación había pocos berberechos en la zona de análisis (ver la Figura 4.105). Esto provoca un incremento de las velocidades, la desaparición del punto de inflexión y el retardo de las velocidades en el perfil porque no se producen estelas, o éstas son poco importantes con respecto a toda la zona de promediado, y que la ley de velocidades se asemeje más a una distribución logarítmica sobre un lecho sin moluscos.

Los perfiles de velocidades horizontales doblemente promediados se han empleado para determinar la velocidad de fricción a partir de la ley logarítmica de velocidades. Se ha seguido el mismo procedimiento que el seguido en los ensayos de grupos de tallas (§4.4.3.2).

En los ensayos de poblaciones, la relación entre la posición de las crestas del lecho y la rugosidad características $z_c / \Delta \sim 0.46 \pm 0.11$ se encuentra entre los valores de las tallas 20-25 mm y 25-30 mm de los ensayos anteriores, 0.49 ± 0.13 y 0.41 ± 0.13 (Tabla 4.31). No se han encontrado diferencias significativas entre las poblaciones de otoño y primavera, 0.47 ± 0.11 y 0.47 ± 0.10 respectivamente, pero si entre los índices de reclutamiento, 0.51 ± 0.08 y 0.42 ± 0.11 para el bajo y alto respectivamente. En general, se puede concluir que el comportamiento de este parámetro, así como la relación d_{50} / Δ , es similar a la observada en los ensayos de grupos de tallas.

Intensidades turbulentas y tensiones de corte

A continuación se presentará la estructura de las tensiones e intensidades turbulentas en los ensayos realizados. Nuevamente, la estructura del flujo dependerá del tipo de velocidad ensayada (V01-V03 y V04-V06) y de si los ensayos son de estado vivo o muerto. Como la estructura de las intensidades turbulentas y tensiones es similar a la encontrada en los ensayos de tallas, en este apartado únicamente se presentarán algunas gráficas que confirmen las tendencias descritas en el apartado 4.4.3.2.

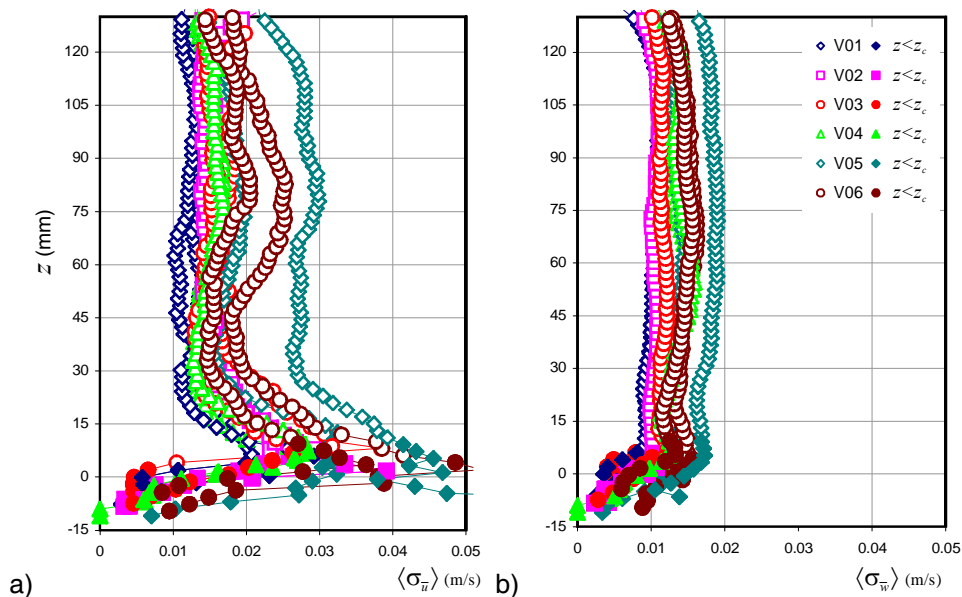


Figura 4.109. Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para los ensayos de ensayos de la población de $d=21$ mm y estado vivo: a) intensidades horizontales y b) intensidades verticales. En la figura se han agregado las dos densidades de reclutamiento.

En la Figura 4.109 se presenta la distribución de las **intensidades turbulentas horizontales y verticales** para el ensayo de la población de otoño y el estado vivo. En las figuras se puede apreciar como prácticamente no existen diferencias en las distribuciones originadas por la velocidad ni el grado de reclutamiento. Además, en la velocidad V05 existe una distribución de intensidades horizontales y verticales ligeramente mayor que el resto. Esta distribución se

corresponde con la del ensayo de baja densidad, que como se ha indicado anteriormente, presenta una velocidad un poco mayor que la de la media de ensayos (ver Figura 4.108).

El resto de características de la distribuciones es similar a la encontrada para los ensayos de grupos de tallas y puede consultarse en ese apartado (ver Figura 4.84 a Figura 4.87, página 4.139). Lo mismo sucede con las **intensidades de forma**, que siguen las características descritas en la Figura 4.88 para los ensayos de grupos de tallas.

Como se puede apreciar en la Figura 4.110, las intensidades turbulentas dispersivas horizontales y verticales son prácticamente constantes e iguales hasta unos 30 mm por encima del nivel de la superficie media del lecho. A partir de esta distancia, las intensidades verticales crecen hasta alcanzan un máximo pocos milímetros por encima de las crestas del lecho.

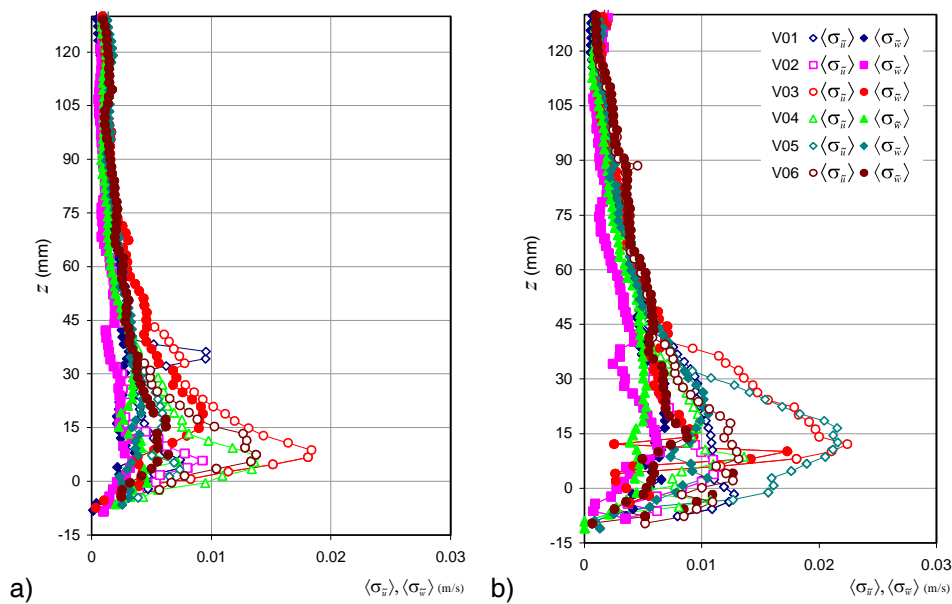
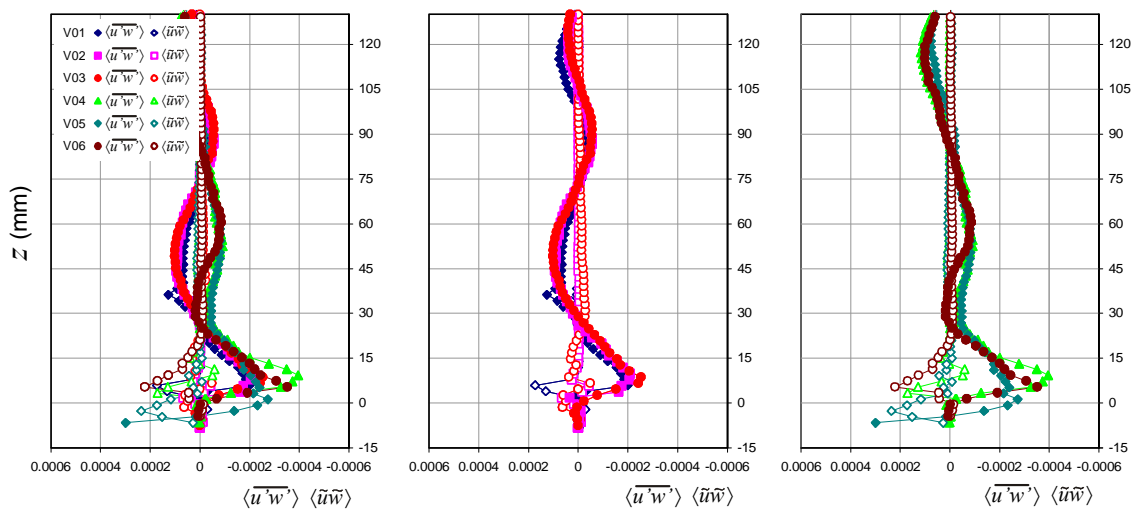


Figura 4.110. Perfiles de las intensidades turbulentas de forma horizontal y vertical (símbolos vacíos y rellenos respectivamente) para el ensayo de la población de $d \sim 21$ mm y estado vivo: a) densidad baja y b) densidad alta.

Comparando los valores de las intensidades de forma para los dos reclutamientos se vuelve a encontrar, como sucedía con los ensayos de grupos de tallas, que para la mayor densidad de reclutamiento las intensidades son más elevadas.

El análisis de las **tensiones de Reynolds y de forma** revela un comportamiento similar al encontrado en los ensayos anteriores. En la Figura 4.111 se han representado las distribuciones para el ensayo de la población de otoño en estado vivo. Se puede comprobar que no siempre un incremento de velocidad se traduce en una mayor tensión de Reynolds. Este fenómeno se puede observar entre los grupos de velocidades V01-V03 y V04-V06, pero también dentro de cada grupo (p.ej. para las velocidades más altas y densidad baja, las mayores tensiones se producen para la V04). Este fenómeno se atribuye a cambios en la rugosidad relativa entre ensayos que afectan a las distribuciones de esfuerzos de corte.

a)



b)

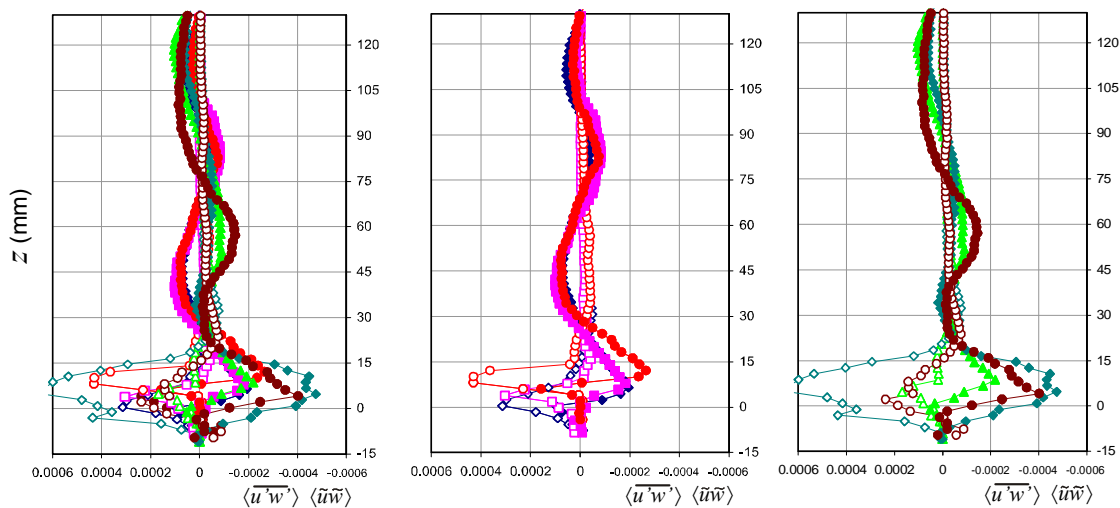


Figura 4.111. Perfiles de los esfuerzos de corte de Reynolds y forma doblemente promediados (símbolos rellenos y vacíos respectivamente) para el ensayo de la población de de $d=21$ mm y estado vivo: a) densidad baja y b) densidad alta.

Las **tensiones de forma** también reproducen las características de los ensayos de grupos de tallas. Así, estas son prácticamente constantes y nulas hasta unos 2 o 3 cm por encima de las crestas del lecho y de signo generalmente positivo, aunque también se han observado tensiones de forma con signo negativo y con oscilaciones muy pronunciadas (con cambio de signo) en la región del lecho.

Además, el reclutamiento influye en las distribuciones de modo que las tensiones más grandes se han encontrado para la densidad alta, ver Figura 4.112. En esta figura también se puede apreciar como los máximos se producen aproximadamente sobre las crestas del lecho.

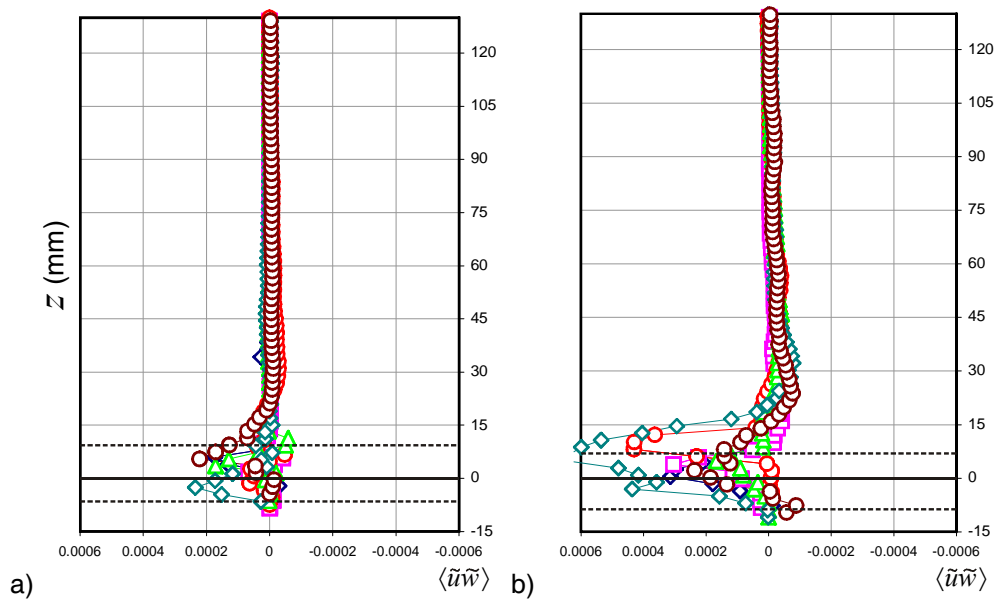


Figura 4.112. Perfiles de los esfuerzos dispersivos doblemente promediados para el ensayo de la población de de $d=21$ mm y estado vivo: a) densidad baja y b) densidad alta. Se representa la posición media de las crestas y de los senos del lecho con una línea discontinua.

Las tensiones de forma también son muy importantes en estos ensayos, alcanzando valores que en algunos casos son del mismo orden de magnitud que las tensiones de Reynolds. En promedio el ratio $\left| \frac{\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle}{\langle u'w' \rangle} \right|$ vale 0.64 ± 0.29 , aunque la contribución en la talla más grande es ligeramente superior, 0.71 ± 0.29 vs 0.61 ± 0.30 respectivamente. Lo mismo sucede con el reclutamiento mayor, 0.69 ± 0.29 vs 0.62 ± 0.32 . Nuevamente, las tensiones dispersivas determinadas en estos experimentos parecen mucho más importantes que en otros flujos rugosos descritos en la literatura, sin embargo, no hay que olvidar el marcado componente tridimensional de estos ensayos que puede haber potenciado este fenómeno.

Como se ha comentado, los valores máximos de las tensiones de Reynolds se producen ligeramente por encima de las crestas del lecho mientras que los máximos de las tensiones de forma parecen producirse sobre la altura z_c . Así, se ha determinado la posición media de las crestas del lecho en todos los ensayos en 7.6 ± 2.3 mm y la de los picos de las tensiones $\langle u'w' \rangle$ y $\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$ en 9.1 ± 2.3 mm y 4.9 ± 4.0 mm respectivamente.

Si se analizan gráficamente de estas relaciones (no presentado aquí) se observa que existe mucha dispersión entre las mismas, similar a la encontrada en los ensayos anteriores (§Figura 4.93). El análisis de las posiciones de los máximos de las intensidades turbulentas de Reynolds y forma también revela que estos datos también presentan mucha dispersión. Así, el calado para las intensidades $\sigma_{\langle \tilde{u} \rangle}$, $\sigma_{\langle \tilde{w} \rangle}$, $\sigma_{\langle \tilde{u} \rangle}$ y $\sigma_{\langle \tilde{w} \rangle}$ es de 5.3 ± 4.5 mm, 59.5 ± 28.3 mm, 10.9 ± 6.8 mm y 8.7 ± 4.5 mm respectivamente. Como sucedía con los ensayos de tallas, parece que existe una relación en la posición de las intensidades turbulentas horizontales y las intensidades dispersivas con la posición de las crestas del lecho, y una relación del pico de intensidades turbulentas verticales (59.5 ± 28.3 mm) y el calado donde se produce la velocidad máxima, δ_h , ubicado a 61.7 ± 38.0 mm.

Por último, se presenta una comparación entre las velocidades de corte estimadas a partir de la ley logarítmica de velocidades, u_{*log} , las estimadas a partir de la extrapolación de los perfiles de esfuerzos de Reynolds hasta los calados z_c y z_m ($z=0$), $u_{*,uw,(z=z_c)}$ y $u_{*,uw,(z=0)}$, y las determinadas a partir de la tensión máxima $-\rho\langle u'w' \rangle - \rho\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$, $u_{*max,uw}$. Con este objeto, se presenta en primer lugar en la Tabla 4.47 el valor de las velocidades de fricción así determinadas en función de los factores velocidad–reclutamiento, talla–reclutamiento y estado–reclutamiento. Además, los valores medios de la velocidad de fricción característica para los factores analizados individualmente se recogen en la Tabla 4.43 y en la Tabla 4.44.

Tabla 4.47. Velocidades de fricción en los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica) para los factores velocidad–reclutamiento, talla–reclutamiento y estado–reclutamiento.

FACTOR		$u_{*,log}$ (m/s)	$u_{*,uw(z=0)}$ (m/s)	$u_{*,uw(z=z_c)}$ (m/s)	$u_{*max,uw}$ (m/s)
VELOCIDAD D.BAJA	V01	0.031 \pm 0.002	0.018 \pm 0.004	0.017 \pm 0.003	0.015 \pm 0.003
	V02	0.041 \pm 0.004	0.017 \pm 0.003	0.016 \pm 0.003	0.014 \pm 0.002
	V03	0.038 \pm 0.002	0.016 \pm 0.006	0.014 \pm 0.004	0.018 \pm 0.009
	V04	0.048 \pm 0.007	0.020 \pm 0.003	0.018 \pm 0.003	0.017 \pm 0.004
	V05	0.048 \pm 0.006	0.019 \pm 0.003	0.016 \pm 0.003	0.019 \pm 0.003
	V06	0.063 \pm 0.017	0.024 \pm 0.002	0.02 \pm 0.002	0.023 \pm 0.005
VELOCIDAD D.ALTA	V01	0.022 \pm 0.002	0.016 \pm 0.001	0.015 \pm 0.001	0.016 \pm 0.005
	V02	0.033 \pm 0.004	0.017 \pm 0.001	0.015 \pm 0.001	0.015 \pm 0.001
	V03	0.038 \pm 0.001	0.020 \pm 0.002	0.018 \pm 0.003	0.019 \pm 0.003
	V04	0.040 \pm 0.009	0.020 \pm 0.003	0.017 \pm 0.002	0.020 \pm 0.004
	V05	0.045 \pm 0.017	0.021 \pm 0.005	0.02 \pm 0.002	0.018 \pm 0.004
	V06	0.045 \pm 0.007	0.020 \pm 0.003	0.017 \pm 0.002	0.016 \pm 0.003
TALLA D.BAJA	~21 mm	0.046 \pm 0.016	0.020 \pm 0.004	0.017 \pm 0.003	0.018 \pm 0.005
	~24 mm	0.034 \pm 0.008	0.019 \pm 0.004	0.017 \pm 0.002	0.016 \pm 0.003
TALLA D.ALTA	~21 mm	0.050 \pm 0.006	0.020 \pm 0.004	0.016 \pm 0.003	0.019 \pm 0.005
	~24 mm	0.049 \pm 0.011	0.020 \pm 0.003	0.017 \pm 0.003	0.020 \pm 0.004
ESTADO D.BAJA	Vivo	0.046 \pm 0.009	0.021 \pm 0.004	0.018 \pm 0.003	0.017 \pm 0.005
	Muerto	0.034 \pm 0.008	0.020 \pm 0.003	0.017 \pm 0.003	0.017 \pm 0.003
ESTADO D.ALTA	Vivo	0.049 \pm 0.016	0.019 \pm 0.004	0.016 \pm 0.003	0.019 \pm 0.005
	Muerto	0.045 \pm 0.013	0.019 \pm 0.003	0.017 \pm 0.002	0.018 \pm 0.004

En la Tabla 4.47 se puede observar como el comportamiento de las velocidades de fricción estimadas a partir de la ley logarítmica es creciente con las velocidades, y ligeramente mayor para la densidad de reclutamiento y la talla más baja. También se observa que la dispersión de

la velocidad de fricción en estos ensayos es, en general, un orden de magnitud inferior a la propia velocidad de fricción. Recordemos que en los ensayos de grupos, la dispersión de la velocidad de corte era del mismo orden que la propia velocidad de fricción (Tabla 4.32), probablemente porque en el caso anterior se estaban promediando escenarios con mayores diferencias.

Al analizar las velocidades de fricción estimadas a partir de la ley logarítmica con las determinadas partir de las tensiones de Reynolds se vuelve a observar como éstas últimas son menores y prácticamente constantes con la velocidad del flujo. Este fenómeno también se presenta en la Figura 4.113, donde se han representado varios gráficos con la dispersión de las velocidades de fricción u_{*log} , $u_{*uw,(z=zc)}$, $u_{*uw,(z=0)}$ y $u_{*max,uw}$ en función de la velocidad media, máxima y la velocidad de fricción característica. Hay que señalar que la relación lineal perfecta entre u_{*log} y u_* , es esperable porque las variables son iguales.

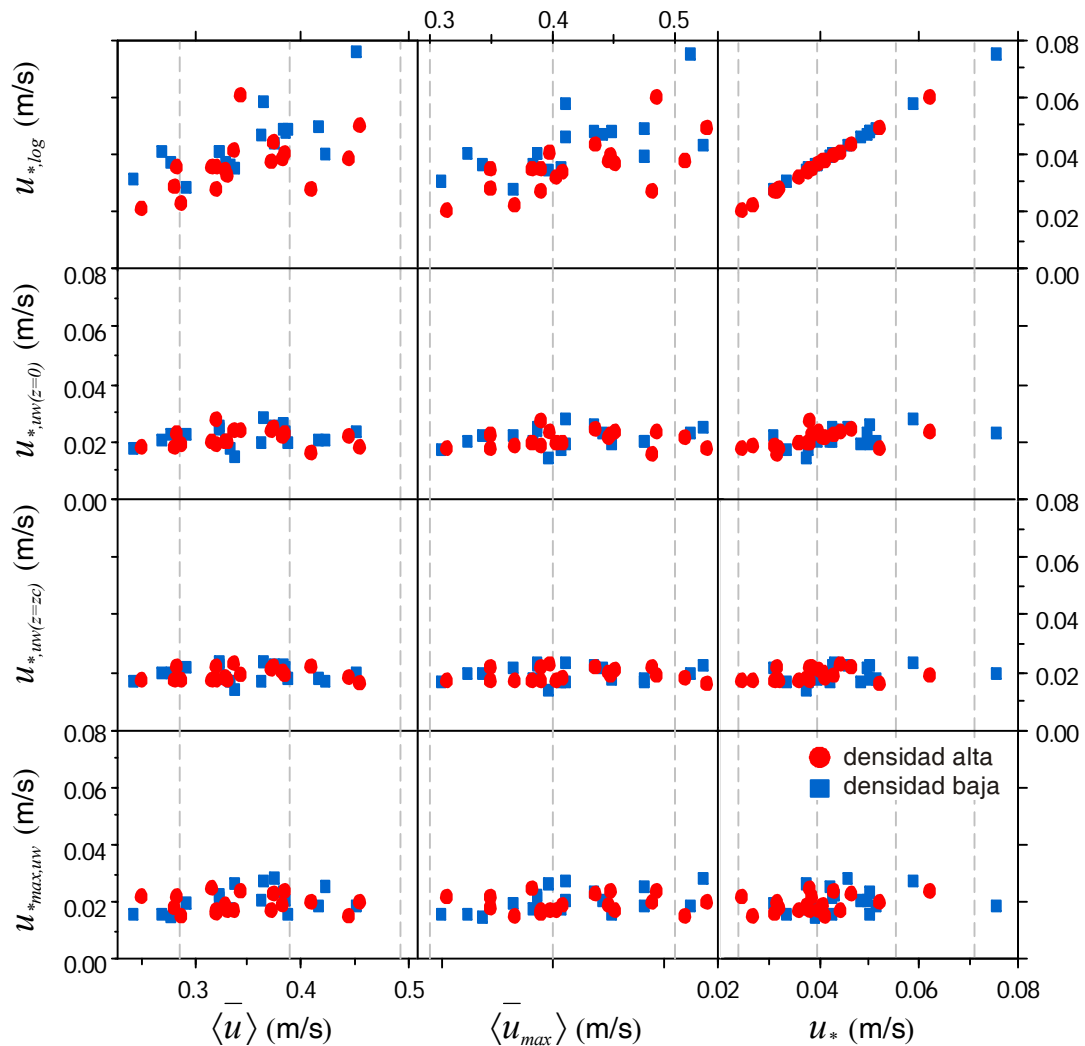


Figura 4.113. Matriz de correlación entre la velocidad doblemente promediada media y máxima y la velocidad de fricción característica con las velocidades de fricción estimadas a partir del perfil logarítmico u_{*log} , de la extrapolación de las tensiones de Reynolds $u_{*uw,(z=zc)}$, $u_{*uw,(z=0)}$ y a partir de la tensión tangencial total máxima $u_{*max,uw}$. Se han representado los ensayos de poblaciones en función del grado de reclutamiento.

En esta figura se puede apreciar como ahora u_{*log} sigue una tendencia de proporcionalidad con la velocidad con mucha menor dispersión que para los ensayos de grupos de tallas (Figura 4.95). También se observa como las velocidades estimadas a partir de los perfiles de tensiones son prácticamente constantes a lo largo de los ensayos realizados.

Nuevamente, parece que la velocidad de fricción estimada a partir de las tensiones de Reynolds es aproximadamente constante, tomando un valor de referencia a la altura de la posición media del lecho de 0.020 ± 0.004 m/s. Esta velocidad representa aproximadamente un $47.8\% \pm 12.7$ de la velocidad de fricción u_{*log} aunque si se analiza su contribución a la tensión tangencial sobre el lecho $\tau_0 (\propto u_*^2)$ ésta se reduce a un $20.9\% \pm 26.6\%$. Estas cifras son similares a las obtenidas en los ensayos de grupos de tallas.

4.4.4.3. Desarrollo de funciones de transporte de fondo

Por último, y con objeto de encontrar alguna relación entre la velocidad de fricción y el grado de movilización de los moluscos, se presenta en este apartado un análisis similar al realizado en el apartado 4.4.3.3. Se han planteado nuevamente las función de estabilidad de los berberechos con el parámetro de Shields, ecuación (4.7), y las funciones de transporte de caudal sólido adimensional establecidas en el apartado 4.2.5, ecuaciones (4.14) y (4.15).

Para determinar la tensión sobre el lecho se han empleado las velocidades de fricción calculadas a partir de la ley logarítmica de velocidades en los ensayos de transporte (§4.4.3.2). No se presentarán los resultados obtenidos con las velocidades de corte críticas correspondientes a la configuración con el lecho sin berberechos (§4.4.4.2) porque, como sucedía en los ensayos de grupos de tallas, las funciones de transporte así determinadas presentan mayor dispersión.

Para determinar el peso sumergido se han empleado los datos de densidad de los moluscos correspondientes a la anchura media de cada población, ~ 20.9 mm y ~ 24.3 mm para las poblaciones de otoño y primavera respectivamente ($\rho_c \approx 1.207$ y 1.295 g/cm³). Para caracterizar el diámetro se ha usado el diámetro nominal D_n asociado a las dimensiones antes señaladas, estimado en función de la anchura del berberecho c con la expresión (4.27).

En la Figura 4.114 se ha representado el porcentaje de moluscos movilizados en función del parámetro de Shields. Si se compara esta figura con la obtenida en los ensayos de grupos de tallas, Figura 4.96, se puede observar como los datos determinados en este apartado presentan menor dispersión. También se puede comprobar como empleando la misma velocidad de fricción para las dos tallas, el valor del parámetro de Shields es menor para la población mayor (parece que los datos se agrupan más o menos en dos rectas paralelas). Este comportamiento parece lógico porque el parámetro de Shields es inversamente proporcional a la densidad relativa y diámetro característico del *sedimento*, superiores para la población de primavera.

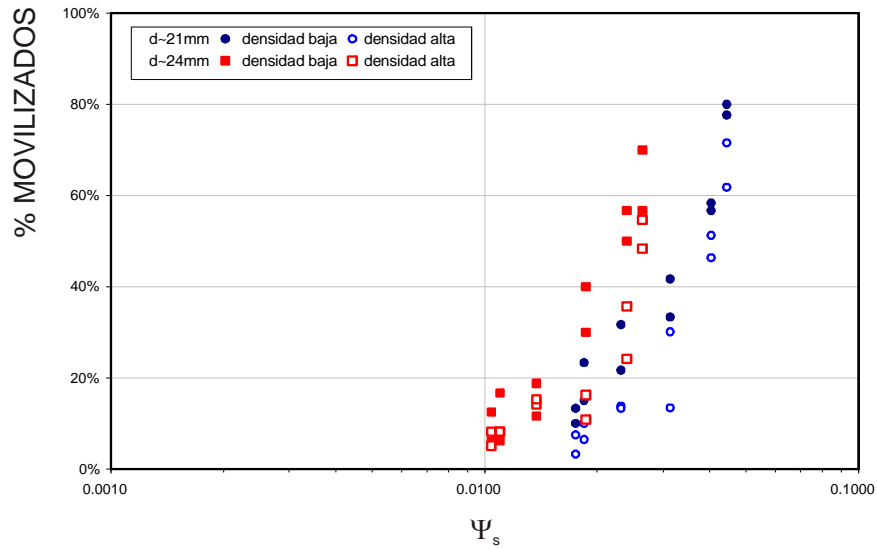


Figura 4.114. Relación entre el porcentaje de los moluscos movilizados y el parámetro de Shields Ψ_s en función de la densidad de reclutamiento y de la población analizada. Las velocidades de fricción empleadas son para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27.

En el análisis presentado en la Figura 4.114 no se contempla la respuesta del lecho ante el evento de transporte. En las figuras Figura 4.115 y Figura 4.116 se representa la movilización en función de las funciones de transporte se adimensionales Φ_q y Φ_E calculadas con la misma metodología que en los ensayos de grupos de tamaños (§4.4.3.3).

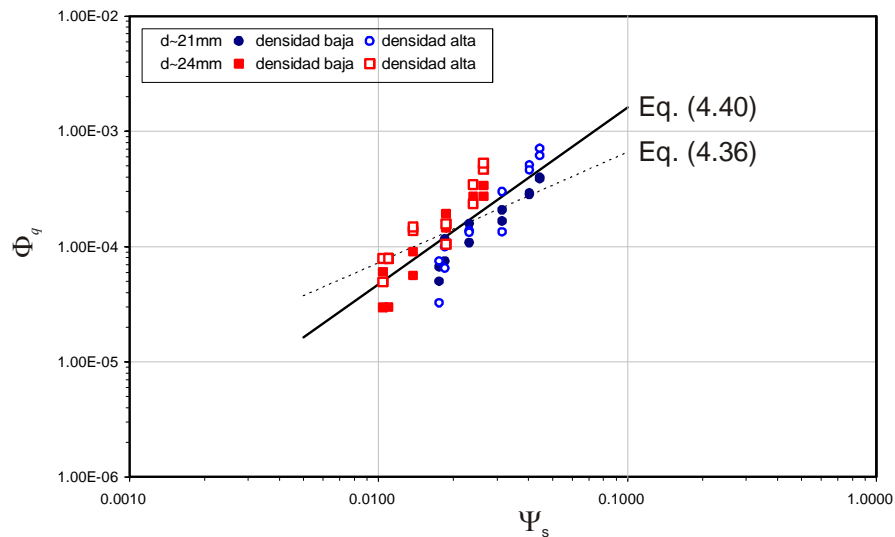


Figura 4.115. Relación entre el caudal sólido de fondo adimensional Φ_q y el parámetro de Shields Ψ_s en función de la densidad de reclutamiento y de la población analizada. Las velocidades de fricción empleadas son para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27. Se han representado los ajustes obtenidos para los ensayos de grupos de tallas, ecuación (4.35), y los de poblaciones, ecuación (4.40).

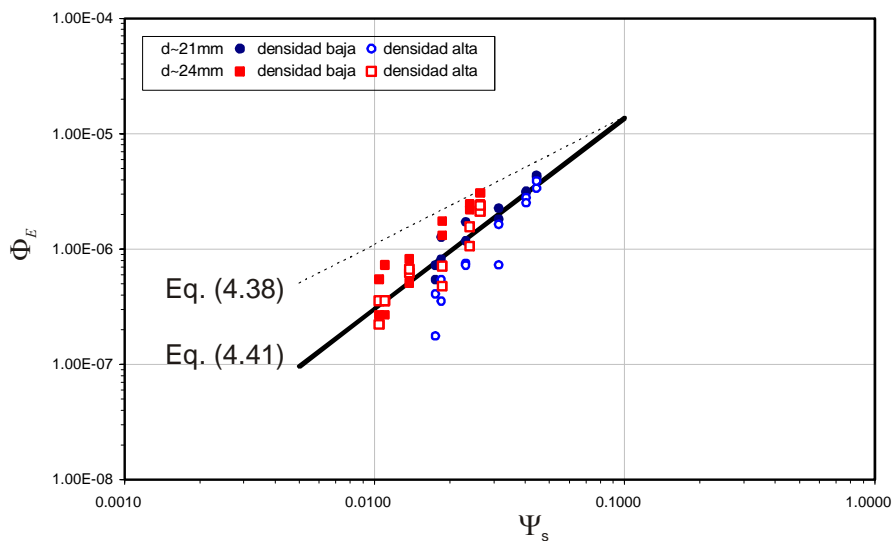


Figura 4.116. Relación entre el ratio de movilización Φ_E y el parámetro de Shields Ψ_s en función de la densidad de reclutamiento y de la población analizada. Las velocidades de fricción empleadas son para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27. Se han representado los ajustes obtenidos para los ensayos de grupos de tallas, ecuación (4.37), y los de poblaciones, ecuación (4.40).

A partir de los pares de puntos representados por el parámetro de Shields y las funciones de transporte se han ajustado las siguientes funciones de transporte potenciales:

$$\Phi_q = 0.055223 \cdot \Psi_s^{1.5338} \quad (4.40)$$

$$\Phi_E = 0.00061707 \cdot \Psi_s^{1.6546} \quad (4.41)$$

La bondad de las ecuaciones anteriores medida a partir del coeficiente de correlación cruzada es similar a la de otros estudios de transporte de sedimentos, siendo $R^2=0.83$ y $R^2=0.85$ para las ecuaciones (4.40) y (4.41) respectivamente.

Si se comparan las ecuaciones anteriores con las obtenidas para los ensayos de grupos de tallas se puede observar como para los ensayos de poblaciones la dispersión es menor. También se observa como la función de mejor ajuste de esto ensayos es ligeramente diferente a la de los ensayos de tallas (ecuación (4.38)).

Este último resultado confirma nuevamente las diferencias existentes entre la movilización de los grupos de berberechos de tamaño uniforme y los grupos con una distribución similar a la encontrada en el banco marisquero de los Lombos do Ulla. Estas diferencias se pueden atribuir a la "heterogeneidad" del lecho, menor cuando los moluscos se agrupan en una distribución de poblaciones y cuando el reclutamiento es mayor. En estas condiciones es más factible que la estructura del flujo siga el perfil logarítmico de velocidades, y por tanto la dispersión encontrada en la velocidad de fricción sea menor.

4.5. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Aberle, J., Koll, K. y Dittrich, A. (2008). "Form induced stresses over rough gravel-beds." *Acta Geophysica* 56(3): 584-600.
- Amos, C.L., Li, M.Z. y Sutherland, T.F. (1998). "The Contribution of Ballistic Momentum Flux to the Eroison of Cohesive Beds by Flowing Water." *Journal of Coastal Research* 14(2): 564-569.
- Amos, C.L., Sutherland, T.F., Cloutier, D. y Patterson, S. (2000). "Corrasion of a remoulded cohesive bed by saltating littorinid shells." *Continental Shelf Research* 20: 1291-1315.
- Andre, C., Jonsson, P.R. y Lindegarth, M. (1993). "Predation on Settling Bivalve Larvae by Benthic Suspension Feeders - the Role of Hydrodynamics and Larval Behavior." *Marine Ecology-Progress Series* 97(2): 183-192.
- Anta, J., Peña, E., Puertas, J. y Vázquez, V. (2005). *Hydrodynamic analysis of cockles threshold movement using laser technologies (PIV)*. XXXI IAHR Congress, Seoul (South Korea).
- Anta, J. (2006). *Estimación de los parámetros hidrodinámicos que caracterizan el proceso de transporte y sedimentación de los berberechos*. Trabajo de Investigación Tutelado. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. 39 pp.
- Anta, J., Peña, E. y Puertas, J. (2007). "Análisis hidrodinámico del arrastre del berberecho *Cerastoderma edule* de los Lombos do Ulla." *Revista Real Academia Galega das Ciencias* XXVI: 53-90.
- Anta, J., Pena, L., Martín, E., Puertas, J. y Peña, E. (2010). *An experimental study of turbulence characteristivs of flow over a 2D salmonid reed using PIV*. aceptado en: *I European IAHR Congress*. Edimburgh, IAHR
- Armonies, W. (1992). "Migratory rhythms of drifting juvenel molluscs in tidal waters of the wadden Sea." *Marine Ecology Progress Series* 83: 197-206.
- Armonies, W. y Hellwig-Armonies, M. (1992). "Passive settlement of *Macoma balthica* spat on tidal flats of the Wadden Sea and subsequent migration of juveniles." *Netherlands Journal of Sea Research* 29(4): 371-378.
- Armonies, W. y Hartke, D. (1995). "Floating of mud snails *Hydrobia ulvae* in tidal waters of the Wadden Sea, and its implications in distribution patterns." *Helgoländer Meeresunters* 49: 529-538.
- Armonies, W. (1996). "Changes in distribution patterns of 0-group bivalves in the Wadden Sea: Byssus-drifting releases juveniles from the constraints of hydrography." *Journal of Sea Research* 35(4): 323-334.
- Armonies, W. (2000). "On the spatial scale needed for benthos community monitoring in the coastal North Sea." *Journal of Sea Research* 43(2): 121-133.
- ASTM (1987). *ASTM D 2974. Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils*. ASTM. D 2974
- Baggerman, B. (1953). "Spatfall and transport of *Cardium edule*." *L. Archs. nérl. Zool.* 10: 315-342.
- Bartlett, M.S. (1947). "The Use of Transformations " *Biometrics* 3(1): 39-52.
- Beukema, J.j. y de Vlas, J. (1989). "Tidal-current transport of thread-drifting postlarval juveniles of the bivalve *Macoma balthica* from the Wadden Sea to the North Sea." *Marine Ecology Progress Series* 52: 193-200.

- Bigillon, F., Niño, Y. y García, M.H. (2006). "Measurements of turbulence characteristics in an open-channel flow over transitionally rough-bed using particle image velocimetry." *Experiments in Fluids* 41: 857-867.
- Bouma, H., Duicker, J.M.C., Vries, P.P., Herman, P.M.J. y Wolff, W.J. (2001). "Spatial pattern of early recruitment of *Macoma balthica* (L.) and *Cerastoderma Edule*(L.) in relation to sediment dynamics on a highly dynamic intertidal sandflat." *Journal of Sea Research* 45: 79-93.
- Box, J.F. (1987). "Guinnes, Gosset, Fisher, and small samples." *Statistical Science* 2(1): 45-52.
- Buffington, J.M. y Montgomery, D.R. (1997). "A Systematic Analysis of Eight Decades of Incipient Motion Studies, With Special Reference to Gravel-Bedded Rivers." *Water Resources and Research* 33(8): 1993-2029.
- Butman, C.A. (1987). "Larval settlement of soft-sediment invertebrates: the spatial scales of pattern explained by active habitat and the emerging role of hydrodynamical processes." *Oceanographic and Marine Biology. Annual Review* 25: 113-165.
- Butman, C.A. (1990). "Sediment-trap experiments on the importance of hydrodynamical processes in distributing settling invertebrate larvae in near-bottom waters." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 134(1): 37-88.
- Butman, C.A., Frechette, M., Geyer, W.R. y Starczak, V.R. (1994). "Flume experiments on food supply to the blue mussel *Mytilus edulis* L. as a function of boundary-layer flow." *Limnology and Oceanography* 39(7): 1755-1768.
- Cameron, S.M., Nikora, V. y Coleman, S. (2008). "Double-averaged velocity and stress distributions for hydraulically-smooth and transitionally-rough turbulent-flows." *Acta Geophysica* 56(3): 642-653.
- Casteleiro, M., Colominas, I., Navarrina, F., Cueto-Felgueroso, L., Gómez, H., GFe, J. y Soage, A. (2006). *A Mathematical and Numerical Model for the Transport of Salinity in High Environmental Value Estuaries. International Conference on Mathematical and Statistical Modeling in Honor of Enrique Castillo*
- Cea, L. (2005). *An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: Numerical solver and experimental validation. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. A Coruña, Universidade da Coruña. PhD Dissertation: 248 págs.*
- Cea, L., Puertas, J. y Pena, L. (2007). "Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV." *Experiments in Fluids* 42: 333-348.
- Cea, L., Bermúdez, M. y Puertas, J. (2009). *Modelo de calidad de aguas bidimensional para flujos poco profundos en lámina libre. Aplicación a la desembocadura del río Ulla. Jornadas de Ingeniería del Agua. C.-. IAHR. Madrid, CEDEX - IAHR*
- Cea, L., Anta, J., Puertas, J. y Peña, E. (2010). *Implementation of a cockle habitat model in a two-dimensional shallow water model: application to a shallow estuary. aceptado en: I European IAHR Congress. Edimburgh, IAHR*
- Cochran, W.G. (1941). "The distribution of the largest of a set of estimated variances as a fraction of their total." *The Annals of Eugenics* 11: 47-52.
- Cochran, W.G. y Cox, G.M. (1957). *Experimental Designs*. New York, John Wiley & Sons
- Coleman, S., Nikora, V., McLean, S., Clunie, R.M. y Melville, B.W. (2007a). "Subelement form-drag parametrization in rough-bed flows." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(2): 121-129.
- Coleman, S., Nikora, V., McLean, S. y Schlicke, E. (2007b). "Spatially averaged turbulent flow over square ribs." *Journal of Engineering Mechanics* 133(2): 194-204.

- Commito, J.A., Thrush, S.F., Pridmore, R.D., Hewitt, J.E. y Cummings, V.J. (1995). "Dispersal dynamics in a wind-driven benthic system." *Limnology and Oceanography* 40(8): 1513-1518.
- Crimaldi, J.P., Thompson, J.K., Rosman, J.H., Lowe, R.J. y Koseff, J.R. (2002). "Hydrodynamics of larval settlement: The influence of turbulent stress events at potential recruitment sites." *Limnology and Oceanography* 47(4): 1137-1151.
- Day, R.W. y Quinn, G.P. (1989). "Comparisons of Treatments After an Analysis of Variance." *Ecological Monographs* 59(4): 433-463.
- de Montaudouin, X. y Bachelet, B. (1996). "Experimental evidence of complex interactions between biotic and abiotic factors in dynamics of an intertidal population of the bivalve *Cerastoderma Edule*." *Oceanologica Acta* 19(3-4): 449-463.
- de Montaudouin, X. (1997). "Potential of bivalves' secondary settlement differs with species: a comparison between cockle (*Cerastoderma edule*) and clam (*Ruditapes philippinarum*) juvenel resuspension." *Marine Biology* 128: 639-648.
- de Montaudouin, X., Bachelet, B. y Sauriau, P.-G. (2003). "Secondary settlement of cockles *Cerastoderma edule* as a function of current velocity and substratum: a flume study with benthic juveniles." *Hydrobiologia* 203: 103-116.
- Detert, M. (2008). *Hydrodynamic Processes at the water-sediment interface of streambeds. Civil Engineering, Geo- and Environmental Science*, University Fridericiana. PhD Disertation: 139 págs.
- Eckman, J.E. (1996). "Closing the larval loop: linking larval ecology to the population dynamics of marine benthic invertebrates." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 200: 207-237.
- Ertman, S.C. y Jumars, P.A. (1988). "Effects of bivalve siphonal currents on the settlement of inert particles and larvae " *Journal of Marine Research* 46(4): 797-813.
- Fincham, A. y Delerce, G. (2000). "Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithms." *Experiments in Fluids Suppl*: 13-22.
- Fisher, R.A. (1935). *The Design of Experiments*. Edimburg, Olivier & Boyd
- Fismare (2008). *Eventos relacionados con las condiciones oceanográficas en los bancos marisqueros del fondo de la ría de Arosa*. Fismare. Innovación para la Sostenibilidad.
- Frechette, M., Butman, C.A. y Geyer, W.R. (1989). "The importance of boundary-layer flows in supplying phytoplankton to the benthic suspension feeder, *Mytilus edulis* L." *Limnology & Oceanography* 34(1): 19-36.
- García, B., Pallas, A. y Pan, M. (2002). *Reclutamiento, uso del hábitat y estructura de comunidades bentónicas costeras de crustáceos decápodos*. Trabajo de Investigación Tutelado. Programa de Doctorado de Biología Marina y Acuicultura.
- García, C.M., Cantero, M.I., Niño, Y. y García, M.H. (2005). "Turbulence measurements with acoustic doppler velocimeters." *Journal of Hydraulic Engineering* 131(12): 1062-1073.
- García, M.H. (2006). *Lecture Notes on Sediment Transport*. University of Illinois at Urbana-Champaign. 192.
- Giménez-Curto, L.A. y Corniero-Lera, M.A. (1996). "Oscillating turbulent flow over very rough surfaces." *Journal of Geophysical Research C: Oceans* 101(C9): 745-758.
- González, R. y Pérez, A. (1984a). *El Berberecho Cerastoderma Edule (L.), de Carril (Ría de Arousa) I: reproducción y estado de condición. IV Simposio Ibérico de Estudios do Benthos Mariño*. Lisboa (Portugal): 209-222 págs.
- González, R. y Pérez, A. (1984b). *El Berberecho Cerastoderma Edule (L.), de Carril (Ría de Arousa) II: Reclutamiento, mortalidad natural y producción. IV Simposio Ibérico de Estudios do Benthos Mariño*. Lisboa (Portugal): 223-243 págs.

- González, R.C., Woods, R.E. y Eddins, S.L. (2009). *Digital Image Processing Using Matlab*. Gatesmark Publishing
- Gross, T.F., Werner, F.E. y Eckman, J.E. (1992). "Numerical modeling of larval settlement in turbulent bottom boundary layers." *Journal of Marine Research* 50(4): 611-642.
- Hadfiel, M.G. y Koehl, M.A.R. (2004). "Rapid Behavioral Responses of an Invertebrate Larva to Dissolved Settlement Cue." *Biological Bulletin* 207: 28-43.
- Hadfiel, M.G., Faucci, A. y Koehl, M.A.R. (2006). "Measuring recruitment of minute larvae in a complex field environment: The corallivorous nudibranch *Phestilla sibogae* (Bergh)." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 338: 57-72.
- Hannan, C.A. (1984). "Planktonic larvae may act like passive particles in turbulent near-bottom flows." *Limnology and Oceanography* 29: 1108-1116.
- Hendriks, I.E. (2004). *Flow dependent processes in settlement of intertidal bivalve larvae. The Department of Ecosystem Studies*. Yerseke, University of Groningen. PhD: 146 págs.
- Hendriks, I.E., van Duren, L.A. y Herman, P.M.J. (2006). "Turbulence levels in a flume compared to the field: Implications for larval settlement studies." *Journal of Sea Research* 55(1): 15-29.
- Hiddink, J.G., Kock, R.P. y Wolff, W.J. (2002). "Active pelagic migrations of the bivalve *Macoma balthica* are dangerous." *Marine Biology* 140: 1149-1156.
- Hoan, N.T. (2008). *Stone stability under non-uniform flow*, TU Delft. PhD Degree: 114 págs.
- Hunt, H.L. y Mullineaux, L.S. (2002). "The roles of predation and postlarval transport in recruitment of the soft shell clam (*Mya arenaria*)." *Limnology and Oceanography* 47(1): 151-164.
- Hunt, H.L. (2004). "Transport of juvenile clams: effects of species and sediment grain size." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 312(2): 271-284.
- Hunt, H.L., Maltais, M.-J., DFugate, D.C. y Chant, R.J. (2007). "Spatial and temporal variability in juvenile bivalve dispersal: effects of sediment transport and flow regime." *Marine Ecology Progress Series* 352: 145-159.
- Huxham, M. y Richards, M. (2003). "Can postlarval bivalves select sediment type during settlement? A field test with *Macoma balthica* (L.) and *Cerastoderma edule* (L.)" *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 288: 279-293.
- Jiménez, J. (2004). "Turbulent flow over rough walls." *Annual Review of Fluid Mechanics* 36: 173-196.
- Jirka, G. (2008). *Diffusion, dispersion and transport processes: phenomenological description*. T. Lecture Notes. Int. Summer School. Complex Flows, Morphodynamics and Ecology in Rivers. Delft, TU, Delft
- Jonsson, P.R., André, C. y Lindegarth, M. (1991). "Swimming behaviour of marine bivalve larvae in a flume boundary layer flow." *Marine Ecology Progress Series* 79: 67-76.
- Jonsson, P.R., Bertsson, K.M. y Larsson, A.I. (2004). "Linking Larval Supply to Recruitment: Flow-Mediated Control of Initial Adhesion of Barnacle Larvae." *Ecology* 85(10): 2850-2859.
- Jonsson, P.R., van Duren, L.A., Amielh, M., Asmus, R., Aspden, R.J., Daunys, D., Friedrichs, M., Friend, P.L., Olivier, F., Pope, N., Precht, E., Sauriau, P.G. y Schaaff, E. (2006). "Making water flow: a comparison of the hydrodynamic characteristics of 12 different benthic biological flumes." *Aquatic Ecology* 40(4): 409-438.
- Julien, P.Y. (1994). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge, Cambridge University Press
- Kironoto, B.A. y Graf, W.H. (1994). "Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy* 106(4): 333-344.

- Koehl, M.A.R. y Reidenbach, M.A. (2007). "Swimming by microscopic organisms in ambient water flow." *Experiments in Fluids* 43: 755-768.
- Koehl, M.A.R., Strother, J.A., Reidenbach, M.A., Koseff, J.R. y Hadfiel, M.G. (2007). "Individual-based model of larval transport to coral reefs in turbulent, wave driven flow: behavioral responses to dissolved settlement inducer." *Marine Ecology Progress Series* 335: 1-18.
- Larsson, A.I. y Jonsson, P.R. (2006). "Barnacle Larvae Actively Select Flow Environments Supporting Post-Settlement Growth and Survival." *Ecology* 87(8): 1960-1966.
- LaVision (2007). *FlowMaster. DaVis 7.2 Product Manual*. LaVision. 205.
- Levitán, D.R. (1995). *The Ecology of Fertilization in Free-Spawning Invertebrates*. en *Ecology of Marine Invertebrate Larvae*. L. McEdward. Boca Raton, CRC Press, Inc.
- Lindegarh, M., Jonsson, P.R. y André, C. (2002). "Physical and numerical modeling of the role of hydrodynamic processes on adult-larval interactions of a suspension-feeding bivalve." *Journal of Marine Research* 60(3): 499-516.
- Lohrman, A., Cabrera, R. y Crauss, N.K. (1994). *Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory use*. Fundamental and Advancements in Hydraulics Measurements and Experimentation, Buffalo, New York, ASCE.
- Lucas, L.V., Koseff, J.R., Cloern, J.E., Monismith, S.G. y Thompson, J.K. (1999). "Processes governing phytoplankton blooms in estuaries. I: The local production-loss balance." *Marine Ecology Progress Series* 187: 1-15.
- Lund, R.E. y Lund, J.R. (1983). "Algorithm AS 190: Probabilities and Upper Quantiles for the Studentized Range " *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 32(2): 204-210.
- Manes, C., Pokrajac, D. y McEwan, I. (2007). "Double-averaged open-channel flows with small relative submergence." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 896-904.
- Mariani, S., Piccari, F. y De Matthaeis, E. (2002). "Shell morphology in *Cerastoderma* spp. (*Bivalvia: Cardiidae*) and its significance for adaptation to tidal and non-tidal coastal habitats." *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 82: 483-490.
- McCardell, G. y O'Donnell, J. (2009). "A novel method for estimating vertical eddy diffusivities using diurnal signals with application to western Long Island Sound." *Journal of Marine Systems* 77: 397-408.
- McNair, J.N., Newbold, J.D. y Hart, D.D. (1997). "Turbulent Transport of Suspended Particles and Dispersing Benthic Organism: How Long to Hit the Bottom?" *Journal of Theoretical Biology* 188: 29-52.
- Mera, I., Anta, J., Peña, E. y Cea, L. (2008). *Análisis del patrón vertical de velocidades en un río meandriforme: Modelización física. Jornadas de Ingeniería del Agua*. IAHR. Madrid
- Mignot, E., Barthelemy, E. y Hurther, D. (2009). "Double-averaging analysis and local flow characterization of near-bed turbulence in gravel-bed channel flows." *Journal of Fluid Mechanics* 618: 279-303.
- Molares, J., Parada, J.M., Navarro-Pérez, E. y Fernandez, A. (2008). "Variabilidad interanual de las ventas de los principales recursos marisqueros de Galicia y su relación con las condiciones ambientales." *Revista Galega dos Recursos Mariños* 2(1): 1-42.
- Morgan, S.G. (1995). *Life and Death in the Plankton: Larval mortality and adaptation*. en *Ecology of Marine Invertebrate Larvae*. L. McEdward. Boca Raton, CRC Press, Inc.
- Muschenheim, D.K., Grant, J. y E.L., M. (1986). "Flumes for benthic ecologists: theory, construction and practice." *Marine Ecology Progress Series* 28: 185-196.

- Navarrina, F., Colominas, I., Casteleiro, M., Cueto-Felgueroso, L., Gomez, H., Fe, J. y Soage, A. (2008). "A numerical model for the transport of salinity in estuaries." *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 56(5): 507-523.
- Nezu, I. y Rodi, W. (1986). "Open-channel flow measurements with a Laser Doppler Anemometer." *Journal of Hydraulic Engineering* 112(5): 335-355.
- Nezu, I. y Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*. Rotterdam, A.A. Balkema
- Nikora, V. y Goring, D.G. (1998). "ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?" *Journal of Hydraulic Engineering* 124(6): 630-634.
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I. y Griffith, G. (2001). "Spatially averaged open-channel flow over rough bed." *Journal of Hydraulic Engineering* 127(2): 123-133.
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D. y Walters, R. (2007). "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 873-883.
- Nikora, V. y Rowinski, P.M. (2008). "Rough-bed flows in geophysical, environmental, and engineering systems: Double-Averaging Approach and its applications." *Acta Geophysica* 56(3): 529-533.
- Nikora, V. (2009). "Hydrodynamics of Aquatic Ecosystems: An interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics." *River Research and Applications*(in press).
- Nowell, A.R.M. y Jumars, P.A. (1984). "Flow Environments of Aquatic Benthos." *Annual Review of Ecology and Systematics* 15: 303-328.
- Nowell, A.R.M. y Jumars, P.A. (1987). "Flumes: Theoretical and Experimental Considerations for Simulation of Benthic Environments." *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 25: 91-112.
- Olivera, A.M. y Wood, W.L. (1997). "Hydrodynamics of bivalve shell entrainment and transport." *Journal of Sedimentary Research* 67(3): 514-526.
- Olivier, F. y Retière, C. (2006). "How to leave or stay on the substratum when you can't swim? Evidence of the role of mucus thread secretion by postlarvae of *Pectinaria koreni* (Malmgren) in still water and flume experiments." *Aquatic Ecology* 40(4): 503-519.
- Parada, J.M., Molares, J., Sánchez-Mata, A., Martínez, G., Darriba, C. y Mariño, J. (2006). "Plan de actuación para la recuperación del banco "Lombos do Ulla": Campañas marisqueras desde 2002 a 2005." *Revista Galega dos Recursos Mariños* 1(1): 1-37.
- Parada, J.M., Molares, J. y Otero, X. (2007). *Episodios de mortalidad en el banco marisquero "Lombos do Ulla" (Ría de Arousa - NO de España) deducidos a partir de datos meteorológicos de los últimos 45 años. XI Congreso Nacional de Acuicultura*. Vigo: 943-946 págs.
- Parada, J.M. y Molares, J. (2008). "Natural mortality of the cockle *Cerastoderma edule* (L.) from the Ria of Arousa (NW Spain) intertidal zone." *Revista de Biología Marina Y Oceanografía* 43(3): 501-511.
- Parker, G. (1989). "Surface-Based Bedload Transport Relation for Gravel Rivers." *Journal of Hydraulic Research*.
- Peña, E. (2002). *Estudio numérico-experimental del transporte de sedimentos en cauces aluviales. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente*. A Coruña, University of A Coruña. PhD Dissertation
- Peña, E., Anta, J., Puertas, J. y Teijeiro, T. (2008). "Estimation of Drag Coefficient and Settling Velocity of the Cockle *Cerastoderma edule* Using Particle Image Velocimetry." *Journal of Coastal Research* 24 (4C): 150-158.

- Pérez, C. (2004). *Técnicas de Análisis Multivariante de Datos. Aplicaciones con SPSS*. Madrid, Pearson. Prentice Hall
- Petersen, C.G.J. (1918). "The sea bottom and its production of fish food, A survey of the work done in connection with valuation of the Danish waters from 1883-197." Rep. Danish. Biological Stat. 25: 1-61.
- Pokrajac, D., Finnigan, J.J., Manes, C., McEwan, I. y Nikora, V. (2006). *On the definition of the shear velocity in rough bed open channel flows. River Flow 2006*. Ferreira, Alves, Leal y Cardoso. Porto, Taylor & Francis Group: 89-98 págs.
- Pokrajac, D., Campbell, L., Nikora, V., Manes, C. y McEwan, I. (2007). "Quadrant analysis of persistent spatial velocity perturbations over square-bar roughness." *Experiments in Fluids* 2007(42): 413-423.
- Pokrajac, D., McEwan, I. y Nikora, V. (2008). "Spatially averaged turbulent stress and its partitioning." *Experiments in Fluids* 45: 73-83.
- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. y Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry. A practical guide*. Berlin, Springer. 448 págs.
- Rodríguez, J.F. y García, M.H. (2008). "Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed." *Journal of Hydraulic Research* 46(4): 454-465.
- Roegner, C., André, C., Lindegarth, M., Eckman, J.E. y Grant, J. (1995). "Transport of recently settled soft-shell clams (*Mya arenaria* L.) in laboratory flume flow." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 187: 13-26.
- Roussinova, V., Biswas, N. y Bachalandar, R. (2008). "Revisiting turbulence in smooth uniform open channel flow." *Journal of Hydraulic Research* 46(Extra Issue 1): 36-48.
- Sahai, H. y Ageel, M.I. (2000). *The Analysis of Variance. Fixed, Random and Mixed Models*. Boston, Birkhäuser
- Sánchez-Mata, A., Molaes, J., Parada, J.M. y Martínez, G. (2006). *Changes in salinity and current speed induce cockle (*Cerastoderma edule*, L.) transport in lombos do Ulla Estuary. XIV SIEBM. Simposio Ibérico de Estudios de Biología Marina*. Barcelona (España): 185-186 págs.
- Santos, I.S. (2001). *El Berberecho (*Cerastoderma Edule*) en la costa gallega*. Centro de Investigaciones Mariñas. 15.
- Scarano, F. (2002). "Iterative image deformation methods in PIV." *Measurement Science and Technology* 13: R1-R19.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory*. New York, McGraw Hill
- Shields, A. (1936). "Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der turbulenforchung auf die Geschiebebewegung (Applications of similarity principles and turbulence research to bed-load movement)." *Mitteilungen der Prussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau and Schiffbau*, Berlin.
- Sidgursson, J.B., Titman, C.W. y Davies, P.A. (1976). "The dispersal of young post-larval bivalve molluscs by byssus threads." *Nature* 262: 386-387.
- Snedecor, G.W. y Cochran, W.G. (1989). *Statistical Methods*. Ames, Iowa, Iowa State University Press
- Snelgrove, P.V.R. y Butman, C.A. (1994). "Animal-Sediment Relationships Revisited: Cause versus effects." *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 32: 11-177.
- Snelgrove, P.V.R., Grassle, J.P. y Butman, C.A. (1998). "Sediment choice by settling larvae of the bivalve, *Spisula solidissima* (Dillwyn), in flow and still water." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 231(2): 171-190.

- Snelgrove, P.V.R., Grassee, J.P., Grassle, J.F., Petrecca, R.F. y Hongguang, M. (1999). "*In situ habitat selection by settling larvae of marine soft-sediment invertebrates.*" *Limnology and Oceanography* 44(5): 1341-1347.
- Soldati, A. (2004). "*Particles turbulence interactions in boundary layers.*" *Z. Angew. Math. Mech.* 85(10): 683-699.
- Song, T. (1994). *Velocity and turbulence intensities distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow.* Laussane, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. PhD Degré
- Souto, M., Saavedra, M., Pousão-Ferreira, P. y Herrero, C. (2008). "*Riboflavin enrichment throughout the food chain from the marine microalga *Tetraselmis suecica* to the rotifer *Brachionus plicatilis* and to White Sea Bream (*Diplodus sargus*) and Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata*) larvae.*" *Aquaculture* 283: 128-133.
- SPSS (2007). *SPSS Advanced Models™ 16.0.* SPSS Inc. 151 pag págs.
- St-Onge, P. y Miron, G. (2007). "*Effects of current speed, shell length and type of sediment on the erosion and transport of juvenile softshell clams (*Mya arenaria*).*" *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 349(1): 12-26.
- Stanislas, M., Okamoto, K., Kähler, C.J., Westerweel, J. y Scarano, F. (2008). "*Main results of the third international PIV challenge.*" *Experiments in Fluids* 47: 27-71.
- Statzner, B., Gore, J.A. y Resh, V.H. (1988). "*Hydraulic stream ecology: observed patterns and potential applications.*" *Journal of the North American Benthological Society* 7: 307-360.
- Swamee, P.K. y Ojha, C.S. (1989). "*Drag Coeficcient and Fall Velocity of Nonspherical Particles.*" *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 117(13): 660-667.
- Thompson, C.E.L. y Amos, C.L. (2002). "*The impact of mobile disarticulated shells of *Cerastoderma edulis* on the abrasion of a cohesive substrate.*" *Estuaries* 25(2): 204-214.
- Todd, C.D. (1998). "*Larval supply and recruitment of benthic invertebrates: Do larvae always disperse as much as we believe?*" *Hydrobiologia* 375-376: 1-21.
- Tyler-Walters, H. (2007). "*Cerastoderma edule. Common cockle. Marine Life Information Network: Biology and Sensitivity Key Information Sub-programme [on-line].*" Plymouth: Marine Biological Association of the United Kingdom. Retrieved 02/2009, from <<http://www.marlin.ac.uk/species/Cerastodermaedule.htm>>.
- Underwood, A.J. (1981). "*Techniques of analysis of variance in experimental marine biology and ecology.*" *Oceanographic and Marine Biological. Annual Review* 19: 513-605.
- Underwood, A.J. (1997). *Experiments in Ecology. Their logical design and interpretaion using analysis of variance.* Cambridge, Cambridge University Press
- UNE (1998). *UNE-EN 933-1. Ensayos para la determinación de las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas.* UNE-EN. 933-1
- UNESCO (1981). *The Practical Salinity Scale of 1978 and the international equation on the state of seawater of 1980 UNESCO Technical Papers in Marine Science* Technical Papers in Marine Science, 25.
- van Duren, L.A., Herman, P.M.J., Sandee, A.J.J. y Heip, C.H.R. (2006). "*Effects of mussel filtering activity on boundary layer structure.*" *Journal of Sea Research* 55(1): 3-14.
- van Duren, L.A. (2008). *Turbulent exchange in the benthic boundary layer: When does behaviour matter? Lecture Notes. Int. Summer School. Turbulence, Plankton and Marine Snow*
- van Rijn, L. (2008). *Sediment transport: Revelance, "classical" modeling, cohesive transport and numerical implementation.* T. Lecture Notes. Int. Summer School. Complex Flows, Morphodynamics and Ecology in Rivers. Delft, TU, Delft

- Vilas, F., Bernabeu, A.M. y Méndez, G. (2005). "*Sediment distribution pattern in the Rias Baixas (NW Spain): main facies and hydrodynamic dependence.*" *Journal of Marine Systems* 54: 261-276.
- Wang, X., Wang, Z.Y., Yu, M. y Li, D. (2001). "*Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-law and wake-law.*" *Journal of Hydraulic Research* 39(2): 211-217.
- Weiss (1970). "*The solubility of Nitrogen, oxygen and argon in water and seawater.*" *Deep Sea Research* 17(4): 721-735.
- Westerweel, J. (1994). "*Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data.*" *Experiments in Fluids* 16: 236-247.
- Westerweel, J. y Scarano, F. (2005). "*Universal outlier detection for PIV data.*" *Experiments in Fluids* 39: 1096-1100.
- Wilson, W.H. (1991). "*Competition and predation in marine soft-sediment communities.*" *Annual Review of Ecology and Systematics* 21(1): 221-241.
- Willert, C. (2007). *Vector Field Operators for PIV. Lecture Notes. Application of Particle Image Velocimetry. Theory and Practice.* Göttingen, DLR
- Winer, B.J., Brown, D.R. y Michaels, K.M. (1991). *Statistical principles in experimental design.* M.-H. s. i. psychology, McGraw-Hill: 1072 págs.
- Wong, M.G. y Parker, G. (2006). "*Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Muller using their own database.*" *Journal of Hydraulic Engineering* 132(11): 1159-1168.
- Yang, S.-Q., Tan, S.-K. y Lim, S.-Y. (2004). "*Velocity distribution and dip-phenomenon in smooth uniform open-channel flows.*" *Journal of Hydraulic Engineering* 130(12): 1179-1186.
- Yang, S.-Q. (2005). "*Interaction of boundary shear stress, secondary currents and velocity.*" *Fluid Dynamics Research* 36: 121-136.
- Yankson, K. (1986). "*Observation on byssus systems in the spat of Cerastoderma Glaucum and C. Edule.*" *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 66: 277-292.

C05

**SÍNTESIS DE RESULTADOS Y
CONCLUSIONES**

5. SINTÉISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La hidrodinámica del flujo juega un papel muy importante en la mayoría de los procesos físicos que se desarrollan en ríos, lagos y aguas de transición, y en el entorno marino en general. Además, la estructura y funcionalidad de las comunidades biológicas en estos ecosistemas acuáticos está fuertemente ligada y controlada por las relaciones que surgen entre los procesos físicos, químicos y biológicos (ver p.ej. Nikora, 2009).

Con objeto de mejorar la gestión y el conocimiento de los ecosistemas acuáticos han surgido nuevas áreas de la hidráulica y de la mecánica de fluidos con diversos nombres como ecohidráulica, ecohidrología o hidráulica ambiental. Estas nuevas disciplinas cubren un amplio rango de escalas y de ecosistemas terrestres y acuáticos, en ríos, lagos y estuarios, y representan un buen ejemplo de la aproximación multidisciplinar de la ciencia moderna.

Un ejemplo aplicado de la interacción de la hidrodinámica en los ecosistemas acuáticos se puede encontrar en la desembocadura del río Ulla, en la ría de Arousa (Galicia). En el banco marisquero de los Lombos do Ulla (Figura 5.1) se han registrado importantes episodios de mortandad del molusco *Cerastoderma edule*, asociados a fuertes descenso de salinidad y al arrastre de los stocks de este berberecho, provocados por los episodios de precipitaciones y crecidas del río (ver p.ej. Parada *et al.*, 2007; Parada y Molares, 2008).

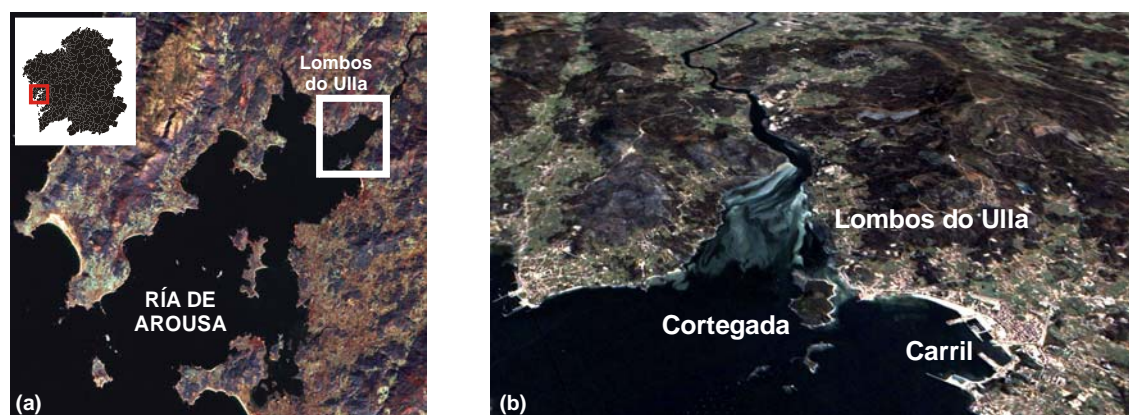


Figura 5.1. (a) Fotografía satélite de la Ría de Arousa y su situación en Galicia y (b) perspectiva del banco marisquero de los Lombos do Ulla (Fuente:VideaLab).

La repercusión de estos eventos en la economía de muchas villas gallegas, como la de Carril situada a escasos kilómetros de la desembocadura, es muy importante. Así, las actividades de marisquero proporcionan empleo directo en Galicia a más 10000 personas que extraen entre 6000 y 12000 toneladas anuales de marisco. Una de las principales especies extraídas es el *C. edule*, con un porcentaje cercano al 50% de todas las extracciones de bivalvos. Este porcentaje representa el 24% del importe de las ventas de moluscos en este periodo, que ascienden en total a unos 70 millones de euros anuales para el periodo comprendido entre 2004-2008 (datos de la Plataforma Tecnológica de Pesca, www.pescadegalicia.com).

La elevada mortalidad de los berberechos en la desembocadura del Ulla es un problema complejo. Existen varios informes internos de la Consellería de Pesca y Asuntos Marítimos, del

gobierno autonómico, y varios trabajos dirigidos por J. Molares y J. M. Parada del Centro de Investigaciones Mariñas (CIMA), que relacionan la mortalidad con los episodios de lluvias extremas y los grandes caudales en el río Ulla.

Motivados por este fenómeno, el Grupo de Enxeñaría do Agua e do Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidade da Coruña (UDC) comenzó a trabajar en el análisis del arrastre de los berberechos de esta zona de Galicia. Los estudios preliminares, realizados con berberechos muertos aislados colocados sobre un lecho de arena de la zona ya han sido publicados y se pueden consultar en el Apéndice 1 de esta Tesis Doctoral (Anta *et al.*, 2007; Peña *et al.*, 2008).

Los trabajos presentados aquí continúan esta línea de investigación y forman parte del Proyecto de Investigación “*Afecciones a la fauna de las aguas de transición por las variaciones de caudal originadas por las centrales hidroeléctricas de punta*”, financiado por la Secretaría General e Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, y desarrollado por el área de Ingeniería Hidráulica del GEAMA en consorcio con la empresa SOCOIN, SL.

En esta Tesis Doctoral se ha realizado un estudio hidrodinámico en laboratorio sobre el arrastre de varios grupos de berberechos adultos, con diferentes reclutamientos y tamaños. Para la realización de los experimentos, se ha construido en las instalaciones del Centro de Investigación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC) de la UDC, un canal de recirculación en forma de circuito de carreras. Para la determinación de los campos de velocidades se ha empleado la tecnología Particle Image Velocimetry que permite obtener los campos instantáneos de velocidad así como la posición del lecho cubierto con berberechos.

El principal objetivo de la investigación es mejorar el conocimiento del fenómeno de arrastre de los stocks de berberechos adultos. Aunque en la literatura existen numerosos trabajos sobre la influencia de la hidrodinámica en los procesos de dispersión de los individuos más pequeños (larvas y juveniles, de tamaño inferior a los ~10 mm), prácticamente no existen referencias sobre poblaciones adultas. Además, en las conversaciones mantenidas con los técnicos del CIMA, no se manifestó la existencia de problemas con la movilización de los moluscos más pequeños en el banco marisquero.

Desde un punto de vista hidráulico, el flujo sobre los berberechos es un flujo de tipo rugoso sobre un lecho irregular y heterogéneo espacialmente. Para poder describir los parámetros hidrodinámicos en estas condiciones de contorno se ha empleado la metodología del doble promediado, de reciente aplicación en el ámbito de la ingeniería hidráulica.

Para el análisis de los factores que afectan al arrastre se han empleado técnicas estadísticas habituales en los trabajos de ecología y biología marina, como el Análisis de la Varianza, ANOVA. Una descripción de las hipótesis de este método y el desarrollo general del modelo se recoge en el Apéndice 2 de esta Tesis Doctoral. La movilización de los bivalvos también se ha descrito a través del ajuste de funciones de transporte de fondo como las utilizadas en los trabajos de transporte de gravas y en encauzamientos en obras de ingeniería fluvial.

A continuación se recoge una síntesis y discusión de los principales resultados de este estudio. Además de los resultados meramente experimentales, se ha considerado interesante incluir en la síntesis las principales contribuciones del estado del conocimiento que han jugado un papel determinante en la determinación de la metodología y en el enfoque del trabajo. Por último se presentarán en los apartados 5.3 y 5.4, las principales conclusiones extraídas y algunas recomendaciones y líneas de trabajo futuras.

5.2. SINTÉISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.2.1. Ecuaciones fundamentales y metodología del doble promediado

Para la determinación de los principales parámetros hidrodinámicos de un flujo, ya sea en modelo físico o en un entorno natural, es habitual recurrir a las ecuaciones del movimiento de Navier-Stokes promediadas en el tiempo o ecuaciones RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes equations*). Su publicación facilitó un creciente desarrollo de la mecánica de los fluidos, y en particular, de los flujos turbulentos.

Sin embargo, en muchas ocasiones estas ecuaciones no son del todo prácticas porque el movimiento del fluido se realiza sobre, y en ocasiones a través, de contornos que presentan muchas irregularidades. Estas irregularidades favorecen la aparición de flujos altamente tridimensionales y heterogéneos cerca del lecho. Para resolver este problema y facilitar el análisis de este tipo de flujos hidráulicamente rugosos, se ha aplicado un nuevo procedimiento que combina el promediado temporal de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promediado espacial de las mismas.

Esta metodología del doble promediado, *Double Averaged Methodology* o DAM, se desarrolló inicialmente para problemas de flujo multifásico (Whitaker, 1999), flujos en medios porosos (Pedras y de Lemos, 2001) y para estudiar las corrientes de aire que circulan sobre y a través de vegetación terrestre (Rapauch y Shaw, 1982; Finnigan, 2000).

En el ámbito de la ingeniería hidráulica su aplicación es más reciente, pero el número de publicaciones en los últimos 3 o 4 años está creciendo de un modo muy notable (ver p.ej. el número especial del Acta Geophysica, Nikora y Rowinski, 2008). Los fundamentos del procedimiento del doble promediado se pueden consultar en el Capítulo 2 y en las referencias allí citadas (p.ej. Nikora *et al.*, 2007a; Nikora, 2008).

Las nuevas ecuaciones que surgen de aplicar esta metodología, a veces denominadas *DANS* o *Double Averaged Navier Stokes equations*, contienen nuevos términos como tensiones o flujos de cantidad de movimiento inducidos por las formas, también denominados dispersivos. Además, para el flujo que se produce entre las rugosidades del lecho, aparecen términos de arrastre viscoso y de forma (ver ecuaciones (2.25) y (2.26) en el Capítulo 2).

Para el desarrollo de este procedimiento habitualmente se realiza en primer lugar una media temporal de las variables hidrodinámicas, y a continuación un promedio espacial en planos o paralelepípedos paralelos al lecho (Figura 5.2). De este modo, además de las variables medias temporales y su fluctuación (p.ej. $\theta = \bar{\theta} + \theta'$) aparecen nuevos términos como las variables promediadas espacialmente así como a las fluctuaciones espaciales de las mismas (p.ej. $\bar{\theta} = \langle \bar{\theta} \rangle + \tilde{\theta}$). Además de la información espacial de las variables hidrodinámicas, las ecuaciones *DANS* contienen información sobre la estructura del lecho. Esta información se expresa con una función de porosidad o rugosidad del lecho ϕ , que no es más que la función de distribución de probabilidad acumulada de las posiciones de las crestas del fondo.

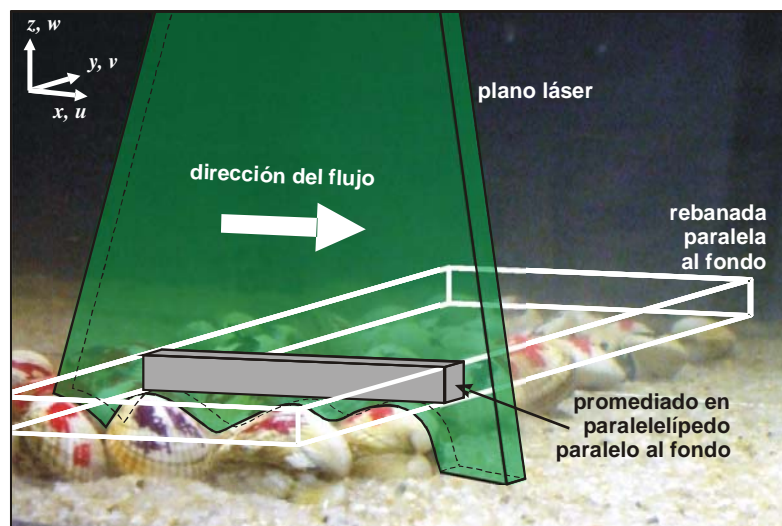


Figura 5.2. Esquema del procedimiento del doble promediado aplicado en los ensayos de arrastre de berberechos con la tecnología PIV.

Como esta metodología es relativamente reciente, en el momento de redactar esta tesis, la definición y comprensión de los nuevos términos que surgen de esta metodología es un reto para la comunidad científica. Sin embargo, en la literatura, y también en este texto, se pueden encontrar un número creciente de trabajos que comienzan a asentar conocimientos sobre la estructura espacial de las velocidades y los esfuerzos de corte producidos sobre lechos rugosos, sobre los esfuerzos dispersivos y demás distribuciones de forma, como las intensidades turbulentas.

Otros aspectos revisados relacionados con el desarrollo experimental son la formación y desarrollo de las corrientes secundarias, y como éstas afectan a la estructura vertical del flujo, modificando las distribuciones de velocidades y tensiones de corte características de los flujos 2D uniformes. En un segundo bloque de análisis, en los apartados 2.3 y 2.4, se ha descrito la aparición de este fenómeno en canales estrechos (p.ej. con ratios ancho:calado $B/H < 5$) y también en planos alejados de la sección longitudinal central del flujo.

En la revisión realizada, se ha puesto de manifiesto como la formación las corrientes secundarias modifica la forma del perfil de velocidades, produciendo un descenso del punto donde se produce la velocidad máxima del flujo (*velocity dip*). También se han discutido otros factores que afectan a la distribución de velocidades y tensiones como la no uniformidad del flujo, el transporte de sedimentos o la propia estructura de las rugosidades del lecho.

En lo relativo a la determinación de los esfuerzos de corte, los trabajos consultados confirman que en flujos que no se puedan considerar bidimensionales y uniformes, estos esfuerzos no se corresponden directamente con el valor obtenido de la extrapolación de la ley lineal de tensiones de Reynolds (ver p.ej. Coleman *et al.*, 2007; Detert, 2008). Además, en flujos 2D en canales estrechos, o cerca de las paredes laterales en canales anchos, la distribución de tensiones turbulentas se ve alterada por las corrientes secundarias (Nezu y Nakagawa, 1993).

También se ha revisado la influencia de la rugosidad del lecho en la forma de los perfiles de velocidades y tensiones. Respecto a las velocidades, se puede señalar que la forma, tamaño y distribución de las mismas así como las condiciones de sumergencia relativa del flujo (ratio entre la longitud de la rugosidad característica y el calado Δ/H), son los principales parámetros que determinan la estructura vertical de las mismas (Raupach *et al.*, 1991; Jiménez, 2004).

Así, cuando el lecho tiene grandes rugosidades como cantos o gravas, la formación de estelas y capas de mezcla aguas abajo de las mismas favorece que el flujo se retrase en esta zona. Esta deceleración modifica la forma de la ley de velocidades, que ya no sigue la distribución logarítmica (ver p.ej. Mignot *et al.*, 2009). La destrucción de la estructura logarítmica también se ha constatado en flujos con muy baja sumergencia, donde no existiría calado suficiente para que esta se desarrollase (Manes *et al.*, 2007).

En los flujos rugosos se producen alteraciones en la distribución de tensiones tangenciales de Reynolds $-\rho\langle u'w' \rangle$ y, por efecto del fondo, aparecen esfuerzos de tipo dispersivo o de forma, $-\rho\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$. Como sucedía con las velocidades, la estructura del lecho determina las distribuciones de estos esfuerzos.

En general, el término de tensiones totales también está afectado por los esfuerzos de arrastre de presión de forma y viscosos, la no uniformidad del flujo y por las corrientes secundarias. Una revisión de la importancia de estos efectos en la estructura del flujo se presentará de modo conjunto con los resultados en apartados posteriores.

Otras contribuciones del estado del conocimiento al análisis experimental han sido las diferentes metodologías empleadas habitualmente para determinar la velocidad de fricción, para, a partir de ésta, estimar la tensión tangencial sobre el lecho (§2.4.5). Se ha hecho un especial hincapié en los métodos más habituales: pendiente motriz, ley logarítmica de velocidades y extrapolación de las tensiones de Reynolds hasta el lecho. Por último, en el apartado 2.5, se ha introducido el estudio de la turbulencia y se ha realizado una descripción de los principales estadísticos empleados para su caracterización.

5.2.2. Dinámica de las poblaciones bentónicas

Con objeto de identificar las principales interacciones entre la hidrodinámica y las comunidades bentónicas, como la población de berberechos del banco marisquero de los Lombos del Ulla, en el apartado 4.2 del Capítulo 4 se han descrito las principales etapas del ciclo vital de estos organismos, esquematizados en la Figura 5.3.

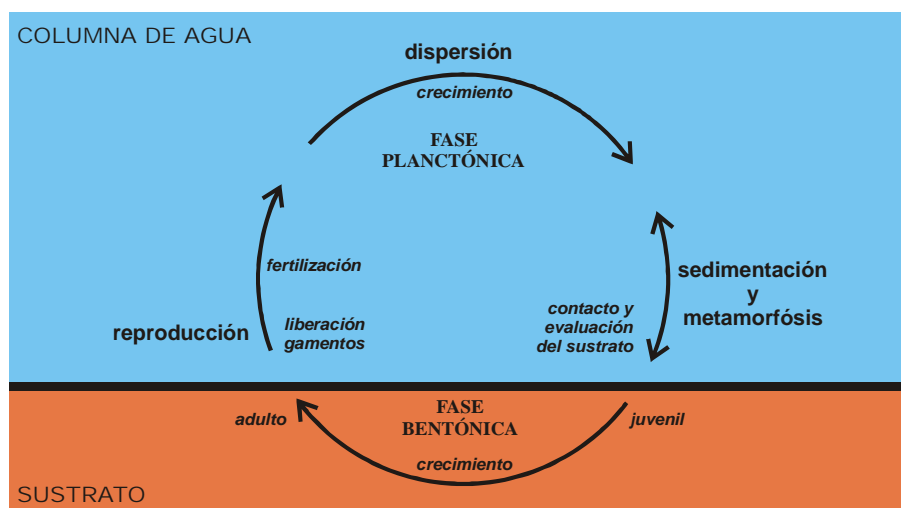


Figura 5.3. Ciclo de vida (idealizado) de un invertebrado marino bentónico con fases planctónica larvaria y bentónica juvenil y adulta (elaboración propia a partir de Eckman, 1996; Hendriks, 2004)

Como otros organismos bentónicos, el *C.edule* comienza su vida en la columna de agua como una larva. Tras esta fase planctónica, las larvas asientan y se fijan al sustrato. Este proceso de *asentamiento primario* se define como el momento en que se produce la transición de la vida planctónica a bentónica. Tras el asentamiento, la larva sufre la metamorfosis a juvenil.

El término de asentamiento primario se emplea en la literatura para diferenciar procesos de los mecanismos de dispersión, o migración vertical en la columna de agua, y posterior *asentamiento secundario* que presentan muchos organismos bentónicos en las fases postlarvares y juveniles.

La dispersión y el asentamiento secundario es un mecanismo complejo. En algunas ocasiones es provocado por episodios meteorológicos o hidrodinámicos extremos, como una crecida o un temporal, pero en otros está favorecido por un proceso *activo* de migración vertical de las postlarvas y juveniles.

En el Capítulo 4 se refleja el debate que existe en la comunidad científica sobre los procesos de selección activa/pasiva y su influencia en la distribución y estructura de las comunidades bentónicas. También se han recogido algunos trabajos relacionados con el estudio de la capacidad de algunos organismos bentónicos de cambiar sus propiedades hidrodinámicas para migrar verticalmente y favorecer su dispersión. Así, las larvas y juveniles de algunos bivalvos y poliquetos pueden incrementar su coeficiente de arrastre favoreciendo así su resuspensión, mediante un filamento generado por su glándula de biso, ver (Sidgursson *et al.*, 1976). Este mecanismo de dispersión por biso - *byssus drifting*- es dependiente del tipo de especie y de la edad del individuo. *En general, para organismos mayores de 5 mm, la generación de biso es poco importante* (ver p.ej. Yankson, 1986; Hiddink *et al.*, 2002; Olivier y Retière, 2006).

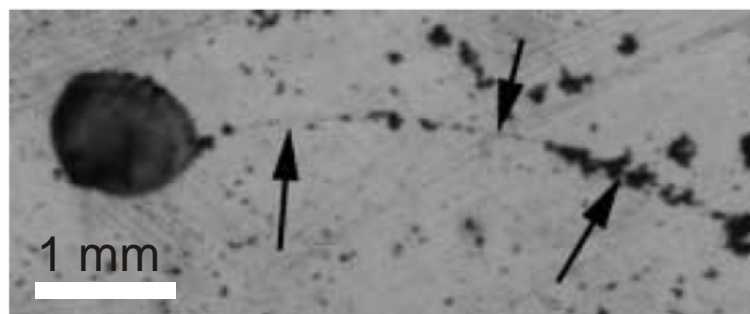


Figura 5.4. Secreción de biso de un juvenil de *Macoma balthica* coloreado con alcano azul (Hiddink *et al.*, 2002).

Para estudiar la hidrodinámica de los ecosistemas acuáticos bentónicos como los bivalvos se han desarrollado numerosos trabajos a escala de laboratorio en canales hidráulicos. Los principales estudios se han focalizado en la interacción entre la hidrodinámica en la fase de sedimentación larvaria, en los mecanismos de selección activa y también, aunque en menor medida, en los procesos de asentamiento secundario y recolocación de adultos y juveniles.

En el texto se ha recogido información sobre los principales centros e instalaciones disponibles a nivel europeo en la red *BioFlow* (Jonsson *et al.*, 2006). Las características más destacables de los canales de esta red son que los flujos son hidráulicamente lisos, con velocidades de fricción entre 0.053-0.015 m/s para una velocidad media de 25 cm/s, y, en varias instalaciones, con corrientes secundarias asociadas al flujo en curva y también a bajas relaciones de aspecto *B/H* (canal estrecho).

Los trabajos de arrastre de conchas y bivalvos jóvenes-adultos recogidos en la literatura analizan este problema desde dos enfoques diferentes. Por un lado, en varios estudios se ha determinado el umbral del movimiento de organismos y conchas individuales a través el coeficiente de arrastre, empleando para ello una parametrización cuadrática de las fuerzas de arrastre y sustentación (Olivera y Wood, 1997; Thompson y Amos, 2002; Peña *et al.*, 2008).

Por otra parte, en otra serie de trabajos se estudia la movilización de los moluscos agrupados en parches con diferente densidad de reclutamiento, estado y tipo de sustrato (Roegner *et al.*, 1995; Hunt, 2004; St-Onge y Miron, 2007). Esta metodología consiste básicamente en determinar el porcentaje de moluscos movilizados, y su relación con la velocidad del flujo o la velocidad de corte, y con los factores anteriormente mencionados.

En algunos trabajos se ha intentado buscar alguna relación entre el arrastre y la tensión de fondo empleando el ábaco de Shields (Olivier y Retière, 2006; Hunt *et al.*, 2007), obteniendo resultados poco alentadores. En la literatura no se han encontrado trabajos que relacionen el transporte de los moluscos adultos con funciones de transporte de fondo como las empleadas en esta Tesis Doctoral.

5.2.3. Materiales y métodos

5.2.3.1. Introducción

En la campaña experimental se han analizado un total de 144 escenarios de movilización de berberechos de tamaños comprendidos entre los ~15 y los ~35 mm bajo 6 velocidades diferentes, dos reclutamientos⁹⁸ (~500 y ~1000 ind/m²) y estados de actividad (con los moluscos vivos y muertos). Los ensayos se han distribuido en dos grandes bloques en función de la distribución de tamaños de los bivalvos. En el primer grupo de ensayos se han empleado berberechos de tamaño uniforme de cuatro tallas: 15-20, 20-25, 25-30 y 30-35 mm. En el segundo grupo se han analizado dos tallas con mezcla de bivalvos de tamaño entre comprendido ente ~15 y ~30 mm.

Tabla 5.1. Resumen de los escenarios analizados en los ensayos de movilización de berberechos realizados en este estudio.

TIPO DE ENSAYO	TAMAÑOS ANALIZADOS	ESTADO DEL BERBERECHO	RECLUTAMIENTO	VELOCIDAD DE LA CORRIENTE
Grupo de tamaños	15 – 20 mm	Vivo	500 ind/m ²	0.29 m/s
	20 – 25 mm			0.32 m/s
	25 – 30 mm			0.35 m/s
	30 – 35 mm			0.39 m/s
Poblaciones estacionales	Población de Otoño	Muerto	1000 ind/m ²	0.44 m/s
	Población de Primavera			0.47 m/s

⁹⁸ En este trabajo se ha definido reclutamiento como el número de berberechos presentes por unidad de superficie de sustrato.

Para cada configuración analizada se han realizado 4 repeticiones en los ensayos de grupos de tamaño y 3 repeticiones para las poblaciones de tamaño variable. En la Tabla 5.1 se presenta un esquema con los escenarios analizados.

En el primer bloque de ensayos, denominado de Grupos de tamaños, los berberechos presentan un tamaño bastante uniforme y se ha ejecutado siguiendo la metodología presentada en otros trabajos de la literatura (ver p.ej. St-Onge y Miron, 2007). El segundo bloque, denominado de Poblaciones estacionales, intenta representar la distribución de tamaños del *C.edule* en los Lombos del Ulla al comienzo y al final de la campaña extractiva de dicho bivalvo (§Figura 4.41). En los experimentos de poblaciones, el grupo más joven de otoño se caracteriza por un diámetro medio de 20.9, y el de primavera por un diámetro medio de 24.3 mm.

Del mismo modo, los reclutamientos empleados también se seleccionaron en base a los datos de la zona de estudio (Parada *et al.*, 2006) y a las conversaciones mantenidas con los técnicos del CIMA de la localidad de Corón, encargados del seguimiento del Plan de Recuperación Ambiental de los Lombos do Ulla. Como se ha comentado anteriormente, la elección de una población de tamaño adulto, también atiende a las reuniones mantenidas con los técnicos del CIMA, que manifestaron el fenómeno de recolocación de los stocks tras fuertes episodios de precipitación. Por este motivo, las velocidades de ensayo también son elevadas, y se encuentran en el orden de magnitud de las registradas experimentalmente y evaluadas numéricamente en los Lombos do Ulla (§4.1).

También hay que señalar que los ensayos con poblaciones estacionales se pueden considerar innovadores ya que, desde nuestro conocimiento, únicamente se habían analizado hasta el momento el arrastre de poblaciones con tamaños más o menos uniformes.

5.2.3.2. Instalaciones e Instrumentación

Los experimentos se han realizado en una canal de recirculación en forma de circuito de carreras de acero inoxidable. Para su construcción se han seguido las recomendaciones recogidas en la literatura sobre el diseño de canales para el estudio del bentos marino (Nowell y Jumars, 1984; Nowell y Jumars, 1987) y también se han contemplado las características de otras instalaciones similares (Jonsson *et al.*, 2006).

La zona de análisis dispone de unas ventanas de plexiglás transparente para facilitar la realización de los experimentos y para poder emplear técnicas de visualización de flujo. En la Figura 5.5 (a) se presenta un esquema del canal de ensayo con sus dimensiones geométricas más importantes. Para producir el movimiento del agua se han empleado un sistema de discos que giran solidariamente con un eje propulsado por un motor. En la realización de los ensayos se han empleado dos motores diferentes, uno para las velocidades más bajas (que denominaremos V01, V02 y V03) y otro más potente para las velocidades de ensayo más altas (V04 a V06). Se han necesitado dos motores porque con el primero, las velocidades medias del flujo se consideraron insuficientes⁹⁹.

El canal está provisto en la zona de ensayo de una caja de 70 x 40 x 10 cm, que se llenó con arena de la desembocadura del Ulla con un diámetro medio 0.98 mm y un $d_{50}=1.42$ mm. El canal se llenó con agua de mar bruta filtrada (~200 μ m) hasta una altura de ~15 cm). La

⁹⁹ Al tratarse de un canal construido inicialmente para este trabajo en el proceso de diseño se han desarrollado varias fases de prueba y error.

relación de aspecto ancho-calado B/H es de ~ 3.33 , similar a la de otros estudios de arrastre de organismos bénticos a escala de laboratorio (ver p.ej. la Tabla 4.6). En estas condiciones, el flujo está afectado por la presencia de corrientes secundarias asociadas a la estrechez del canal.

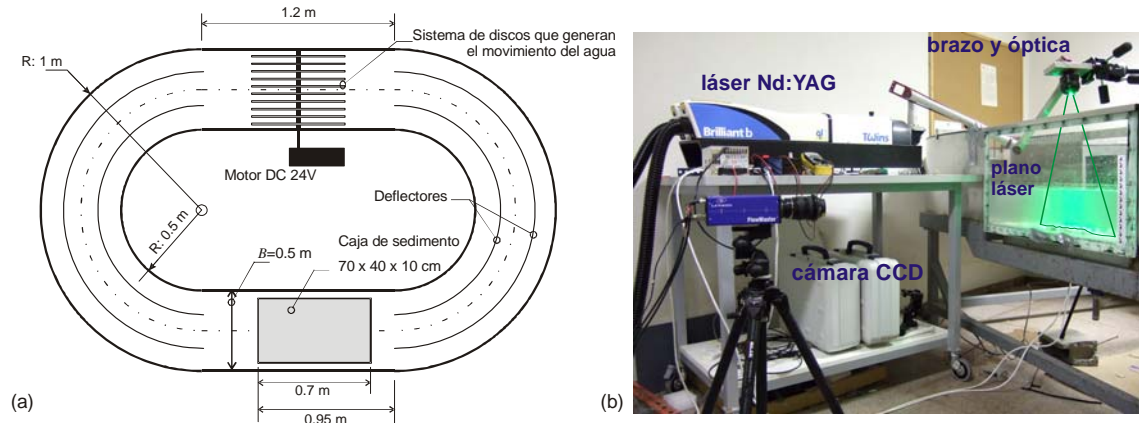


Figura 5.5. (a) Esquema del canal de recirculación y (b) Montaje experimental del equipo PIV.

Para determinar los campos de velocidades en la sección de análisis se ha utilizado un equipo de velocimetría de imagen de partículas PIV de la casa Lavision®, Figura 5.5 (b). El equipo registró en cada determinación experimental un total de 500 campos de velocidad a una frecuencia de 3.33 Hz. La adquisición de las imágenes comenzó un minuto después del arranque de los experimentos. La configuración óptica, el diseño experimental y la evaluación de imágenes se realizaron en base a las reglas de buena práctica descritas en el Capítulo 3 (§3.3.4.1 y §3.3.4.2) y en el apartado 4.3.3.

El mayor reto del montaje experimental ha sido determinar los campos de velocidades en el entorno de los berberechos. Los principales problemas que han surgido son inherentes a cualquier experimento de PIV en el que se desee determinar el flujo muy cerca de un contorno fijo, o como en este caso, en algunas ocasiones móvil. A medida que nos acercamos al lecho, existen más problemas por la reducción del número de partículas, con las reflexiones del láser con el contorno, con el incremento del gradiente de velocidades y también, con el funcionamiento del esquema de evaluación de imágenes con los algoritmos de correlación cruzada. Así, la ventana contiene información del contorno que también es evaluada. Este efecto comienza a notarse a una distancia de 32 px del lecho, unos 8 mm, por lo que vectores de esta región se verán afectados por este fenómeno.

Otro factor que influye en la calidad de los datos es el número de imágenes disponible para calcular los estadísticos que describen el flujo. En los experimentos se han empleado juegos de 500 imágenes, un número suficiente para caracterizar sin problemas las velocidades medias y sus fluctuaciones temporales y espaciales.

Con respecto a la precisión del equipo hay que señalar que el orden de magnitud del error cometido con la técnica PIV es muy difícil de estimar y depende de numerosos parámetros como la tridimensionalidad del flujo, el desplazamiento medio, el número de partículas en cada ventana de interrogación y tamaño. En la actualidad, con las técnicas avanzadas de evaluación y con juegos de imágenes sintéticas se habla de cotas de error del orden de hasta ~ 0.03 px

(Stanislas *et al.*, 2008), aunque en montajes experimentales reales se suele dar una cota de error de ~ 0.1 px (ver recientemente Nobach y Bodenschatz, 2009).

En los ensayos de esta Tesis Doctoral se ha determinado un desplazamiento medio, del lado de la seguridad, de unos ~ 5 px. Aplicando la cota de error más conservadora, para este desplazamiento se obtiene un error sistemático de un 2%, o de 0.025 mm.

Además, para el desarrollo experimental se han empleado otras instalaciones auxiliares como un acuario con agua marina para aclimatar y conservar los berberechos durante la realización de los ensayos. Para la alimentación de los moluscos se ha cultivado, con ayuda del Laboratorio de Microbiología de la UDC, el alga *Tresaselmis suecica* adecuada para este tipo de trabajos.

5.2.3.3. Campaña experimental

Los berberechos utilizados en los experimentos fueron recogidos por miembros de la Cofradía de Pescadores de A Coruña en la playa de Santa Cristina, a escasos 10 minutos de las instalaciones del CITEEC. Una vez recolectados, se clasificaron con la ayuda de un calibre de precisión de 0.1 mm. En esta primera identificación únicamente se midió la dimensión mayor (c) de los moluscos. Tras tomar nota de esta dimensión, los berberechos se etiquetaron y se introdujeron en el acuario relleno con agua de mar durante un periodo de aclimatación de unas 24 horas, previo a la realización de los ensayos.

El área de análisis se dividió en 3 celdas de 15×12 cm² en los ensayos de Grupos de tamaños y un área de 22.5×18 cm² en los ensayos de Poblaciones estacionales (ver Figura 5.6). De este modo se han podido analizar simultáneamente 3 tallas en los ensayos de grupos y los dos tamaños en los ensayos de poblaciones.

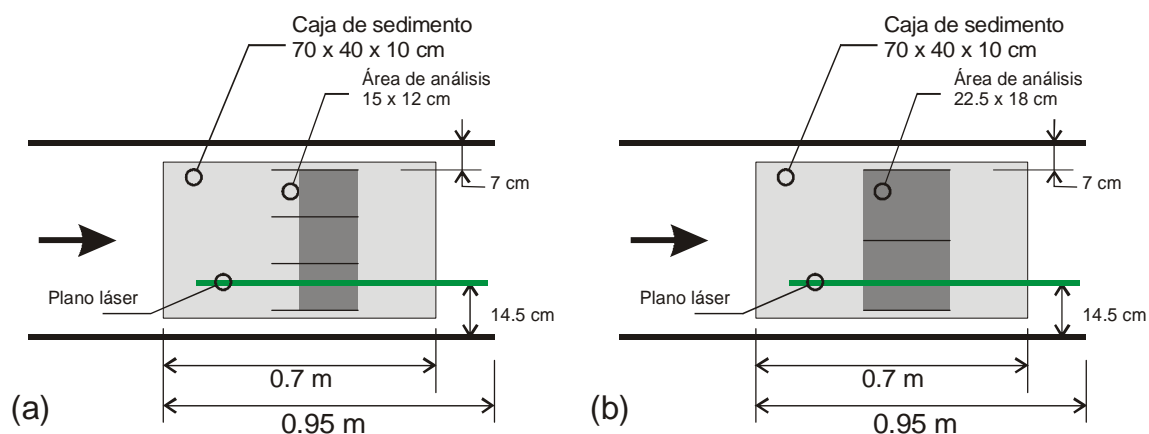


Figura 5.6. Configuración geométrica de los ensayos: (a) ensayos por grupos de tamaño y (b) ensayos de poblaciones.

Antes de comenzar cada ensayo se niveló el lecho. Después, los berberechos fueron colocados a mano sobre la arena, y tras un periodo de aclimatación de 5 minutos en el canal, se procedía a arrancar el motor. La duración de los ensayos fue de 5 minutos y 10 minutos, para los ensayos de grupos de tamaños y de poblaciones estacionales respectivamente. Una vez finalizado el tiempo de ensayo, se detenía el motor y se procedía a contar los moluscos arrastrados fuera del área de análisis. Hay que señalar que el modo de movilización de berberechos es por saltación y también arrastre.

Como se puede apreciar en la Figura 5.6, el plano donde se han determinado las velocidades no está situado en el centro del canal. La elección de este plano de medida atendió a criterios de visualización del flujo ya que los diferentes recintos experimentales se separaron por una placa de acero de 2 mm de espesor hincada en la arena, que sobresalía unos 4 cm del mismo.

Las placas separadoras definen zonas de análisis independientes (ver p.ej. de Montaudouin *et al.*, 2003), y evitan la interacción de los moluscos entre los recintos (p.ej. cambios de región por saltación). Estas placas también han evitado que la cámara captase los berberechos situados en las regiones posteriores, ya que su visión habría afectado a las técnicas de evaluación de la imagen y a la precisión del algoritmo de correlación cruzada.

Al terminar con el estado vivo, los moluscos se introdujeron en una solución de formol al 1% para matarlos previamente a la repetición de los mismos escenarios con los individuos muertos. Entre los ensayos con los moluscos vivos y muertos, y también cuando se procedió a cambiar el motor, se realizó una limpieza del canal. Para facilitar esta labor, los deflectores fueron retirados. Las pequeñas diferencias en las alineaciones de estas piezas se consideran responsables de cambios en la estructura del flujo. Estas modificaciones se han percibido en las distribuciones de tensiones e intensidades turbulentas determinadas experimentalmente con el equipo PIV.

Además de los ensayos con berberechos, se determinaron los campos vectoriales sobre el lecho de arena (ensayos de fondo liso). La caracterización hidrodinámica de este escenario ha permitido comparar las características del flujo que se produce sobre los berberechos con las del flujo sobre el fondo liso. También han servido para comparar estos resultados con los de la literatura, ya que en los ensayos de movilización consultados sólo se recoge información de las velocidades y velocidades de fricción para estas condiciones.

5.2.3.4. Análisis hidrodinámico

Debido a la alta rugosidad del lecho originada por la presencia de los berberechos se ha aplicado la metodología del doble promediado (DAM) para definir, entre otros parámetros, el origen ($z=0$) de los perfiles de velocidad, los perfiles de velocidad doblemente promediados y las velocidades de corte causantes del movimiento de los moluscos. Con esta técnica también se han obtenido los perfiles de tensiones e intensidades turbulentas doblemente promediados, así como los esfuerzos e intensidades de forma o dispersivas.

Para cada uno de los ensayos (fondo liso, poblaciones y grupos de tamaño uniforme) se ha determinado el perfil de velocidades doblemente promediado. A partir de éste, y con el método de Clauser, se estimó la velocidad de fricción.

Para los ensayos de fondo liso se ha empleado la siguiente expresión para ajustar la ley logarítmica de velocidades:

$$\frac{\langle \bar{U}(z) \rangle}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z+d}{k_s} + B_r \quad (5.1)$$

donde $\langle \bar{U}(z) \rangle$ es la velocidad horizontal doblemente promediada, u_* es la velocidad de fricción, κ es la constante de von Kármán, fijada en 0.41, d representa el plano de desplazamiento nulo, k_s es la rugosidad equivalente de Nikuradse y B_r es una constante de integración que en lechos rugosos se establece habitualmente en 8.5 ± 0.2 (Song, 1994).

Para determinar el valor de la velocidad de fricción se fijaron los valores del plano de desplazamiento nulo, $d = 0.2 \cdot d_{50} \sim 0.5$ mm, y de la rugosidad equivalente de Nikuradse, en $2 \cdot d_{50} \sim 2.84$ mm. El ajuste se ha realizado empleando el tramo de perfil doblemente promediado situado entre ~ 0.08 y $\sim 0.2 z/H$ con ayuda de la herramienta Solver© de Microsoft Excel©.

En los ensayos con berberechos, donde el flujo es rugoso, se ha empleado la siguiente expresión para la ley logarítmica de velocidades:

$$\frac{\langle \bar{U}(z) \rangle}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (5.2)$$

donde z_0 es la rugosidad característica de la ley de velocidades logarítmica y cuantifica el efecto de las rugosidades y de la formación de estelas en el lecho.

Empleando esta expresión se asume que la posición del plano de desplazamiento se encuentra en el origen de coordenadas. El origen $z=0$ se fijó en la posición media del lecho z_m determinada a partir de la función de rugosidad del mismo $\phi(z)$. Este procedimiento se ha aplicado en base a trabajos recientes sobre lechos de grava donde la posición del plano $z=d$ coincide prácticamente (con un orden de aproximación inferior a ~ 1 mm) con la posición del plano definido por la posición media del lecho (Detert, 2008; Mignot *et al.*, 2009). La validez de esta hipótesis se comprobó en una serie de experimentos donde se ajustó la expresión logarítmica para lechos rugosos general (Ecuación (4.19)).

La función de rugosidad de lecho se obtuvo con un algoritmo de detección del fondo programado en Matlab©. Una vez determinada la posición del lecho y de la superficie de berberechos, se obtuvo la función de rugosidad de fondo $\phi(z)$.

Los campos vectoriales fueron trasladados al nuevo origen de coordenadas y antes de proceder con el tratamiento de los mismos, se eliminaron los vectores situados por debajo de la posición del lecho. En este proceso también se eliminaron manualmente algunas zonas con vectores anómalos relacionados con problemas de visualización de gotas o manchas en el cristal del canal (Figuras 4.60 y 4.61). Esta etapa de preprocesado es una condición imprescindible para poder obtener unos buenos resultados.

5.2.3.5. Análisis estadístico de los resultados

Para poder cuantificar estadísticamente la interacción de los diferentes factores analizados (flujo, tamaño, reclutamiento y estado) en la movilización de los berberechos se ha empleado la técnica del Análisis de la varianza o ANOVA. Este test permite determinar si la media de la variable analizada, en este caso el porcentaje de berberechos movilizados, es igual para todos los niveles o grupos del factor o factores analizados, p.ej. el reclutamiento que podría tener los reclutamientos bajo o alto.

El análisis estadístico de los dos bloques de ensayos se ha realizado con un test ANOVA factorial, con todos los factores involucrados y sus interacciones. Este modelo se ha desarrollado con ayuda del software SPSS©. Previamente, se ha realizado un análisis exploratorio de los datos empleando varios test de normalidad, representación de histogramas y gráficas de cajas y bigotes. El objetivo del análisis exploratorio es el de analizar tendencias.

Siguiendo las indicaciones de la literatura, los datos fueron transformados ($\arcsin\sqrt{x}$) y con ayuda del test de Cochran, se comprobó la homogeneidad de las varianzas (Underwood, 1997). Una vez realizado el contraste ANOVA, se aplicaron los test de comparación múltiple a

posteriori de SNK, Tukey HSD y Bonferroni para determinar qué niveles de cada factor influían significativamente sobre la movilización de los berberechos

5.2.3.6. Funciones de transporte de fondo

Para relacionar las velocidades de fricción y las tensiones tangenciales sobre el lecho con la movilización de los berberechos se ha aplicado una metodología determinista para la obtención de fórmulas de transporte de sedimentos de fondo. En concreto, se ha empleado el concepto de función de transporte que consiste en definir una relacional funcional, habitualmente potencial, entre un parámetro de estabilidad Ψ , en este estudio el parámetro de Shields, con un parámetro de movilidad del lecho. Se han empleado dos variables adimensionales de movilidad Φ_q y Φ_E , definidas a partir del caudal sólido y del ratio de movilización volumétrico. En los apartados 4.2.5., 4.4.3.3 y 4.4.4.3 se pueden consultar el resto de detalles de esta metodología.

5.2.4. Caracterización de los berberechos

La caracterización geométrica tiene como objetivo determinar las propiedades de los berberechos que pueden emplearse para caracterizar su arrastre por una corriente de agua, fundamentalmente su tamaño y densidad. Para realizar esta caracterización se han empleado un grupo de 80 individuos de todas las tallas empleadas en los ensayos.

La metodología empleada para determinar la densidad de las conchas y del resto de parámetro geométricos es similar a la utilizada en trabajos anteriores (ver p.ej. Anta, 2006). Se ha encontrado que la densidad de los berberechos y de las conchas se ajusta bien, con una aproximación lineal, al tamaño característico c , que representa la anchura del cuerpo. Ésta y otras relaciones como el diámetro nominal o el peso de la concha se recogen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Principales relaciones entre la anchura del berberecho c y las principales variables geométricas (la definición de las mismas se encuentra en §4.4.1).

VARIABLES	TIPO DE AJUSTE	ECUACIÓN	R ²
a , altura [mm]	Potencial	$a \approx 0.4866 \cdot c^{1.1106}$	0.98
b , anchura [mm]	Potencial	$b \approx 0.9681 \cdot c^{0.9745}$	0.99
D_n , diámetro nominal [mm]	Lineal	$D_n \approx 0.6197 \cdot c + 4.6695$	0.97
S_{cb} , área en planta [mm ²]	Potencial	$S_{cb} \approx 0.7623 \cdot c^{1.9738}$	0.99
V_c , volumen total [mL]	Potencial	$V_c \approx 0.032 \cdot c^{2.2436}$	0.97
m_s , masa de la concha [g]	Potencial	$m_s \approx 7 \cdot 10^{-5} \cdot c^{3.3084}$	0.98
ρ_s , densidad de la concha [g/cm ³]	Lineal	$\rho_s \approx 0.0605 \cdot c + 0.2235$	0.88
ρ_t , densidad total [g/cm ³]	Lineal	$\rho_c \approx 0.0261 \cdot c + 0.6613$	0.88

Los valores medios (\pm desviación estándar) de las densidades de concha y berberechos han sido de 1.69 ± 0.45 g/cm³ y 1.29 ± 0.19 g/cm³ respectivamente. Para la definición de los parámetros de estabilidad y de movilidad de las fórmulas de transporte de caudal sólido de fondo se han empleado unas densidades de berberecho de 1.09, 1.24, 1.40 y 1.54 g/cm³, para las tallas de 15-20, 20-25, 25-30 y 30-35 mm respectivamente. Para los grupos de tamaños, las

densidades medias de los bivalvos de la población de otoño y primavera han sido 1.20 y 1.29 g/cm³ respectivamente.

Los principales parámetros determinados en este trabajo coinciden con los valores de trabajos desarrollados en la zona de los Lombos do Ulla (González y Pérez, 1984b, a) y con los realizados anteriormente por el GEAMA.

5.2.5. Caracterización del flujo en los ensayos de fondo liso

Los principales parámetros hidrodinámicos de los ensayos realizados sobre el lecho sin berberechos se presentan en la Tabla 5.3. En la misma se recogen los valores de la velocidad media y máxima doblemente promediada $\langle \bar{U}_{med} \rangle$ y $\langle \bar{U}_{max} \rangle$, la velocidad de fricción característica u_{*log} , estimada a partir de la ley logarítmica de velocidades, y la velocidad de fricción determinada de la extrapolación lineal del perfil de tensiones tangenciales u_{*uw} . En las últimas columnas también se ha incluido el número de Reynolds $Re \equiv \frac{u}{H\nu}$ y el parámetro de

Shields o número densimétrico de Froude $Fr_{*\Delta} \equiv \frac{u_*^2}{\sqrt{\Delta g d_m}}$, calculado con el diámetro medio del sedimento y $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho} - 1$.

La relación entre la velocidad máxima y media del flujo es de 1.11 ± 0.03 (media \pm desviación estándar) y la relación entre la velocidad media y la de corte es de 0.077 ± 0.001 , por lo que se encuentra dentro del rango habitual establecido para ríos naturales en $u^* = (0.05 - 0.10)U$. El valor del parámetro de Shields umbral para que comience el transporte de sedimentos se establece habitualmente en 0.056. Según este criterio el movimiento de los granos de arena comenzaría para la velocidad de 0.39 m/s, aunque en los ensayos se detectó movimiento de arena en el segundo y en el tercer escalón de velocidad (0.32 y 0.35 m/s). Este hecho es consistente con el rango de variación del parámetro de Shields que se puede encontrar en la literatura, 0.030-0.086 (Buffington y Montgomery, 1997).

Tabla 5.3. Resumen de los principales propiedades del flujo en los ensayos realizados sobre fondo liso. La nomenclatura de los ensayos ha sido V01FL a V06FL, donde donde "FL" hace referencia a Fondo Liso.

ENSAYO	$\langle \bar{U}_{med} \rangle$ (m/s)	$\langle \bar{U}_{max} \rangle$ (m/s)	$u_* \equiv u_{*,log}$ (m/s)	u_{*uw} (m/s)	Re_h ($\times 10^{-3}$)	$Fr_{*\Delta}$ (-)
V01FL	0.294	0.342	0.0228	0.0158	44.7	0.033
V02FL	0.315	0.351	0.0234	0.0159	48.0	0.035
V03FL	0.346	0.383	0.0262	0.0176	52.8	0.044
V04FL	0.391	0.437	0.0305	0.0230	58.6	0.060
V05FL	0.446	0.487	0.0346	0.0256	67.8	0.077
V06FL	0.471	0.515	0.0363	0.0239	69.6	0.085

En la Tabla 5.3 también se puede observar como las velocidades de fricción determinadas a partir de la extrapolación del perfil de tensiones de Reynolds son inferiores, un $70\pm 4\%$ en términos medios, a las estimadas a partir del perfil logarítmico. Estas variaciones se atribuyen fundamentalmente a la presencia de corrientes secundarias que modifican la distribución de tensiones de Reynolds. Por este motivo, se ha empleado la velocidad de corte determinada con la ley logarítmica de velocidades como velocidad característica para el análisis de los perfiles de velocidades y tensiones, ya que, en sentido estricto, la velocidad de corte determinada a partir de la extrapolación las tensiones de Reynolds sólo es válida para flujos bidimensionales uniformes (Detert, 2008).

Siguiendo el procedimiento explicado en la metodología, se han determinado las velocidades de fricción con errores cuadráticos medios inferiores al 1%, y con un valor medio para la constante de integración B_r de 8.40 ± 0.11 que se encuentra dentro de los rangos habituales para régimen rugoso. Hay que señalar que la existencia de transporte de sedimentos de fondo afecta a la parte inferior del perfil de velocidades que se retrasa ligeramente, y adquiere forma de S (Wang *et al.*, 2001). Esta circunstancia, así como el efecto de descenso de velocidades provocado las corrientes secundarias, se han registrado en la distribución vertical de velocidades, como se puede ver en la Figura 5.7.

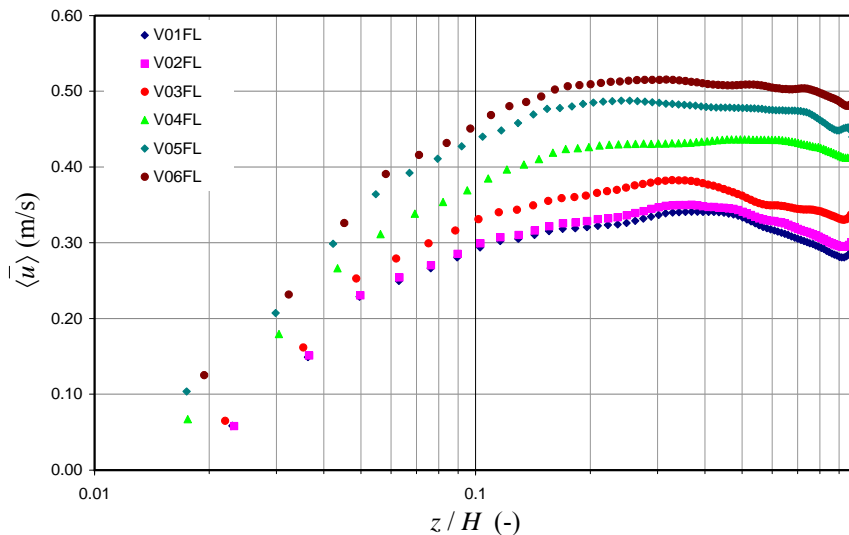


Figura 5.7. Perfiles de velocidad doblemente promediados en los ensayos de fondo liso.

La posición de la velocidad máxima δ_i se encuentra en el rango $\delta_i/H \sim 0.35\pm 0.08$. Este valor es sensiblemente inferior a lo que cabría esperar según la descripción y relaciones empíricas encontradas en la literatura, que lo situarían en el entorno de $\sim 0.65 \cdot H$. Esta posición tan baja puede estar originada en el efecto combinado del transporte de sedimentos y la no uniformidad del flujo, con las corrientes secundarias originadas por la estrechez del canal. Tampoco se pueden descartar corrientes secundarias por efectos de flujo en curva.

En la Figura 5.7 se puede apreciar como el perfil de velocidades presenta dos formas diferentes entre los ensayos V01 a V03 y V04 a V06. Este efecto ha sido provocado por la necesidad de emplear dos motores diferentes durante la realización de los ensayos. Sin embargo, estas diferencias se producen fundamentalmente en la zona externa del flujo ($z/H > 0.2-0.3$), por lo que la determinación de las velocidades de fricción y las tensiones sobre el lecho a partir de la ley logarítmica de velocidades no se ha visto afectada por esta circunstancia.

Respecto a la estructura de las intensidades turbulentas hay que señalar que éstas también reflejan la existencia de corrientes secundarias, especialmente en la mitad inferior del calado donde se separan más de las distribuciones empíricas universales para flujo 2D uniforme recogidas en la literatura (§Figura 4.67; Nezu y Nakagawa, 1993; Kironoto y Graf, 1994). El valor de las intensidades turbulentas verticales de forma normalizadas con la velocidad de fricción en la región del lecho, $\langle \sigma_w^- \rangle / u_* \sim 0.2$, es similar al de otros trabajos sobre flujos lisos o de transición (Cameron *et al.*, 2008). Sin embargo, para la componente horizontal los valores determinados son ligeramente inferiores a los de la literatura, $\langle \sigma_u^- \rangle / u_* \sim 0.1$ vs ~ 0.4 . En el resto de la vertical, las tensiones de forma son prácticamente constantes y muy reducidas (~ 0.05), en la literatura y para la componente horizontal en estos ensayos. Nuevamente, el valor de la tensión de forma adimensional vertical (~ 0.1) es un tanto elevado lejos del contorno. Este incremento de la intensidad turbulenta y de las tensiones de forma verticales se atribuye al efecto de las corrientes secundarias sobre la estructura de las velocidades verticales.

Las tensiones de Reynolds también reflejan el efecto de las corrientes secundarias y la no uniformidad del flujo, especialmente para los ensayos de las velocidades más altas (§Figura 4.68). Se ha cuantificado la contribución de los esfuerzos de Reynolds a la tensión sobre el lecho (determinada a partir u_{*log}) en un $51 \pm 5\%$. Este valor es un tanto inferior al recogido por Detert (2008), que para un lecho de gravas y esferas en unas condiciones de flujo ligeramente no uniforme en la línea central de un canal de relación $B/H=4.5$ encontró una relación entorno al 80% ($u_{*uw}/u_{*log}=90 \pm 3\%$). En la literatura se ha cuantificado la importancia de las corrientes secundarias a través de medidas experimentales de la componente v de la velocidad transversal. Como se comentará en el apartado 5.2.7, en algunos flujos rugosos este término puede representar hasta un $\sim 70\%$ de la tensión total (Coleman *et al.*, 2007).

5.2.6. Análisis estadístico de la movilización de los berberechos

En el análisis exploratorio de los datos se ha constatado que al estudiar la movilización de los berberechos respecto a un único factor, como la velocidad, ésta presenta cierta dispersión (p.ej. desviación estándar). Además, la dispersión es mayor en los ensayos de tallas que en los ensayos de poblaciones estacionales. Este fenómeno se atribuye a la influencia de las interacciones que se producen entre factores, p.ej. en la movilización no sólo influye la velocidad sino también la talla del individuo.

Respecto al análisis de los factores individuales para el ensayo de grupos de tamaños, o tallas, se puede señalar que a medida que la velocidad aumenta y/o la talla disminuye, se incrementa el porcentaje de berberechos arrastrados de la sección de análisis. Los valores medios son del 10% y del 58% para la velocidad más baja y más alta respectivamente, y del 60%, 31%, 18% y 17% para las tallas de 15-20, 20-25, 25-30 y 30-35 mm respectivamente.

Para la talla de 15-20 mm y las velocidades de ~ 0.30 y ~ 0.35 m/s ($u_* = 0.0228$ y 0.0262 m/s), los porcentajes de berberechos movilizados son del 25% y 50%. St-Onge y Miron (2007), realizaron varios ensayos de arrastre de la almeja *M.balthica* bajo velocidades de corriente similares (~ 0.29 y ~ 0.35 m/s), aunque con una velocidad de fricción ligeramente inferior (0.0201 y 0.0235 m/s). Para estas condiciones, el porcentaje de bivalvos movilizado era prácticamente constante y dependía del tipo de sedimento, produciéndose un arrastre del 10% y del 40% para un lecho de gravas y arenas respectivamente. Por tanto, parece que el fenómeno de arrastre de estos moluscos es similar. No se han encontrado en la literatura trabajos para comparar con los resultados obtenidos para las tallas y velocidades mayores.

Tabla 5.4. Porcentaje de berberechos movilizados en función de la velocidad de la corriente y de la talla. Ensayos de grupos de tamaños.

TALLA	VELOCIDAD					
	0.298 m/s	0.315 m/s	0.346 m/s	0.391 m/s	0.446 m/s	0.471 m/s
15-20 mm	25.1%	50.6%	49.0%	71.8%	77.3%	84.5%
20-25 mm	12.8%	30.9%	26.0%	22.6%	43.4%	52.0%
25-30 mm	2.4%	14.9%	16.3%	10.9%	20.9%	45.3%
30 - 35 mm	0.0%	0.3%	0.0%	18.5%	34.3%	50.0%

En la Tabla 5.4 se puede apreciar como el porcentaje de berberechos movilizados desciende ligeramente entre el segundo y tercer escalón de velocidad, para la talla más pequeña, y entre el segundo y cuarto escalón, para las tallas intermedias. Esta no linealidad se atribuye al comienzo del transporte de fondo de arena (recordemos que para estos niveles de velocidad estamos en el terreno del umbral de Shields). En estas condiciones, los moluscos pueden quedar parcial o totalmente enterrados por la arena antes de que se produzca su arrastre. Sin embargo, cuando la potencia del flujo aumenta, los bivalvos son arrastrados antes de que puedan ser enterrados. Además, como los berberechos más pequeños son más fácilmente erosionables, el descenso de la movilización se reduce sólo al segundo y tercer nivel de velocidad.

La talla más grande presenta un comportamiento cuasi-lineal a partir de los ~0.40 m/s. Para velocidades inferiores, el número de berberechos arrastrados es prácticamente nulo. Además, también es reseñable que el porcentaje de berberechos arrastrados de esta talla es mayor que el de la talla de 25-30 mm. Este fenómeno se debe probablemente a que están más expuestos a la corriente (por su mayor superficie de exposición) y también a que es más difícil, por su mayor volumen, que queden enterrados como los individuos de menor talla.

Los resultados de los ensayos de poblaciones estacionales reflejan también que la velocidad y la talla son factores que afectan a la movilización de los moluscos (Tabla 5.5). Sin embargo, para estos ensayos no se ha detectado un menor ratio de arrastre por efecto del transporte de arena. Sin embargo, sí que es significativo que las dos poblaciones estacionales para las velocidades más bajas presenten una mayor resistencia al flujo que la ofrecida por la talla equivalente en el ensayo de tamaños (la talla de 20-25 mm). Si se compara la movilización media para estas velocidades se observa p.ej. que para la segunda velocidad, un ~30 % de los berberechos de la talla de 20-25 mm son arrastrados mientras que para las poblaciones el porcentaje asciende a un ~10-14%. Estos porcentajes de movilización se parecen más a los de la talla de 25-30 mm que a los de la talla de 20-25 mm.

Tabla 5.5. Porcentaje de berberechos movilizados en función de la velocidad de la corriente y la talla. Ensayos de poblaciones estacionales.

TALLA		VELOCIDAD					
		0.298 m/s	0.315 m/s	0.346 m/s	0.391 m/s	0.446 m/s	0.471 m/s
Otoño	$d_m \sim 21$ mm	8.5%	13.7%	20.1%	29.6%	53.1%	72.7%
Primavera	$d_m \sim 24$ mm	8.0%	9.8%	15.0%	24.1%	41.2%	57.4%

Para velocidades mayores este efecto desaparece y los ratios de transporte se igualan, aunque para la población estacional más pequeña son ligeramente superiores a los de la talla de 20-25 mm.

Las diferencias que se producen entre los grupos de tallas y las poblaciones estacionales son similares a las que se encuentran cuando se estudia el transporte de dos mezclas de sedimento con el mismo tamaño medio pero diferente distribución granulométrica. En una mezcla de sedimentos con tamaños de grano variados, se producen fenómenos de ocultamiento de los granos más pequeños y de exposición de los más grandes. Este proceso, favorece que los sedimentos más pequeños de la mezcla tengan una tensión crítica mayor que la equivalente a la de un lecho del mismo tamaño pero con granulometría uniforme. De modo opuesto, los granos gruesos de una mezcla tienen una tensión crítica relativa menor que cuando la distribución es uniforme (ver entre otros Parker, 1989; García, 2006):

Si este efecto se reproduce en los ensayos de transporte de berberechos, se tendrá que para las distribuciones de bivalvos no uniformes la distribución de poblaciones presenta una tensión de arrastre relativamente mayor que una con el mismo tamaño pero de distribución uniforme. Por este motivo, los moluscos de poblaciones son más resistentes al arrastre que los de la talla de 20-25 mm para las velocidades más bajas. Una vez superado el umbral de movimiento de la distribución no uniforme, las diferencias con la talla homogénea desaparecen.

El factor reclutamiento también afecta al proceso de arrastre de los berberechos, reduciéndose el porcentaje de movilización con las mayores densidades de reclutamiento. En términos medios, se pasa del 37% al 26% en los ensayos de tallas, y del 35% al 24% en los ensayos de poblaciones.

Con respecto al estado de los berberechos, también se ha encontrado un comportamiento diferenciado entre los ensayos de tallas y poblaciones, ya que en los primeros la movilización media es superior con los moluscos muertos (35% vs 28%). En los ensayos de poblaciones, el porcentaje medio de moluscos arrastrados vivos y muertos es prácticamente el mismo, y se sitúa en el entorno del 29%.

Para confirmar las tendencias encontradas en el análisis exploratorio se realizó un análisis de la varianza para cada bloque de ensayos. Este análisis confirma que todos los factores involucrados en los ensayos de tallas influyen la movilización de los moluscos, y además con niveles de significancia muy altos ($p < 0.001$). En los ensayos de poblaciones, el test refleja que sólo la velocidad, la talla y el reclutamiento afectan a la media de berberechos arrastrados (también, con significancia estadística elevada, $p < 0.001$).

En los ensayos de tallas, el ANOVA indica que algunas interacciones también afectan a la movilización (§Tabla 4.19). Son significativas ($p < 0.05$) las interacciones de primer orden Velocidad x Talla, Talla x Estado y Densidad x Estado y las de segundo Velocidad x Talla x Densidad, Velocidad x Talla x Estado. Al analizar la potencia del test se comprueba que todos los factores e interacciones significativas tienen una potencia elevada, $1 - \beta > 0.9$. Son una excepción las interacciones secundarias Talla x Estado y Densidad x Estado, que tienen una potencia cercana al 70%, que está un poco por debajo del límite de lo que se podría considerar como un resultado significativo.

Hay que señalar que la existencia de interacciones no representa ningún problema mayor que el incremento de la complejidad del análisis. En muchos experimentos se producen interacciones con factores que no se analizan, y no se conoce de su existencia. Además, la

presencia de interacciones es habitual en los estudios consultados en la literatura (ver entre otros Roegner *et al.*, 1995; Hunt, 2004; St-Onge y Miron, 2007) .

Al existir interacciones significativas entre los factores principales, la información que proporcionan los tests de comparaciones múltiples no es tan valiosa ya que no se están contemplando las mismas. A pesar de esta limitación, se realizaron varios tests de comparación múltiple (SNK, SNK modificado, Tukey HSD y Bonferroni) que arrojan resultados similares. Así, para las velocidades donde se produce la interacción entre el arrastre y el transporte de sedimentos (0.30, 0.32 y 0.35 m/s), las diferencias en las medias no son significativas. Estos tests tampoco encuentran diferencias significativas entre las dos tallas más grandes. Los contrastes t de Student confirman las tendencias descritas en el análisis exploratorio para los factores reclutamiento y estado.

Con respecto a los ensayos de poblaciones, hay que señalar que no se han encontrado interacciones significativas. Los tests a posteriori señalan que todos los escalones de velocidad y el reclutamiento producen un efecto significativo sobre el arrastre de los grupos de berberechos analizados. Sin embargo, estos contrastes no encuentran diferencias significativas para el factor talla. Esto se debe a que la potencia del test ANOVA es mucho mayor que la de los test de contraste múltiple, es decir, es capaz detectar diferencias en la media menores (Underwood, 1997).

5.2.7. Caracterización del flujo sobre los berberechos

5.2.7.1. Características generales

Las características del flujo en los ensayos de grupos de tamaños y de poblaciones estacionales se han comparado con los ensayos de fondo liso. También se ha realizado un análisis exploratorio y de tendencias de los principales parámetros (propiedades del flujo, escalas características y rugosidad del lecho) en función de los factores analizados: velocidad, talla, reclutamiento y estado. Este análisis no se ha podido complementar con contrastes estadísticos para determinar la significancia de los factores que influyen en los parámetros, porque las características hidrodinámicas están determinadas sin repeticiones y no es posible aplicar un contraste ANOVA convencional.

Las velocidades registradas en ambos tipos de ensayo son ligeramente inferiores a las determinadas con el lecho sin berberechos, con una diferencia media del $93\pm 3\%$ y $91\pm 6\%$ para los grupos y las poblaciones estacionales respectivamente. El análisis de las velocidades, y los números de Re y Fr , revelan que estos parámetros no varían sustancialmente con la talla, el reclutamiento o la densidad (las variaciones entre niveles son inferiores al 5% del valor medio).

Como variaciones relevantes se puede señalar, en primer lugar, que los parámetros de la talla de 15-20 mm se parecen más a los valores de fondo liso, hecho relacionado con la reducida rugosidad que introducen estos bivalvos y porque además son arrastrados rápidamente y en mayor número. También se ha encontrado que para el estado muerto, las velocidades del flujo son superiores que para el estado vivo. En términos medios, y para los dos tipos de ensayo, las diferencias son de unos 6 cm/s, ~ 0.39 cm/s vs ~ 0.33 cm/s. Estas diferencias podrían estar relacionadas con la actividad filtradora de los moluscos en la estructura de las velocidades.

El descenso de las velocidades de fricción para los ensayos de grupos de tallas puede estar relacionado con la interacción entre el transporte de sedimentos y la movilización de los berberechos. Como se ha comentado en el apartado anterior y en el Capítulo 4, por efecto del

transporte de fondo de la arena se produce un descenso de la cantidad de moluscos movilizados. En la Figura 5.8 se puede observar que en las velocidades en las que se produce este fenómeno, también se reducen las velocidades de corte. En los ensayos de poblaciones, el arrastre de bivalvos es proporcional a la velocidad y lo mismo sucede con la velocidad de fricción.

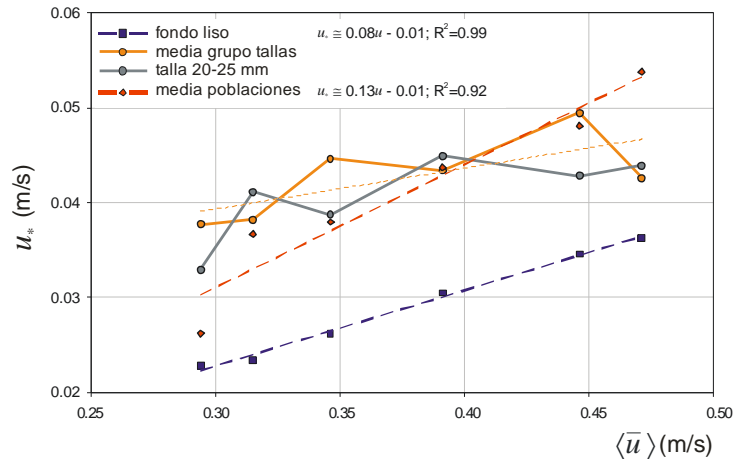


Figura 5.8. Relación entre la velocidad media doblemente promediada y la velocidad de fricción media determinada a partir de la ley logarítmica de velocidades para los ensayos de grupos de tallas y poblaciones estacionales.

El análisis de la rugosidad del lecho refleja que con el incremento de la velocidad, la rugosidad característica y la posición del plano $z=0$ descienden, cuando nos encontramos en los ensayos de grupos de tallas. En los ensayos de poblaciones, no parece existir un patrón de comportamiento con la velocidad, evidenciando nuevamente que no sólo la talla sino también como ésta se distribuye influyen en los ensayos de movilización. Al analizar estas variables con la talla y densidad se observa una relación directa con la talla (a mayor talla mayor rugosidad característica) e inversa con el reclutamiento.

Para los ensayos de grupos de tallas se ha realizado un análisis de la rugosidad relativa λ/Δ en los escenarios de reclutamiento bajo. Este estudio revela que al disminuir la talla se produce un incremento en el ratio λ/Δ , por lo que el flujo se asemeja más al que se produce sobre un obstáculo bidimensional aislado. En estas condiciones la tasa de transferencia de cantidad de movimiento sobre el lecho aumenta. En la Figura 5.9 se puede observar como para el reclutamiento bajo el gradiente de velocidades es mayor cerca del lecho, lo que se traduce en una mayor velocidad de fricción y en un incremento de las sobre el fondo. Al reducirse el espaciamiento, con tallas mayores o sobre configuraciones de lecho más uniformes espacialmente como las de mayor densidad o las de los ensayos de poblaciones, la velocidad de fricción se reduce para las mismas condiciones de flujo, y por tanto, la capacidad e movilización de los berberechos.

Respecto a las escalas geométricas características los resultados más reseñables se refieren a la posición del punto de velocidades máximas en la vertical, medido como δ_h o δ_h/H , y a la sumergencia relativa de los experimentos, H/Δ . Las determinaciones experimentales confirman que la magnitud de las velocidades verticales influyen en la relación δ_h/H , ya que, a mayor talla y/o menor reclutamiento, la posición de las velocidades máximas se acerca hacia el lecho. Por

ejemplo, la relación entre la posición δ_h/H para los ensayos de tallas y los de fondo liso ha sido 0.34 ± 0.16 mientras que los ensayos de poblaciones el ratio medio es 0.44 ± 0.17 .

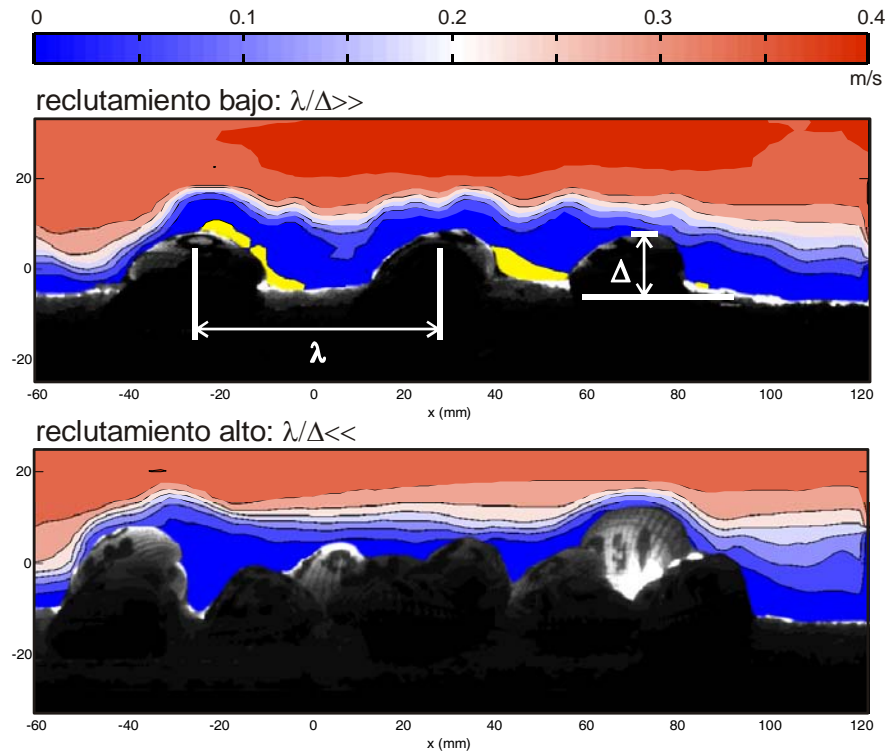


Figura 5.9. Distribución de la velocidad horizontal promediada en el tiempo en el ensayo realizado con berberechos vivos de 25-30 mm para la velocidad V05 (0.45 m/s) Se pueden apreciar las diferencias en la distribución espacial de las rugosidades para el reclutamiento bajo y alto y su efecto sobre la estructura de las velocidades. En amarillo se han representado zonas de velocidad negativa.

Es decir, el fenómeno del *velocity dip* es más pronunciado en lechos más rugosos. Este fenómeno también puede estar relacionado con la importancia de las corrientes secundarias, que para las mismas condiciones de flujo son más importantes en rugosidades tipo $-k$ (flujo sobre obstáculo aislado) que en las de tipo $-d$ (flujo rasantes). Coleman *et al.* (2007), cuantificaron esta importancia en unos ensayos sobre traviesas cuadradas con diferentes separaciones relativas λ/Δ en un canal con una relación $B/H=3$. Estos autores señalan que la separación de las traviesas influye en la contribución de las corrientes secundarias a la tensión total, que varía entre un $\sim 40\%$ y en un $\sim 70\%$ para relaciones λ/Δ entre 2 y 16 respectivamente.

Por lo tanto, si el término asociado a las corrientes secundarias no se hubiese determinado, una extrapolación directa de las tensiones de Reynolds hasta el lecho habría llevado a subestimar de forma sistemática la velocidad de corte y las tensiones tangenciales sobre el lecho. La aparición de estas tensiones se puede atribuir a las propias rugosidades que generan un flujo 3D, y también a la relación de aspecto de los ensayos que fue $B/H=3$.

Por este motivo, el parámetro δ_h/H se encuentra por debajo de los valores encontrados en la literatura y los predichos por las fórmulas empíricas presentadas en el Capítulo 2. Además, en general para las velocidades más altas la relación δ_h/H se encuentra por encima o muy cerca de la mitad del calado, y para las velocidades más bajas, por debajo de la mitad del calado.

Con respecto a la sumergencia relativa se puede señalar que en los ensayos realizados con la talla de 15-20 mm se puede considerar alta ($H/\Delta \sim 20$). En los ensayos de poblaciones estacionales y en las tallas intermedias la sumergencia se encuentra en un rango medio, $H/\Delta \sim 8-10$, mientras que para la talla de 30-35 mm es ligeramente baja. En cualquier caso, para esta talla no llega a los extremos de ser un flujo de tipo rugoso ($H/\Delta < 3-4$, §Figura 2.9, §2.3.1).

5.2.7.2. Velocidades doblemente promediadas

Se han analizado los campos de velocidades medias horizontales, verticales y totales, promediadas en el tiempo para diferentes grados de reclutamiento en los ensayos de grupos y de poblaciones. En los campos de velocidades se refleja el proceso de adaptación del flujo a la rugosidad localizada que produce la presencia de los berberechos. Así, en la zona aguas arriba de la sección de análisis, a la altura del primer molusco, las velocidades son ascendentes pero ligeramente más lentas que las del promedio de la sección. Sobre los moluscos se produce una aceleración del flujo, y al final de la zona de análisis, en la expansión, las velocidades adquieren una componente descendente y vuelven a reducirse ligeramente.

El análisis de las componentes de la velocidad confirma que para las densidades altas el flujo es más rasante y que para la densidad más baja, en los ensayos de tallas, el flujo se asemeja al flujo sobre un obstáculo aislado. Para este tipo de escenarios, se ha llegado a apreciar zonas de velocidades horizontales negativas tras los moluscos, asociadas probablemente al proceso de separación del flujo y formación de estelas sobre estos cuerpos (ver Figura 5.9). En los ensayos de poblaciones, la diferencia de rugosidad asociada a cada densidad de reclutamiento no es tan pronunciada como en los ensayos de tallas, porque las características del lecho (altura característica y distribución de las mismas) son más homogéneas al estar formado éste por moluscos de tamaños muy diversos.

La representación de este campo permite visualizar patrones organizados de flujo, provocados por la disposición de los moluscos, superpuestos al flujo medio (Coleman *et al.*, 2007; Pokrajac *et al.*, 2007).. De forma similar al estudio de las estructuras coherentes en el dominio del tiempo, la representación vectorial de las perturbaciones de la velocidad permite observar estructuras y vórtices formados sobre los berberechos como los presentados en la Figura 5.10.

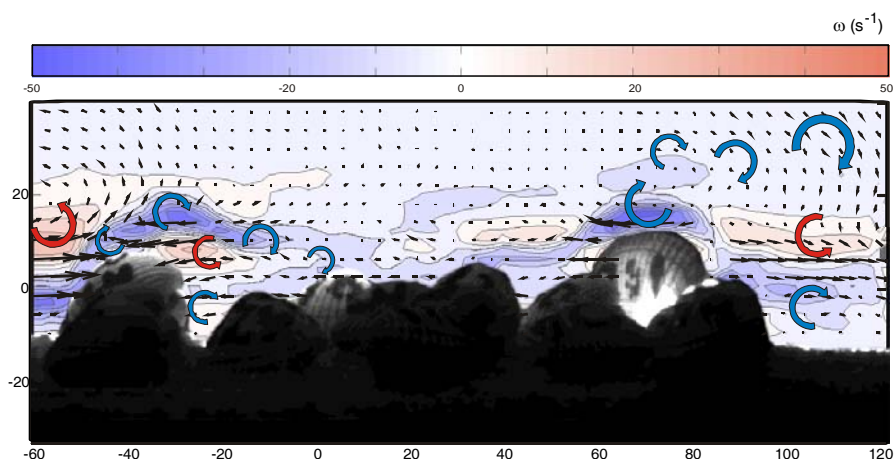


Figura 5.10. Campo vectorial de las perturbaciones espaciales de la velocidad (\tilde{u}, \tilde{w}) para el ensayo con el reclutamiento alto presentado en la Figura 5.9. Se ha representado la vorticidad del campo y las estelas persistentes formadas en el entorno de los berberechos más grandes del lecho.

El análisis de las componentes horizontales y verticales de la perturbación de la velocidad demuestra la correlación que existe entre el flujo y la forma del lecho. Así, inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de los moluscos en los ensayos de talla con el reclutamiento bajo, se ha registrado que la componente \tilde{u} es negativa y positiva, representado el proceso de frenado y aceleración del flujo (§Figura 4.78-b). Cuando el flujo es más rasante, grupos de talla con densidad alta y poblaciones estacionales, este proceso no es tan marcado y sólo se puede percibir al comienzo y final de la sección de análisis o sobre algún berberecho que haya sido recolocado y sobresalga del lecho (§Figura 4.78-a, 4.103a). Las perturbaciones verticales \tilde{w} son positivas aguas arriba de los moluscos que sobresalen del parche, o de todos los moluscos en las configuraciones de talla y baja densidad, y negativas aguas abajo de los mismos. El estudio de las perturbaciones de la velocidad también indica que el efecto de la rugosidad en las velocidades horizontales es más reducido, y se produce entre los senos del lecho y pocos centímetros por encima de las crestas. En la vertical, la afección sobre la estructura del flujo es mucho mayor, y está relacionada con la rugosidad del fondo. Así, en los ensayos de talla con el reclutamiento bajo el efecto alcanza casi todo el calado, y con el reclutamiento alto y en los ensayos de poblaciones, llega hasta $\sim 1/2$ o $\sim 2/3$ de la vertical.

Se han intentado analizar los perfiles de velocidad de modo conjunto pero se ha encontrado mucha variabilidad en la forma de los perfiles. Así, no se ha encontrado una forma “genérica” para el perfil p.ej. en función de la rugosidad o el grado de reclutamiento. Este hecho se achaca a que en cada ensayo el lecho presentaba una forma diferente. Así, aunque mantiene la talla y el grado de reclutamiento, los berberechos se dispusieron aleatoriamente sobre la arena, y por el propio proceso de arrastre, la forma del lecho en cada ensayo era única.

5.2.7.3. Intensidades turbulentas y tensiones de corte

En los apartados 4.4.3.2 y 4.4.4.2 se ha mostrado la importancia de las corrientes secundarias y la rugosidad provocada por el parche de berberechos (forma, espaciamento y talla) sobre las distribuciones de las intensidades turbulentas y tensiones de Reynolds y forma. Además de estos factores, se ha vuelto a confirmar que otros aspectos externos como el cambio del motor o pequeñas alteraciones en la alineación de los deflectores también afectan a la distribución de tensiones.

El comportamiento de las distribuciones de intensidades de forma es similar en las distintas configuraciones de lecho ensayadas. Así, las intensidades horizontales y verticales coinciden prácticamente desde la lámina libre hasta una profundidad de 30-40 cm. A partir de este punto, las intensidades horizontales siguen una ligera tendencia creciente y las verticales aumentan de un modo considerable, multiplicando su valor en 2-3 veces al de las intensidades horizontales. Este comportamiento difiere del encontrado en los trabajos de flujos lisos o de transición, donde las intensidades de forma horizontales suelen duplicar a las verticales y donde además, la variación de la distribución se produce únicamente en la parte más próxima al lecho, entre un 3 – 5% del calado (Cameron *et al.*, 2008).

En los dos bloques de ensayos, el incremento de las intensidades verticales está relacionado con el grado de reclutamiento, siendo mayor para la densidad más alta. Estos hechos reflejan la importancia del flujo ascendente y descendente cerca del fondo en nuestros experimentos, que se produce por el efecto combinado de la tridimensionalidad del lecho y de las corrientes secundarias de la sección.

Las tensiones de Reynolds no siguen la distribución lineal de los flujos 2D uniformes. Además, al observar la distribución de este parámetro es más notable la influencia del tipo de motor y del estado de los berberechos en la forma de la misma.

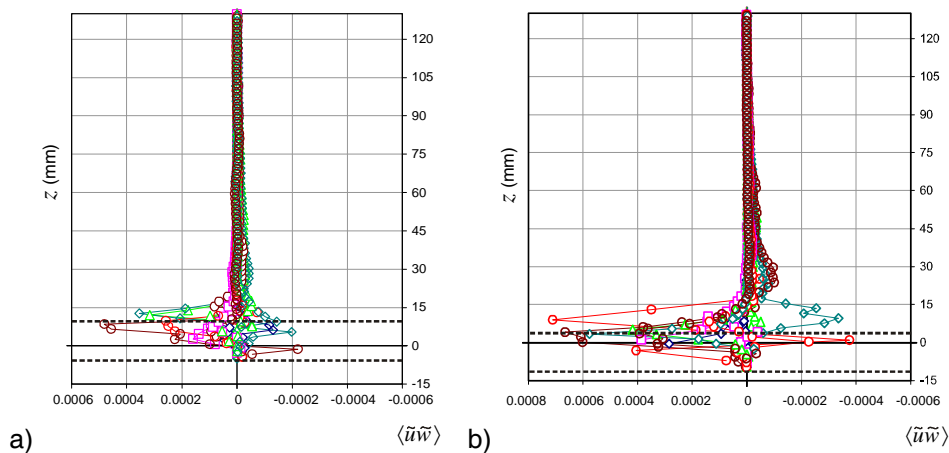


Figura 5.11. Perfiles de los esfuerzos dispersivos doblemente promediados para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: a) densidad baja y b) densidad alta.

Las tensiones de forma reproducen en general el comportamiento de las intensidades de forma verticales, con valores positivos (opuestos a las tensiones de Reynolds) y magnitudes superiores para el reclutamiento alto (ver Figura 5.11). Sin embargo, en algunas ocasiones se han determinado perfiles con intensidades de forma positivas y en otros casos con fuertes oscilaciones y cambios de signo entre las crestas y los senos del lecho. Esta alta variabilidad de las tensiones de forma esta relacionada con la estructura del lecho, diferente en cada ensayo, las escalas características de rugosidades del mismo y también con la tridimensionalidad del flujo.

En la revisión de los trabajos de la literatura también se ha constatado esta falta de universalidad en las tensiones dispersivas, incluso en escenarios de flujo similares (ver entre otros Coleman *et al.*, 2007; Nikora *et al.*, 2007b; Detert, 2008; Pokrajac *et al.*, 2008). En referencia a este fenómeno, también se pueden señalar los trabajos de Aberle *et al.* (2008) en lechos de gravas acorazados. En este estudio se señala que la distribución de las tensiones de forma no varía con el caudal, manteniéndose prácticamente constante para diferentes velocidades y sumergencias. Además, la distribución de tensiones dispersivas presentaba varios máximos relativos con signos contrarios entre las crestas y los senos del lecho, y su forma dependía fuertemente de la ubicación del perfil en el lecho (p.ej. se encontraron diferencias entre las distribuciones aguas arriba o en el lateral de un canto, ver Figura 4.92).

Las principales conclusiones del trabajo de Aberle se reproducen en nuestros ensayos de berberechos. Otro aspecto que refuerza este resultado es el hecho de que las diferencias encontradas en los perfiles asociadas al cambio de motor no se reproducen en las distribuciones de tensiones dispersivas. Por tanto, las tensiones dispersivas podrían considerarse como una característica intrínseca de cada configuración espacial de las rugosidades del fondo.

En los ensayos de tallas y poblaciones se ha determinado la contribución media de las tensiones de forma a las tensiones de Reynolds $\left| \frac{\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle}{\langle u'w' \rangle} \right|$ en 0.53 ± 0.59 y 0.64 ± 0.29 respectivamente. Además, como se ha comentado, se ha encontrado una correlación entre la

contribución de los esfuerzos dispersivos y la talla ensayada, mayor con tamaños crecientes (p.ej. para la talla más pequeña del ensayo de grupos vale 0.36 ± 0.42 , y para la talla más grande 0.76 ± 0.62), y con el reclutamiento. Para el reclutamiento bajo/alto, la contribución es un $\sim 10\%$ inferior/superior a la media.

Respecto a las velocidades de corte, se han encontrado diferencias importantes entre las determinadas a partir del perfil de velocidades, u_{*log} , y las extrapoladas a partir de la distribución de tensiones de Reynolds, u_{*uw} . En ambos bloques de ensayos la relación $u_{*uw}(z=0)/u_{*log}$ es prácticamente idéntica $\sim 0.48 \pm 0.13$. Si se analiza la contribución a la tensión tangencial sobre el lecho $\tau_0 (\propto u_*^2)$, ésta se reduce a un $\sim 25\%$.

Al comparar estos datos con los obtenidos para fondo liso se tiene que la relación entre las velocidades de fricción desciende desde el $\sim 70\%$ al $\sim 50\%$, y la contribución sobre las tensiones sobre el lecho del $\sim 50\%$ al $\sim 25\%$. Este hecho refleja la importancia de las corrientes secundarias y como el hecho de no contemplarlas conllevaría a subestimar los esfuerzos de corte sobre el lecho.

Sin embargo, en nuestros experimentos es previsible que el efecto de las corrientes secundarias sea mucho mayor que en otros estudios de la literatura porque, además de tener un flujo en un canal estrecho ($B/H \sim 3.33$), las medidas se realizaron lejos del plano central. Por tanto, la tridimensionalidad del lecho y el efecto de las corrientes secundarias se consideran los principales factores responsables de las elevadas contribuciones de las tensiones de forma a la tensión total y también, de la reducida contribución de las tensiones de Reynolds.

Respecto a las velocidades de fricción estimadas con la ley logarítmica, ya se ha comentado en en líneas anteriores la correlación de esta variable con el tipo de ensayo, de población o de tallas, así como con el modo de movilización de los moluscos (ver apartado 5.2.7.1, Figura 5.8).

5.2.8. Desarrollo de funciones de transporte de fondo

Como se ha comentado, se han ajustado varias fórmulas adimensionales para relacionar el transporte de fondo de los bivalvos, en términos de los parámetros de movilidad adimensionales Φ_q y Φ_E , con el parámetro de estabilidad de Shields Ψ .

Las variables relacionadas con la geometría y densidad de los moluscos fueron determinadas previamente en el estudio de caracterización de los berberechos (§5.2.4, §Tabla 5.1). Las velocidades de fricción empleadas para determinar el parámetro de Shields son las calculadas a partir de la ley logarítmica de velocidades. El procedimiento se aplicó con las velocidades de fricción de los ensayos de fondo liso (sin moluscos), porque las velocidades de corte correspondientes a cada configuración experimental presentaban más dispersión. Además, de este modo las funciones de transporte se podrán aplicar para evaluar, p.ej. con un modelo numérico, en qué áreas de la desembocadura del Ulla y bajo qué caudales es previsible que se produzca la movilización de los moluscos.

Las funciones de transporte de mejor ajuste para los ensayos de grupos de tallas y de poblaciones no son las mismas, como se puede observar en la Figura 5.12. Las diferencias están relacionadas fundamentalmente con la pendiente de la relación $\Psi - \Phi$, mayor para los ensayos de poblaciones. Esta mayor pendiente físicamente significa que la respuesta del lecho ante incrementos en la tensión tangencial sobre el fondo es más rápida.

En la Figura 5.12 (en color negro) también se han representado las nuevas funciones de transporte ajustadas con todos los datos:

$$\Phi_q = 0.00684 \cdot \Psi_s^{0.97742} \quad (5.3)$$

$$\Phi_E = 0.00020672 \cdot \Psi_s^{1.2311} \quad (5.4)$$

donde Φ_q , Φ_E son las variables adimensionales de transporte de caudal sólido y del ratio de movilización volumétrica y Ψ_s es el parámetros de Shields (ver más detalles en 4.2.5.)

El coeficiente de correlación cruzada determinado, $R^2=0.76$ y 0.75 para las ecuaciones (5.3) y (5.4) respectivamente, es ligeramente inferior al de los ajustes realizados individualmente para los ensayos de grupos de tallas y poblaciones estacionales. También se puede apreciar como las nuevas funciones se asemejan más a las determinadas para los ensayos de tallas, especialmente la función de transporte de caudal sólido, porque existen más determinaciones experimentales en estos ensayos.

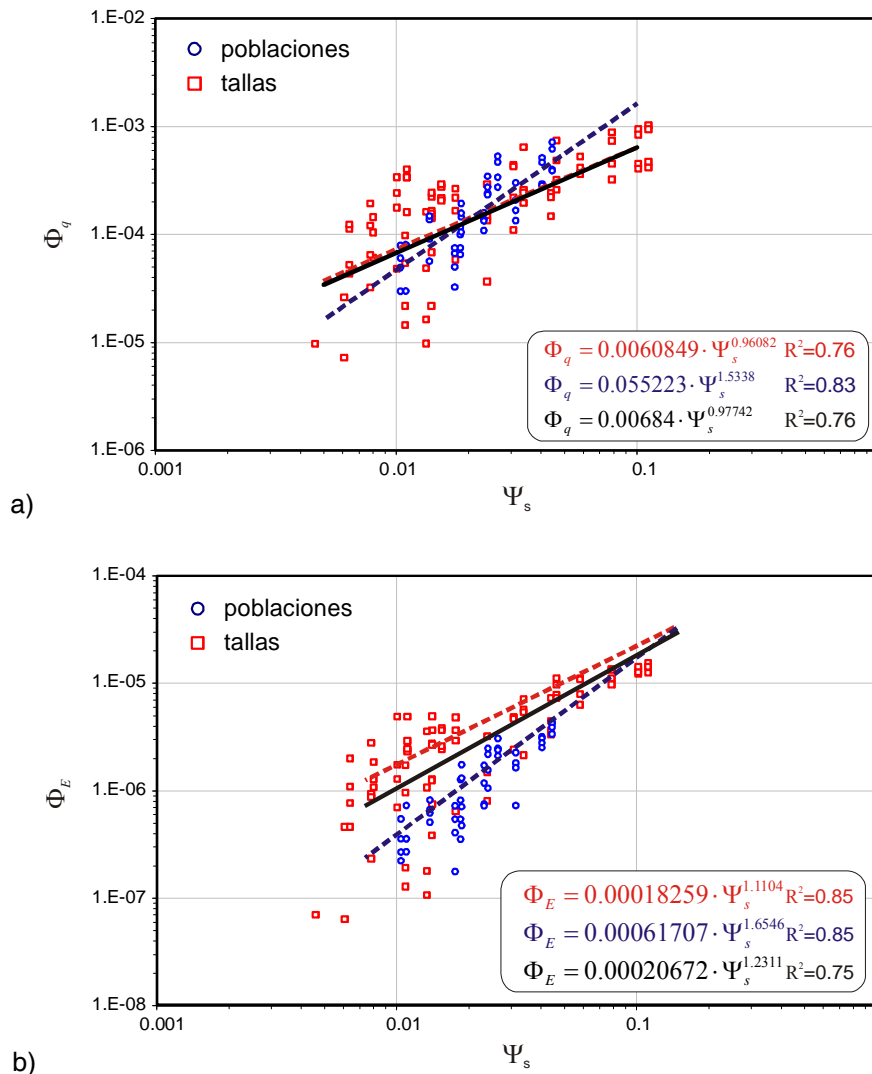


Figura 5.12. Funciones de transporte de a) caudal sólido adimensional Φ_q y b) de ratio de movilización volumétrico Φ_E y el parámetro de Shields Ψ_s obtenidas en los ensayos de tallas (color rojo), de poblaciones (color azul) y con todos los datos disponibles (en color negro).

5.3. CONCLUSIONES

El principal objetivo de esta tesis es mejorar el conocimiento de los procesos hidrodinámicos de movilización y recolocación del molusco *Cerastoderma edule* del banco marisquero de los Lombos do Ulla. Para ello se han realizado varias series de ensayos en un canal de recirculación en forma hipódromo en los que se han determinado los porcentajes de berberechos arrastrados en función de varios factores. Las variables analizadas han sido el tamaño, la densidad de reclutamiento, el estado y la velocidad de la corriente. La elección de los parámetros o factores experimentales se ha realizado en base a lo recogido en la literatura, pero particularizado para la realidad de la zona de estudio.

Para determinar los campos de velocidades y esfuerzos turbulentos se ha aplicado con éxito la técnica Particle Image Velocimetry. Las determinaciones experimentales realizadas con este equipo, la interacción entre las variables hidrodinámicas y la movilización de los bivalvos y su análisis detallado son el núcleo de esta tesis. Además, para el correcto desarrollo de la metodología experimental se diseñaron y pusieron en funcionamiento una serie de instalaciones, como el canal de ensayo y un acuario para aclimatar y conservar los berberechos. Con ayuda del Laboratorio de Microbiología de la UDC se desarrolló un protocolo para alimentar a los bivalvos durante la fase experimental.

Se ha descrito el procedimiento de evaluación de imágenes PIV, poniendo de manifiesto la importancia de desarrollar una metodología que contemple: (i) un buen montaje del equipo de acuerdo con las reglas del PIV, (ii) mecanismos adecuados de preprocesado y postprocesado de las imágenes, para eliminar efectos como no uniformidades en el campo de visión y, (iii) una correcta selección de los algoritmos de evaluación de imágenes, adecuado al número de imágenes a procesar y al tipo de análisis a realizar. En las imágenes adquiridas, ha funcionado bien un procedimiento de malla decreciente, sin ventanas deformables, y una última, y única, iteración con una ventana deformable de $32 \times 32 \text{ px}^2$ con un solape del 75%.

Debido a la configuración geométrica de los ensayos, realizados con una relación $B/H \sim 3.33$, y a la posición del plano de medida, las variables hidrodinámicas determinadas en los mismos estaban afectadas por la presencia de corrientes secundarias. Los principales efectos de las corrientes secundarias sobre la estructura del flujo descritos en la literatura (descenso de la posición de la velocidad máxima, cambios en la distribución de tensiones de Reynolds) han sido correctamente identificados y cuantificados con ayuda de la técnica PIV.

Mediante la metodología del doble promediado se han determinado correctamente los principales parámetros descriptores del flujo así como las distribuciones de velocidades, intensidades y tensiones, con sus términos turbulentos o de Reynolds y los términos de forma o dispersivos. Esta metodología se presenta como una herramienta muy prometedora y versátil para estudiar flujos sobre y a través de contornos irregulares. Esta técnica, además se complementa muy bien con el PIV, y permite analizar y extraer conclusiones de la información espacial contenida en los campos vectoriales.

En el análisis realizado se ha puesto de manifiesto la importancia de las corrientes secundarias, especialmente intensas porque las determinaciones se realizaron fuera del plano central del canal, y la tridimensionalidad del flujo provocada por la rugosidad introducida en la sección de análisis por los berberechos. Este análisis ha sido posible porque el montaje experimental del equipo PIV ha permitido determinar de un modo satisfactorio las componentes de la velocidad sobre y a través del lecho de berberechos.

Respecto a la movilización de los berberechos se puede señalar que se ha aplicado una metodología estadística, basada en el análisis exploratorio y las técnicas de análisis de la varianza, que ha permitido discernir qué factores contribuyen al proceso de arrastre de los bivalvos. Se ha revelado un comportamiento diferenciado de los berberechos en los ensayos de grupos de tallas y de poblaciones estacionales respecto a la velocidad de flujo. Así, en los ensayos de tamaños homogéneos se ha comprobado que la interacción entre el transporte de sedimentos y de moluscos, se refleja en un descenso relativo de la velocidad de fricción y de la movilización de los berberechos de las tallas menores de 30 mm para las velocidades intermedias. Este descenso se atribuye a que el transporte de fondo de arena puede enterrar a los moluscos antes de que estos sean arrastrados. En las poblaciones estacionales la relación entre velocidad y movilización es aproximadamente proporcional.

También se ha encontrado una correlación entre la velocidad de fricción y el grado de movilización de los moluscos con el reclutamiento. Así, con las densidades más bajas se produce un incremento medio de las velocidades de corte y del transporte de moluscos. Con respecto a la talla, en términos medios el arrastre es inversamente proporcional al tamaño de los moluscos. El factor estado (vivo/muerto) ha sido el menos determinante en la movilización.

Como se ha comentado, los parámetros hidrodinámicos y las distribuciones de velocidades, intensidades turbulentas y tensiones están afectados por las corrientes secundarias y la tridimensionalidad del flujo cerca del lecho. Así, se ha encontrado que la posición del punto de velocidad máxima, la magnitud de las intensidades turbulentas de forma verticales y de las tensiones de forma están afectadas por el grado de reclutamiento. Se ha demostrado que los resultados obtenidos están dentro del orden de magnitud que se maneja en los trabajos de la literatura sobre lechos rugosos.

Se ha hecho patente la importancia de las corrientes secundarias en la determinación de los esfuerzos de Reynolds, y su extrapolación para la obtención de la tensión total sobre el lecho. Si no se contemplase este efecto, se podrían subestimar las tensiones sobre el lecho, determinadas como $\bar{\tau}_b \equiv \rho u_*^2$, entre un ~50% y ~75% para los ensayos de fondo con el lecho de arena y con el lecho cubierto de berberechos. Estas relaciones reflejan que la rugosidad provocada por los berberechos favorece la tridimensionalidad del flujo que provoca un incremento de la componente de la tensión de Reynolds fuera del plano vertical uw . Este hecho también ha sido constatado en la literatura en trabajos de flujos rugosos sobre traviesas bidimensionales (Coleman *et al.*, 2007).

Por todo lo expuesto, se puede concluir que el fenómeno de arrastre del *C. edule* es un proceso complejo en el que interactúan factores como la velocidad de fricción, el transporte de los sedimentos que forman el sustrato de los organismos bentónicos, el estado (p.ej. capacidad de enterrarse o de modificar la estructura de la capa límite a través de la actividad filtradora) y el tamaño y distribución de los bivalvos. Otros factores como la redistribución de la forma del lecho durante los experimentos por la movilización de los moluscos, también pueden afectar al grado de exposición o de ocultamiento de los moluscos, y por tanto al arrastre.

A pesar de la complejidad de este fenómeno, se han ajustado varias funciones de transporte de fondo que permitirán, con ayuda de un modelo numérico, profundizar en el conocimiento de la dinámica del berberecho en los Lombos do Ulla, así como analizar y predecir situaciones de arrastre del stock en función de variables como el caudal desaguado por el río Ulla o las condiciones de marea. Este desarrollo servirá de herramienta para analizar y mejorar la gestión conjunta de las centrales de punta del tramo bajo del Ulla, ya que se podrá estudiar la influencia de la explotación conjunta de estos saltos hidroeléctricos en este fenómeno.

5.4. TRABAJOS FUTUROS

Algunos de los trabajos y mejoras experimentales que se podrán desarrollar en los ámbitos que propone esta Tesis Doctoral son los siguientes:

Sobre la experimentación y la aplicación de la técnica PIV

En primer lugar se propone la realización de nuevos ensayos para caracterizar el flujo en el canal de ensayo de recirculación en varios planos verticales y horizontales para estimar los efectos de las corrientes secundarias sobre la estructura del flujo. Estos ensayos se podrían emplear para fijar de forma definitiva los deflectores a la estructura del canal.

Además, se debe seguir trabajando para mejorar las metodologías de adquisición de imágenes para poder aprovechar toda la potencialidad del equipo PIV. Aunque desde las primeras experiencias de este doctorando con esta herramienta se han logrado grandes avances (p.ej. en la determinación de parámetros turbulentos, mejora de la resolución espacial, reducción de la incertidumbre experimental), es necesario desarrollar nuevos procedimientos y metodologías de análisis de la información que permitan sacar más partido a este equipo. Algunos aspectos que se deben contemplar son los siguientes:

- Montajes experimentales que contemplen las reglas del PIV, enunciadas en el Capítulo 3.
- Minimizar los efectos y problemas ópticos que afecten a la evaluación de las imágenes: tamaño adecuado de partículas, manchas y gotas en la pared acristalada del canal, minimizar las reflexiones a través de un adecuado ajuste del plano y potencia del láser, etc.
- Reducir el efecto de las variaciones de la lámina libre en la intensidad de las imágenes colocando una forma aerodinámica sobre la superficie libre, p.ej. con forma de ala de avión. Esta metodología se ha aplicado con éxito en varios trabajos encontrados en la literatura.
- Aplicar de un modo sistemático procedimientos de pre y postprocesado de las imágenes y campos vectoriales para reducir el número de vectores anómalos en los campos de imágenes.

La máxima de estos procedimientos se puede resumir en intentar mejorar todos los aspectos previos a la captura de imágenes (magnificación adecuada, reducción de reflexiones, número y tamaño adecuado de partículas, etc.) porque una vez registrada la imagen, es más difícil y costoso mejorar la calidad de los resultados.

Además, al procesar un gran número de imágenes es imprescindible realizar un análisis de los tiempos de cálculo y la precisión de los campos obtenidos, porque el incremento de tiempo en refinar el procedimiento es factorial. En un futuro, con los nuevos algoritmos de ventanas adaptativas será imprescindible realizar este procedimiento.

También es fundamental seguir al tanto de las mejoras que se producen en las técnicas de evaluación de imágenes y realizar un adecuado mantenimiento del equipo para minimizar los problemas que, siempre surgen, cuando se realizan los experimentos.

Otras asignaturas pendientes en las que se trabaja en la actualidad son la realización de medidas simultáneas con el equipo PIV y la técnica LIF (Laser Induced Fluorescente). De este modo se podrán estudiar mejor los procesos de mezcla y flujos de cortadura en algunas investigaciones aplicadas sobre los procesos de dilución y dispersión de contaminantes de vertidos por emisario submarino o el estudio de flujos estratificados. También sería conveniente desarrollar experimentos de PIV estereoscópico, SPIV, para evaluar la importancia de la

tridimensionalidad de flujos como los producidos sobre lechos muy rugosos. Sin embargo, con este fin es necesario disponer de una nueva cámara similar a la adquirida recientemente por el CITEEC.

Sobre la metodología del doble promediado y su aplicación a nuevos ensayos

La metodología del doble promediado se podría aplicar en nuevos ensayos de arrastre de otro tipo de molusco, o también sobre lechos rugosos fijos constituidos por gravas o por parches de moluscos pegados a un sustrato arenoso. De este modo, empleando el mismo lecho para todos los ensayos, sería posible buscar distribuciones genéricas o universales para las velocidades y tensiones en función de la talla o el grado de reclutamiento. Otras nuevas líneas para los ensayos de arrastre consistirían en ampliar el número de organismos y especies analizadas, emplear tamaños más pequeños y diferentes tipos de sustrato (fangos, arenas finas, etc).

Estos, y otros ensayos, deben ir en la línea de aprovechar e incrementar las capacidades del equipo PIV y de la técnica DAM. Así, se podría realizar un análisis más detallado de flujos con menor sumergencia, con resoluciones espaciales del orden o incluso inferiores al milímetro. Se podrían analizar nuevas configuraciones de lechos bi o tridimensionales como traviesas o dunas, y estudiar el efecto de la separación o el grado de sumergencia en la estructura de las tensiones turbulentas y dispersivas. Además del equipo PIV, las determinaciones experimentales se pueden complementar con sensores de presión, para evaluar los esfuerzos de arrastre de forma y viscosos sobre el lecho, y con los nuevos equipos ADV y ADVP disponibles en el CITEEC. De este modo, se podrían integrar la información espacial detallada proporcionado por la técnica de visualización del flujo con la información temporal de estas herramientas (~30 Hz para el perfilador y hasta ~200 Hz con el nuevo ADV Nortek© Vectrino).

Un nuevo campo a explorar para el estudio de la turbulencia lo proporcionan las herramientas deterministas de análisis de estructuras coherentes y patrones organizados esbozados en el Capítulo 2. En la actualidad se comienza a considerar, y a comprobar, que las estructuras coherentes son las responsables de la producción y disipación de la energía turbulenta, por lo que su análisis y comprensión es de vital importancia para tener un buen conocimiento de la dinámica de un flujo turbulento. Estas herramientas de análisis en el dominio del tiempo, p.ej. el estudio de cuadrantes y eventos de inyección y eyección de paquetes de fluido en la capa límite, se puede completar con el análisis de patrones persistentes en el espacio a través de los campos de perturbaciones espaciales de la velocidad y de los esfuerzos de corte, introducidos en esta Tesis Doctoral.

Sobre el estudio de movilización de berberechos

En lo relativo al estudio de arrastre de berberechos se pueden realizar nuevos experimentos como los propuestos en líneas anteriores, que permitan analizar el proceso en tallas más pequeñas, en otras mezclas de tamaños, en nuevos organismos como p.ej. almejas y también, con otros sustratos representativos de otros bancos marisqueros.

Además de estos trabajos, queda pendiente el introducir las funciones de transporte aquí determinadas, o incluso otras más sofisticadas basadas en otros conceptos como el transporte lagrangiano o formulaciones estocásticas, en un modelo numérico. En la actualidad se está desarrollando un módulo de hábitat para este molusco que se implementará en el código de volúmenes finitos bidimensional del GEAMA, y que permitirá profundizar en los fenómenos de arrastre y recolocación del stock de berberechos en los Lombos do Ulla.

5.5. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Aberle, J., Koll, K. y Dittrich, A. (2008). "Form induced stresses over rough gravel-beds." *Acta Geophysica* 56(3): 584-600.
- Anta, J. (2006). *Estimación de los parámetros hidrodinámicos que caracterizan el proceso de transporte y sedimentación de los berberechos*. Trabajo de Investigación Tutelado. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. 39 pp.
- Anta, J., Peña, E. y Puertas, J. (2007). "Análisis hidrodinámico del arrastre del berberecho *Cerastoderma edule* de los Lombos do Ulla." *Revista Real Academia Galega das Ciencias XXVI*: 53-90.
- Buffington, J.M. y Montgomery, D.R. (1997). "A Systematic Analysis of Eight Decades of Incipient Motion Studies, With Special Reference to Gravel-Bedded Rivers." *Water Resources and Research* 33(8): 1993-2029.
- Cameron, S.M., Nikora, V. y Coleman, S. (2008). "Double-averaged velocity and stress distributions for hydraulically-smooth and transitionally-rough turbulent-flows." *Acta Geophysica* 56(3): 642-653.
- Coleman, S., Nikora, V., McLean, S. y Schlicke, E. (2007). "Spatially averaged turbulent flow over square ribs." *Journal of Engineering Mechanics* 133(2): 194-204.
- de Montaudouin, X., Bachelet, B. y Sauriau, P.-G. (2003). "Secondary settlement of cockles *Cerastoderma edule* as a function of current velocity and substratum: a flume study with benthic juveniles." *Hydrobiologia* 203: 103-116.
- Detert, M. (2008). *Hydrodynamic Processes at the water-sediment interface of streambeds*. *Civil Engineering, Geo- and Environmental Science*, University Fridericiana. PhD Dissertation: 139 págs.
- Eckman, J.E. (1996). "Closing the larval loop: linking larval ecology to the population dynamics of marine benthic invertebrates." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 200: 207-237.
- Finnigan, J.J. (2000). "Turbulence in plant canopies." *Annual Review of Fluid Mechanics* 32: 519-571.
- García, M.H. (2006). *Lecture Notes on Sediment Transport*. University of Illinois at Urbana-Champaign. 192.
- González, R. y Pérez, A. (1984a). *El Berberecho Cerastoderma Edule (L.), de Carril (Ría de Arousa) II: Reclutamiento, mortalidad natural y producción*. IV Simposio Ibérico de Estudos do Benthos Mariño. Lisboa (Portugal): 223-243 págs.
- González, R. y Pérez, A. (1984b). *El Berberecho Cerastoderma Edule (L.), de Carril (Ría de Arousa) I: reproducción y estado de condición*. IV Simposio Ibérico de Estudos do Benthos Mariño. Lisboa (Portugal): 209-222 págs.
- Hendriks, I.E. (2004). *Flow dependent processes in settlement of intertidal bivalve larvae*. *The Department of Ecosystem Studies*. Yerseke, University of Groningen. PhD: 146 págs.
- Hiddink, J.G., Kock, R.P. y Wolff, W.J. (2002). "Active pelagic migrations of the bivalve *Macoma balthica* are dangerous." *Marine Biology* 140: 1149-1156.
- Hunt, H.L. (2004). "Transport of juvenile clams: effects of species and sediment grain size." *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 312(2): 271-284.
- Hunt, H.L., Maltais, M.-J., DFugate, D.C. y Chant, R.J. (2007). "Spatial and temporal variability in juvenile bivalve dispersal: effects of sediment transport and flow regime." *Marine Ecology Progress Series* 352: 145-159.
- Jiménez, J. (2004). "Turbulent flow over rough walls." *Annual Review of Fluid Mechanics* 36: 173-196.
- Jonsson, P.R., van Duren, L.A., Amielh, M., Asmus, R., Aspden, R.J., Daunys, D., Friedrichs, M., Friend, P.L., Olivier, F., Pope, N., Precht, E., Sauriau, P.G. y Schaaff, E. (2006). "Making water flow: a comparison of the hydrodynamic characteristics of 12 different benthic biological flumes." *Aquatic Ecology* 40(4): 409-438.
- Kironoto, B.A. y Graf, W.H. (1994). "Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy* 106(4): 333-344.
- Manes, C., Pokrajac, D. y McEwan, I. (2007). "Double-averaged open-channel flows with small relative submergence." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 896-904.

- Mignot, E., Barthelemy, E. y Hurther, D. (2009). "Double-averaging analysis and local flow characterization of near-bed turbulence in gravel-bed channel flows." *Journal of Fluid Mechanics* 618: 279-303.
- Nezu, I. y Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*. Rotterdam, A.A. Balkema
- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D. y Walters, R. (2007a). "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 873-883.
- Nikora, V., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D., McEwan, I., Campbell, L., Aberle, J., Clunie, D. y Koll, K. (2007b). "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Applications." *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 884-895.
- Nikora, V. (2008). *River Hydrodynamics: Basics, Double Average Methodology and Turbulence. Lecture Notes. Int. Summer School. Complex Flows, Turbulence, Morphodynamics and Ecology in Rivers*. Delft, TU Delft
- Nikora, V. y Rowinski, P.M. (2008). "Rough-bed flows in geophysical, environmental, and engineering systems: Double-Averaging Approach and its applications." *Acta Geophysica* 56(3): 529-533.
- Nikora, V. (2009). "Hydrodynamics of Aquatic Ecosystems: An interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics." *River Research and Applications*(in press).
- Nobach, H. y Bodenschatz, E. (2009). "Limitations of accuracy in PIV due to individual variations of particle image intensities." *Experiments in Fluids* in press: 12.
- Nowell, A.R.M. y Jumars, P.A. (1984). "Flow Environments of Aquatic Benthos." *Annual Review of Ecology and Systematics* 15: 303-328.
- Nowell, A.R.M. y Jumars, P.A. (1987). "Flumes: Theoretical and Experimental Considerations for Simulation of Benthic Environments." *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 25: 91-112.
- Olivera, A.M. y Wood, W.L. (1997). "Hydrodynamics of bivalve shell entrainment and transport." *Journal of Sedimentary Research* 67(3): 514-526.
- Olivier, F. y Retière, C. (2006). "How to leave or stay on the substratum when you can't swim? Evidence of the role of mucus thread secretion by postlarvae of *Pectinaria koreni* (Malmgren) in still water and flume experiments." *Aquatic Ecology* 40(4): 503-519.
- Parada, J.M., Molares, J., Sánchez-Mata, A., Martínez, G., Darriba, C. y Mariño, J. (2006). "Plan de actuación para la recuperación del banco "Lombos do Ulla": Campañas marisqueras desde 2002 a 2005." *Revista Galega dos Recursos Mariños* 1(1): 1-37.
- Parada, J.M., Molares, J. y Otero, X. (2007). *Episodios de mortalidad en el banco marisquero "Lombos do Ulla" (Ría de Arousa - NO de España) deducidos a partir de datos meteorológicos de los últimos 45 años. XI Congreso Nacional de Acuicultura*. Vigo: 943-946 págs.
- Parada, J.M. y Molares, J. (2008). "Natural mortality of the cockle *Cerastoderma edule* (L.) from the Ria of Arousa (NW Spain) intertidal zone." *Revista de Biología Marina Y Oceanografía* 43(3): 501-511.
- Parker, G. (1989). "Surface-Based Bedload Transport Relation for Gravel Rivers." *Journal of Hydraulic Research*.
- Pedras, M.H.J. y de Lemos, M.J.S. (2001). "Macroscopic turbulence modeling for incompressible flows through underformable porous media." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44: 1081-1093.
- Peña, E., Anta, J., Puertas, J. y Teijeiro, T. (2008). "Estimation of Drag Coefficient and Settling Velocity of the Cockle *Cerastoderma edule* Using Particle Image Velocimetry." *Journal of Coastal Research* 24 (4C): 150-158.
- Pokrajac, D., Campbell, L., Nikora, V., Manes, C. y McEwan, I. (2007). "Quadrant analysis of persistent spatial velocity perturbations over square-bar roughness." *Experiments in Fluids* 2007(42): 413-423.
- Pokrajac, D., McEwan, I. y Nikora, V. (2008). "Spatially averaged turbulent stress and its partitioning." *Experiments in Fluids* 45: 73-83.
- Rapauch, M.R. y Shaw, R.H. (1982). "Averaging procedures for flow within vegetation canopies." *Boundary-Layer Meteorology* 22: 77-90.

- Raupach, M.R., Antonia, R.A. y Rajagoplan, S. (1991). "*Rough-wall turbulent boundary layers.*" Applied Mechanics Review 44: 1-24.
- Roegner, C., André, C., Lindegarth, M., Eckman, J.E. y Grant, J. (1995). "*Transport of recently settled soft-shell clams (Mya arenaria L.) in laboratory flume flow.*" Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 187: 13-26.
- Sidgursson, J.B., Titman, C.W. y Davies, P.A. (1976). "*The dispersal of young post-larval bivalve molluscs by byssus threads.*" Nature 262: 386-387.
- Song, T. (1994). *Velocity and turbulence intensities distribution in non-uniform and unsteady open-channel flow.* Laussane, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. PhD Degré
- St-Onge, P. y Miron, G. (2007). "*Effects of current speed, shell length and type of sediment on the erosion and transport of juvenile softshell clams (Mya arenaria).*" Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 349(1): 12-26.
- Stanislas, M., Okamoto, K., Kähler, C.J., Westerweel, J. y Scarano, F. (2008). "*Main results of the third international PIV challenge.*" Experiments in Fluids 47: 27-71.
- Thompson, C.E.L. y Amos, C.L. (2002). "*The impact of mobile disarticulated shells of Cerastoderma edulis on the abrasion of a cohesive substrate.*" Estuaries 25(2): 204-214.
- Underwood, A.J. (1997). *Experiments in Ecology. Their logical design and interpretation using analysis of variance.* Cambridge, Cambridge University Press
- Wang, X., Wang, Z.Y., Yu, M. y Li, D. (2001). "*Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-law and wake-law.*" Journal of Hydraulic Research 39(2): 211-217.
- Whitaker, S. (1999). *The method of volume averaging.* Dordrecht, Kluwer Academic Press
- Yankson, K. (1986). "*Observation on byssus systems in the spat of Cerastoderma Glaucum and C. Edule.*" Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 66: 277-292.

NOTACIÓN

Símbolos Latinos

a	Desplazamiento de la partícula
A	Área de una sección
A_b, A_w	Área de la sección correspondiente al área de influencia del lecho y la pared respectivamente, ver ecuación (2.70)
B	Constante de integración de la ley logarítmica de velocidades. Anchura de la sección
B_r	Constante de integración de la ley logarítmica para lechos rugosos
B_{vD}	Factor de amortiguamiento de la función de la función de Van Driest
$c(z)$	Concentración volumétrica
C	Constante de integración para la ley lineal de velocidades en la zona rugosa. Constante universal de Kolgomorov para el autoespectro de velocidades en el rango inercial $C \sim 0.5$
$C_{0.05}$	Concentración volumétrica de sedimentos en suspensión para $z/H=0.05$
C_D	Coeficiente de arrastre
C_L	Coeficiente de sustentación
$C_i = [C_u, C_v, C_w]$	Constante empírica para definir las intensidades turbulentas
C_ϕ	Constante de almacenamiento para la ley lineal de velocidades en la zona rugosa en lechos permeables
d	Diámetro característico.
d_f	Diámetro de poro
d_p	Diámetro de partícula
d_r	Tamaño de píxel
d_s	Diámetro máximo limitado por la difracción
d_τ	Tamaño de la partícula visualizada en la imagen
D	Tamaño de grano
D_a	Número de diafragma
$D_i = [D_u, D_v, D_w]$	Constante empírica para definir las intensidades turbulentas
D_{Tv}	Transferencia turbulenta y viscosa de la energía turbulenta
D_O	Detectabilidad del desplazamiento del pico de la función de correlación cruzada

E	Ratio de movilización volumétrico de sedimentos
E_{11}	Función de densidad espectral en el subrango inercial
f	Distancia Focal
f_{p_i}	Fuerzas de arrastre de presión
f_{v_i}	Fuerzas de arrastre viscosas
f_x	Suma de las fuerzas de arrastre por unidad de volumen
$f^\#$	Número de apertura
F_D	Fuerza de arrastre
F_L	Fuerza de sustentación
F_I	Factor que la pérdida de correlación por el movimiento de las partículas en el plano
F_O	Factor que contempla la pérdida de correlación por el movimiento de las partículas fuera de plano
F_A	Pérdida de correlación por la existencia de un gradiente de velocidades dentro de la ventana
$Fr \equiv Fr_h$	Número de Froude
Fr	Número de Froude
$Fr_{*\Delta}$	Número de Froude densimétrico o Parámetro de Shields Ψ_s
G	Ratio de producción o generación de energía
g	Aceleración gravitatoria
g_i	i -ésima componente de la aceleración gravitatoria
h, H, H_m	Calado del flujo
$H_m / \Delta \equiv H / \Delta$	Sumergencia relativa del flujo
(i, j, k)	Direcciones principales en el sistema de referencia cartesiano.
$I_1(\mathbf{X}), I_2(\mathbf{X})$	Campos de intensidades del primer y segundo frame
$\langle I_1 \rangle$	Campos medio de la de intensidades del primer frame
$I_1'(\mathbf{X})$	Fluctuación de la de intensidades del primer frame
k	Número de onda. Energía cinética turbulenta
k_b, k_w	Rugosidad equivalente del lecho y de la pared del cauce
k_E	Energía cinética turbulenta

k_f	Permeabilidad del medio
k_s	Longitud o rugosidad equivalente de Nikuradse
K	Permeabilidad intrínseca del medio
K_{u_i}	Coefficiente de Kurtosis
K_z	Coefficiente de mezcla vertical turbulenta
l_c	Longitud de corte que caracteriza el flujo en la capa interfásica
l_M^+	Longitud de mezcla de Prandtl en coordenadas internas
M_0	Magnificación de la imagen
n_i	i-ésima componente del vector normal a la superficie
n, N	Número de registros temporales/experimentales disponibles
N_I	Número de partículas de la ventana de interrogación
p	Presión
\bar{p}	Valor promedio temporal de la variable presión
p'	Parte fluctuante de la variable presión
P_m	Perímetro mojado de una sección
Pe	Número de Peclet, $Pe = \frac{w_s H}{K_z}$
q_s	Caudal sólido específico de transporte de fondo
r	Residuo
R^2	Coefficiente de correlación estadística
$R(s)$	Función de correlación cruzada espacial
$R_C(s)$	Correlación cruzada de la imagen media
$R_D(s)$	Correlación cruzada de la fluctuación
$R_D'(s)$	Término de la correlación que representa las correlaciones aleatorias
Re	Número de Reynolds
Re_s	Número de Reynolds granular, también definido como k_s^+
$R_F(s)$	Correlación cruzada de la media con la fluctuación
R_H	Radio hidráulico de una sección

Ro	Número de Rouse, $Ro = \frac{W_s}{\kappa u_*}$
S	Superficie
S_b	Pendiente del lecho
S_{int}	Superficie de la interfase entre el lecho y el fluido
S_o	Pendiente motriz
S_{u_i}	Coefficiente de Asimetría
S_{uu}	Velocidad espectral
SF	Factor de forma del sedimento
t	Tiempo
$t_{hit}(z)$	Tiempo que tarda una partícula en sedimentar desde una altura z
T_f	Tiempo total del intervalo de promediado en el cual un punto está ocupado por un fluido
T_0	Tiempo total del intervalo en el que se realiza el promediado
(u, v, w)	Vector de velocidades instantáneas
(u', v', w')	Fluctuaciones temporales de las tres componentes del vector velocidad
$(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$	Media temporal de las tres componentes del vector velocidad
$(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$	Perturbación espacial de las tres componentes del vector velocidad
u_*	Velocidad de corte o de fricción característica
u_{*0}	Velocidad de corte o de fricción característica estimada a partir de la pendiente motriz
u_{*b}	Velocidad de corte o de fricción característica estimada a partir de la tensión tangencial total sobre el lecho para un flujo cualquiera
$u_{*,log}$	Velocidad de fricción estimada a partir de la ley logarítmica
$u_{*,uw}(z=0)$	Velocidad de fricción extrapolada del perfil de tensiones de Reynolds en $z=0$
$u_{*,uw}(z=z_c)$	Velocidad de fricción extrapolada del perfil de tensiones de Reynolds en $z=z_c$
$u_{*max,uw}$	Velocidad de fricción determinadas a partir de la tensión máxima.
	$-\rho \langle \overline{u'w'} \rangle - \rho \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle$
$\overline{u'^2}$	Intensidad turbulenta en la dirección horizontal

$\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle^2$	Intensidad turbulenta de forma en la dirección horizontal
U	Velocidad media de la sección
U_{max}	Velocidad máxima de la corriente
U_p	Velocidad de las partículas
U_{ref}	Velocidad de referencia
U_s	Diferencia entre la velocidad de las partículas y la del fluido
$U_{0.05C}$	Velocidad media a 0.05 z/H para aguas claras
$U_{0.05S}$	Velocidad media a 0.05 z/H con transporte de sedimentos
U^+	Variable U normalizada con la escala interna
V_f	Volumen que ocupa un fluido
V_0	Volumen total de una región
$w(z/h)$	Función de estela
$\overline{w'^2}$	Intensidad turbulenta en la dirección vertical
$\langle \tilde{w}\tilde{w} \rangle^2$	Intensidad turbulenta de forma en la dirección vertical
w_s	Velocidad de sedimentación
$W(x)$	Función de promediado que determina el dominio de la ventana de interrogación en cada imagen $I(x)$
(x, y, z)	Sistema de coordenadas cartesianas
x_i	Coordenada espacial
y	Dimensión lateral del flujo
z^+	Calado adimensionalizado respecto a la longitud característica de la capa límite viscosa
z_0	Rugosidad característica equivalente de la ley logarítmica de velocidades. Distancia del plano de la imagen a la lente
z_t	Altura de la posición de los senos del lecho
z_{ws}	Altura media de la superficie del agua
z_c	Altura de la parte superior del lecho
z_R	Altura de la capa rugosa
Z_0	Distancia del plano del objeto real a la lente

Símbolos Griegos

α	Constante de Kolmogorov. Coeficiente de Coriolis. Coeficiente de ajuste. Error estadístico de Tipo I.
β	Parámetro de no uniformidad de momentum. Gradiente adimensional longitudinal de presiones. Parámetro de ajuste. Error estadístico de Tipo II.
γ	Peso específico del fluido
δ	Espesor de la capa límite
δ_{ij}	Delta de Kronecker
δ_h	Calado en el que se produce la velocidad máxima
δ_h / H	Posición relativa del punto de velocidad máxima
δ_R	Espesor de la capa rugosa
$\delta_t, \Delta t$	Intervalo de tiempo entre disparos de las dos fuentes láser Nd:YAG
δ_v	Longitud característica de la capa límite viscosa
δ_z	Profundidad de campo
δ'	Calado a partir del cual la relación entre la intensidad turbulenta y la velocidad máxima al cuadrado es constante ($u'^2(\delta')/U_{max}^2 : cte$)
Δ	Rugosidad del lecho $\Delta = z_c - z_t$
Δu	Variación de la velocidad entre disparos de las dos fuentes láser Nd:YAG
ΔU^+	Descenso de la velocidad interna cuando el flujo se convierte en rugoso
Δz_0	Espesor del plano de luz
$ \Delta z $	Aumento del desplazamiento de las partículas en perpendicular al plano de luz láser
ε	Tasa de disipación de energía cinética turbulenta. Umbral de aceptación de un vector en los algoritmos de postprocesado.
η	Microescala de Kolmogorov de longitud
θ	Variable genérica del flujo
$\bar{\theta}$	Media temporal intrínseca de una variable genérica del flujo
$\bar{\theta}^s$	Media temporal superficial de una variable genérica del flujo
θ'	Fluctuación temporal de una variable genérica del flujo
$\tilde{\theta}$	Perturbación espacial de una variable genérica del flujo
κ	Constante universal de Von Kármán
λ	Longitud de onda

μ	Viscosidad dinámica del fluido
ϕ	Función de rugosidad del lecho
ϕ_t	Función de rugosidad temporal del lecho
ϕ_s	Función de rugosidad espacial del lecho
Φ	Flujo de partículas que sedimentan
$\Phi = f(\Psi)$	Función de movilidad del sedimento, Φ_q, Φ_E
Π	Parámetro de estela de Coles
ρ	Densidad del fluido
ρ_p	Densidad de partícula
ρ_w	Densidad del fluido
σ	Intensidad turbulenta
σ_z	Desviación estándar de la función de rugosidad de lecho
$\overline{\tau_b}$	Tensión tangencial sobre el lecho
τ_{ij}	Tensor de tensiones tangenciales
τ_0	Tensión tangencial sobre el contorno
τ_c	Tensión tangencial crítica
$\overline{\tau_w}$	Tensión tangencial sobre las paredes
$\tau_{xz} = -\overline{u'w'}$	Esfuerzos de Reynolds
τ_η	Microescala de Kolgomorov de tiempos
ν	Viscosidad cinemática del fluido
ν_t	Viscosidad de remolino o <i>eddy viscosity</i>
ν_η	Microescala de Kolgomorov de velocidades
ω	Frecuencia angular. Función empírica de estela.
$\psi = \sum dy$	Suma de todas las rugosidades en la dirección y en el volumen total V_o
Ψ_s	Parámetro de Shields
$\overline{\boldsymbol{\Omega}} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$	Vector de vorticidad

Matemáticas

$\langle \bullet \rangle$	Promediado espacial intrínseco. Media de conjunto o <i>ensemble averaged</i> .
$\langle \bullet \rangle_s$	Promedio espacial superficial
$ x $	Valor absoluto de x
\bar{x}	Promedio temporal de x
x_{\max}	Valor máximo de x
x_{\min}	Valor mínimo de x

Acrónimos

<i>ADPV,ADP</i>	Acoustic Doppler Velocity Profiler
<i>ADV</i>	Acoustic Doppler Velocimeter
<i>ANOVA</i>	Análisis de la Varianza
<i>ASCE</i>	American Society of Civil Engineering
<i>CCD</i>	Charged coupled device
<i>CFD</i>	Computer Fluid Dynamics
<i>CITEEC</i>	Centro de Investigación Tecnológica en Edificación e Enxeñaría Civil
<i>CMOS</i>	Complementary Metal/Oxide/Semiconductor
<i>DAM</i>	Double Average Methodology
<i>DANS</i>	Double Averages Navier Stokes
<i>DES</i>	Detached Eddy Simulation
<i>DLR</i>	Instituto Aeroespacial Alemán (Instituto Von Kármán)
<i>DSR</i>	Dynamic Spatial Range
<i>DNS</i>	Direct Numerical Simulation
<i>DVR</i>	Dynamic Velocity Range
<i>ERCOFTAC</i>	European Research Community On Flow, Turbulence and Combustion
<i>ETSECCP</i>	Escola Técnica Superior de Enxeñaría de Camiños, Canais e Portos
<i>FFT</i>	Transformadas rápidas de Fourier
<i>GEAMA</i>	Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente
<i>HS-PIV</i>	High Speed PIV (HS-PIV)
<i>IAHR</i>	International Association of Hydro-Environment Engineering and Research
<i>LDA, LDV</i>	Laser Doppler Anemometer
<i>LES</i>	Large Eddy Simulation

<i>LIF</i>	Laser Induced Fluorescence
<i>LPIV</i>	Large scale PIV
<i>LSV</i>	Láser Speckle Velocimetry
<i>MPS PIV</i>	Multi Plane Stereoscopic PIV
<i>N-S</i>	Navier–Stokes
<i>Nd:YAG</i>	Neodymium Yttrium Aluminum Garnett
<i>Nd:YLF</i>	Neodymium Yttrium Lithium Fluoride
<i>PIV</i>	Particle Image Velocimetry
<i>POD</i>	Proper Orthogonal Decomposition
<i>PTV</i>	Particle Tracking Velocimetry
<i>PTU</i>	Programmable Time Unit
<i>PSP</i>	Pressure-Sensitive Painting
<i>RANS</i>	Reynolds Averaged Navier Stokes
<i>SGS</i>	Subgrid Scales
<i>SNR</i>	Signal to Noise Ratio
<i>SPH</i>	Smoothed Particle Hydrodynamics
<i>SPIV</i>	PIV estereoscópico
<i>T-PIV</i>	Tomographic PIV
<i>TR-PIV</i>	Time Resolved PIV
<i>UDC</i>	Universidade da Coruña
<i>URANS</i>	Unsteady RANS

ÍNDICE DE FIGURAS

C02. ECUACIONES FUNDAMENTALES Y DESCRIPCIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS

Figura 2.1	(a) Representación de la máquina empleada por Reynolds y de sus observaciones sobre el comportamiento del flujo visualizado en la misma (Reynolds, 1883), y (b) visualización de una reproducción del experimento original de Reynolds (Van Dyke, 1982).....	2.3
Figura 2.2.	Formas reducidas de las ecuaciones de N-S obtenidas a partir del promediado de las variables en el tiempo o en el espacio (adaptado de Nikora, 2008b)....	2.6
Figura 2.3.	Simulación del flujo a través de un cilindro con varias aproximaciones. En la figura se representan las vorticidades (Spalart, 2004).....	2.7
Figura 2.4.	Flujo hidráulicamente liso, intermedio y rugoso (sobre lecho regular e irregular).	2.10
Figura 2.5.	Ejemplo de perfil de velocidades sobre fondo liso y rugoso. En el perfil rugoso se representa la indeterminación del perfil de velocidades promediado en el tiempo para diferentes posiciones en la dirección de la corriente (adaptado de Nikora, 2008b)	2.11
Figura 2.6.	Esquema del volumen de promediado en los ensayos realizados de arrastre de berberechos con el equipo PIV.	2.15
Figura 2.7.	División clásica de la estructura vertical del flujo en canales abiertos con lecho hidráulicamente liso (elaboración propia a partir de Nezu y Nakagawa, 1993; López y García, 1999 y Manes et al., 2007).....	2.20
Figura 2.8.	(a) Estructura doble de capa límite limitada por el calado en cauces naturales (Nikora y Rowinski, 2008) y (b), esquema de la formación de varias capas límites sobre un lecho de mejillones (Nikora et al., 2002a).....	2.23
Figura 2.9.	División de la estructura de flujos hidráulicamente rugosos siguiendo la metodología del doble promediado: (a) lecho impermeable y (b) lecho permeable Nikora et al. (2007b).	2.26
Figura 2.10.	Definición de los diferentes orígenes del lecho: esquema del lecho y función de forma del fondo y perfil de velocidades. A la derecha se presenta la definición geométrica de los diferentes orígenes.	2.31
Figura 2.11.	Esquema del movimiento de los remolinos con escala del calado del flujo sobre el plano de desplazamiento nulo (Nikora et al., 2002b).	2.32
Figura 2.12.	Distribución vertical de la velocidad para varios tipos de flujo y rugosidades en coordenadas (los datos se describen en Nikora et al., 2004). Las desviaciones de los datos respecto a la recta $Y=X$ son consistentes con la ley exponencial (2.41).....	2.36
Figura 2.13.	Definición del sistema de referencia para espacio y velocidades empleado en este capítulo y en los posteriores.	2.38

Figura 2.14.	Contribución a la tensión tangencial total de los términos viscosos y de Reynolds. Datos de DNS de un flujo en capa límite desarrollado sobre una placa lisa para un $Re=13750$ (Kim et al., 1987; extraído de Pope, 2000).....	2.40
Figura 2.15.	Distribución vertical de las tensiones y velocidades en un flujo 2D uniforme y permanente (elaboración propia a partir de Detert, 2008).	2.41
Figura 2.16.	Distribución ideal de las tensiones tangenciales sobre el contorno y sus corrientes secundarias asociadas en un canal recto estrecho ($B/H=2$) con flujo uniforme 3D (adaptado de Detert, 2008)	2.42
Figura 2.17.	(a) Esquema de flujo y patrones de las corrientes secundarias y dunas longitudinales en un río ancho (Nezu, 2005) y (b) representación de las corrientes secundarias y la variación de la tensión tangencial de fondo con la expresión de Ikeda (1981) (ver en Nezu y Nakagawa, 1993)	2.44
Figura 2.18.	Distribución experimental de τ_{xy} en un canal rectangular liso estrecho ($B/H=2$) con paredes y lecho de la misma rugosidad. Se han representado los términos de la ecuación (2.60) para la distribución de tensiones situada en el plano $y = \pm 0.5 z/H$ (datos de Nezu y Nakagawa, 1993).	2.46
Figura 2.19.	Distribución de τ_{xy} en un canal recto con relación de aspecto $B/H=5$. Datos de Imamoto e Ishigaki, 1988 (citados en Yang, 2005b)	2.46
Figura 2.20.	Distribución de tensiones tangenciales sobre el lecho en un canal (Nezu y Nakagawa, 1993).....	2.47
Figura 2.21.	Comparación de las ecuaciones (2.61) y (2.62) para obtener la relación τ_{xy}/H junto con los datos experimentales empleados para el ajuste de la segunda ecuación (datos de Wang et al., 2001)	2.48
Figura 2.22.	Distribución de velocidades, células de circulación secundaria y geometría y líneas de división de las distintas regiones de flujo propuesta por Yang (2005b).	2.51
Figura 2.23.	Esquema de un flujo no uniforme (a) acelerado y (b) decelerado.....	2.53
Figura 2.24.	Distribución típica de la velocidad media horizontal y vertical sobre lecho rugoso de un flujo no uniforme sin corrientes secundarias y comparación con un caso hipotético de régimen 2D uniforme (adaptado de Yang y Chow, 2008; datos de Song, 1994). La nomenclatura empleada está recogida en los experimentos de Song (1994): AS y DS hace referencia a ensayo de flujo acelerado y decelerado respectivamente, y Q señala el valor del caudal de ensayo.	2.54
Figura 2.25.	(a) Distribución de las tensiones τ_{xy} en flujo no uniforme 2D rugoso (datos de Song, 1994) y (b) distribución de las tensiones τ_{xy} y de τ_{xy}/H para flujo no uniforme 2D rugoso (Yang et al., 2006; datos de Song, 1994). Se puede observar cómo el término aunque el término de fluctuaciones adimensionalizado con τ_{xy}/H no es lineal, la suma de este término con el producto de las velocidades sí sigue una tendencia lineal.	2.55
Figura 2.26.	Relación entre las corrientes secundarias y el fenómeno de descenso de velocidad en canales estrechos (adaptado de los datos recogidos en Nezu, 2005).....	2.57

Figura 2.27.	Distribución experimental de τ en un canal rectangular liso estrecho ($B/H=2$) con paredes y lecho de la misma rugosidad. Se han representado los términos de la ecuación (2.60) para la distribución de tensiones situada en el plano $y = 0$ (datos de Nezu y Nakagawa, 1993).	2.59
Figura 2.28.	Relación entre las corrientes secundarias y la variación de las tensiones de Reynolds en un canal ancho con bandas de diferentes rugosidad (Wang y Cheng, 2005).	2.60
Figura 2.29.	Variación de los sedimentos en suspensión con varias concentraciones de sedimentos en suspensión. $C0.05$ (%) representa la concentración volumétrica de sedimentos en suspensión para $z/H=0.05$. El resto de datos y referencias se pueden consultar en Wang et al., (2001).	2.61
Figura 2.30.	Relación entre la diferencia de velocidades en flujos con sedimentos en suspensión y la ecuación (2.88) (datos y referencias de Wang et al., 2001).	2.62
Figura 2.31.	Corrientes secundarias en un canal compuesto recto (Tominaga y Nezu, 1991).	2.63
Figura 2.32.	Distribución de velocidades promediada sobre el calado en dos ensayos con condiciones de cauce lleno y con un desbordamiento de $0.30H$ realizados en el canal de Wallingford (Shiono et al., 2009a).....	2.64
Figura 2.33.	Esquema de un flujo sobre traviesas formando rugosidades de tipo $-d$ y tipo $-k$	2.65
Figura 2.34.	Contribución de las tensiones de corte en flujo de tipo $-k$ con presencia de corrientes secundarias: (a) $\lambda/l=2$ y (b) $\lambda/l=16$ (Coleman et al., 2007b).....	2.67
Figura 2.35.	Velocidades horizontales, intrínsecas y superficiales, y verticales doblemente promediadas sobre un lecho de grava (Mignot et al. 2009).	2.69
Figura 2.36.	(a) Localización de los diferentes tipos de perfil de velocidad encontrados por Mignot et al. (2009) sobre un lecho de gravas en laboratorio, (b) y (c) distribución doblemente promediada de las velocidades y tensiones de Reynolds características de los perfiles logarítmicos, tipo S y acelerados (Mignot et al., 2009).	2.71
Figura 2.37.	La función de distribución de probabilidad de la fluctuación de la luminancia en puntos separados una distancia de R pixels de cuadros como “Una noche estrellada” sigue el patrón de la función de distribución de probabilidad de la diferencia fluctuaciones de velocidad separadas una distancia λuR (ver detalles en Aragón et al., 2008).	2.76
Figura 2.38.	Definición y media de conjunto de un proceso aleatorio (Bendat y Piersol, 2000).....	2.79
Figura 2.39.	Diagrama de funcionamiento del mecanismo de energía en cascada (adaptado de Pope, 2000 y Nikora, 2008b).....	2.84
Figura 2.40.	Auto-espectro de velocidad $S_{uu}(k)$ en coordenadas doblemente logarítmicas.	2.85
Figura 2.41.	Distribución teórica de las intensidades turbulentas en flujo 2D uniforme según las expresiones de Nezu y Nakagawa (1993), Kironoto y Graf (1994) y López y	

	García (1999). Se han representado también las tendencias de los datos experimentales recogidos en Nezu y Rodi (1986) para lecho liso y de Song (1994) para lecho rugoso.....	2.88
Figura 2.42.	Distribución típica de las intensidades turbulentas adimensionales para flujos acelerados, uniformes y decelerados (adaptado de Yang y Chow, 2008; datos de Song, 1994). La nomenclatura empleada está recogida en los experimentos de Song (1994): AS y DS hace referencia a ensayo de flujo acelerado y decelerado respectivamente, y Q señala el valor del caudal de ensayo.	2.89
C03.	HIDRÁULICA EXPERIMENTAL	
Figura 3.1.	Interacción de un haz de luz con el movimiento de un fluido sembrado con partículas.....	11
Figura 3.2.	a) Operarios pintando el ala de un modelo de avión comercial en un túnel de viento y b) resultados de las presiones sobre un modelo completo de avión de combate (Cap. 4.4. de Tropea et al., 2007).....	12
Figura 3.3.	Separación de flujo después de un ala. Visualización con una réplica del equipo de Prandtl (Raffel et al., 2007).....	13
Figura 3.4.	a) Secuencia del inicio de un flujo estratificado sobre un obstáculo submarino. La visualización se ha realizado añadiendo Rodamina WT al medio con mayor densidad y la grabación con una cámara de video convencional miniDV (Anta et al., 2007b); b) Visualización con humo de un chorro axisimétrico adyacente a un cilindro liso de $\phi=135, 144$ y 148 mm. La apertura del difusor, en forma de anillo, decrece hacia la derecha ($\phi 7.5, 3$ y 1 mm). La iluminación se ha realizado con un plano láser (Fotografías de F. Peters, recogidas en Merzkich, 2007)...	14
Figura 3.5.	a) Visualización con humo de las líneas de corriente sobre un modelo a escala real de un VW Golf en túnel de viento (Fotografías de la Volkswagen AG en Wolfsburg, recogidas en Merzkich, 2007); b) Calle de Kármán tras un cilindro para un $Re=140$ en un canal con auga a velocidad de 1.4 cm/s. La visualización se realiza por la precipitación de un humo blanco coloidal iluminado por un plano láser. En la figura se puede apreciar como las inestabilidades crecen varios diámetros en anchura (Van Dyke, 1982).	15
Figura 3.6.	Esfera sedimentando en un tubo relleno con aceite con un $Re=0.10$ en el que se han sembrado partículas de magnesio. La escena se ha iluminado con un plano de luz. a) movimiento relativo: la cámara se mueve a la misma velocidad que la esfera y b) movimiento absoluto: la cámara está en una posición fija. El movimiento es de izquierda a derecha. (Vand Dyke, 1982).....	16
Figura 3.7.	Visualización de una capa límite turbulenta mediante la técnica de las burbujas de hidrógeno. La frecuencia de generación de los filamentos es de 30 Hz y el $Re=2.2 \times 10^5$ (Fotografía de Praisner y Sabatino, recogida en Smith et al., 2000)	16
Figura 3.8.	Evolución del flujo de intercambio sobre un obstáculo submarino. La capa más densa (inferior, salada) contiene el trazador fluorescente. En la figura se ha representado la interface entre ambas capas y varios perfiles de velocidad instantánea (Fouli, 2006).	17

Figura 3.9.	Determinación de la estructura de la capa límite turbulenta en la zona rugosa de un flujo sobre traviesas de tipo $-k$ (obstáculo aislado) con ayuda de la técnica LIF: a) evolución temporal de las estructuras coherentes en perfil y b) vista en planta. (Djenidi et al., 2008).	18
Figura 3.10.	a) Ejemplo de un experimento de LIF en un modelo físico de un emisario submarino realizado por el GEAMA en el CITEEC y b) ejemplo de campo diluciones obtenidas.	19
Figura 3.11	Esquema básico de funcionamiento de las técnicas PIV (LaVision, 2002)	20
Figura 3.12	Esquema de obtención del campo de velocidades con PIV (LaVision, 2007a)	21
Figura 3.13	Campo de velocidades correspondiente a la Figura 3.3 (Raffel et al., 2007). ..	21
Figura 3.14	Diferentes densidades de partículas para PTV (a), PIB (b) y LSV (c), (Raffel et al., 1998).	22
Figura 3.15.	(a) Esquema de un equipo SPIV (adaptado de McKeon et al., 2007) y (b) Esquema de un sistema multi-plano con 4 cámaras que registran dos planos paralelos separados pocos milímetros con una configuración estereoscópica. Para que el sistema pueda funcionar, la polarización de los planos es diferente y dos beam-splitter especiales dividen la imagen para cada dos grupos de cámaras en función de la polarización de la luz (ver detalles en el tesis de Kähler, 2004)	24
Figura 3.16.	(a) Montaje experimental en el túnel de viento y (b) ejemplo del campo de vorticidades formado en la estela de un cilindro de 8 mm de diámetro (Elsinga, 2008).	24
Figura 3.17.	Ejemplo de aplicación de la técnica UM-PIV en el lago Michigan (a) Ubicación del equipo sobre un lecho cubierto de un tipo de mejillón de la zona; (b) imagen con el perfil de velocidades y concentraciones de partículas (en amarillo continuo y discontinuo respectivamente), y el perfil de tensiones de Reynolds y flujo turbulento de partículas (en rojo continuo y discontinuo respectivamente); (c) velocidad instantánea sin la componente de velocidad media sobre un mapa de vorticidades (Liao y Botsma, 2009).	26
Figura 3.18.	Campo de velocidades producido durante la alimentación de un róbalo (Day et al., 2007)	26
Figura 3.19.	Determinación con SPIV del patrón de velocidades tras el aleteo de un murciélago, ver detalles en (a) (Hedenström et al., 2007) y (b) (Hedenström et al., 2009).	27
Figura 3.20.	Determinación de las velocidades y tensiones tangenciales en el sistema cardiovascular de un embrión de pollo (a) preparación del huevo para realizar las medidas con la técnica π PIV; (b) ejemplo de imagen en el conducto de unas $\sim 300\mu$ de diámetro y (c) campo de velocidades (Poelma et al., 2009)	27
Figura 3.21	Dispersión de la luz entorno a partículas de vidrio de varios tamaños en agua: (a) 1μ m, (b) 10μ m y (c) 30μ m. La intensidad de la luz dispersada se representa en escala logarítmica. Los círculos concéntricos representan una diferencia de 100 unidades de intensidad (Raffel et al, 2007).	29

Figura 3.22	Esquema de operación de un equipo PIV con dos fuentes de luz gemelas (adaptado de Sánchez-Tembleque, 2002).	31
Figura 3.23	a) Vista lateral y superior de la óptica para producir un plano de luz a partir de un haz de luz y b) el ajuste de la distancia entre la lente cilíndrica y la esférica permite ajustar la posición del plano de espesor mínimo o beam waist (LaVision, 2007b).....	32
Figura 3.24.	Esquema de la formación de la imagen en una configuración de PIV estándar (Westerweel, 1997). Las definiciones de los parámetros se pueden consultar en el texto.....	33
Figura 3.25	Discos de Airy para una menor (izquierda) o mayor (derecha) apertura de diafragma (Raffel et al., 2007).	34
Figura 3.26	Patrón de calibración de malla de cruces equiespaciadas situada sobre un obstáculo submarino (Anta et al., 2007).	35
Figura 3.27.	Representación de varios fenómenos habituales que se pueden registrar en imágenes de PIV real: (A) el efecto de la intensidad de luz en franjas inclinadas es producido por las perturbaciones de la lámina de agua; (B) diferencias en la iluminación originadas por la forma del plano de luz; (C) la línea de mayor intensidad está provocada por una pequeña imperfección en los cristales que guían al haz de luz; y (D) reflexión del plano láser sobre el lecho.	37
Figura 3.28.	Ejemplo del campo de partículas en una ventana de interrogación. En el segundo frame se han superpuesto la posición de las partículas del primero..	38
Figura 3.29.	(a) Análisis para encontrar el desplazamiento más probable de la partícula centrada en el 1. En (b) se refleja el histograma de los desplazamientos posibles (Δx , Δy) de la partícula 1 y (c) se extiende el análisis a todas las partículas del segundo frame (adaptado de Poelma y Westerweel, 2007).....	38
Figura 3.30.	Descomposición del término de fluctuación aleatoria $RD'(s)$ en sus componentes media y de fluctuación (Adaptado de Westerweel, 2000).	40
Figura 3.31.	Efecto del número de partículas en la función espacial de correlación cruzada. Las funciones de (a) y (b) son idénticas, pero las segundas están normalizadas respecto al pico de la correlación (adaptado de Poelma y Westerweel, 2007).	41
Figura 3.32.	Efecto del movimiento en plano (expresado como la relación entre el desplazamiento de las partículas ΔX y el tamaño de la ventana de interrogación DI) en la correlación cruzada (adaptado de Poelma y Westerweel, 2007).	41
Figura 3.33.	Efecto del movimiento fuera de plano de las partículas $\Delta z/\Delta z_0$ en la correlación cruzada (adaptado de Poelma y Westerweel, 2007).	42
Figura 3.34.	Efecto del gradiente de velocidades en la ventana de interrogación en el pico de la correlación cruzada (adaptado de Poelma y Westerweel, 2007).....	42
Figura 3.35.	Porcentaje de detección de los picos del análisis de correlación cruzada en función de la densidad de la imagen NI y el movimiento en plano y fuera de plano, FI y FO , respectivamente (Keane y Adrian, 1990).	43

Figura 3.36.	Efecto del tamaño de la partícula sobre la determinación de la posición del pico de la función de correlación cruzada empleando el algoritmo gaussiano de precisión inferior al píxel.	46
Figura 3.37.	Histograma del desplazamiento de una serie de 10 imágenes en una capa límite turbulenta en la que se ilustra el efecto del peak-locking asociado a un tamaño insuficiente de partícula (a). Con el preprocesado se puede reducir el efecto (b), (Raffel et al., 2007).	47
Figura 3.38.	(a) Error cuadrático medio en la estimación del desplazamiento en función del tamaño de las partículas (Westerweel, 1997); (b) Efecto de peak-locking en el error sistemático de la estimación del desplazamiento de las partículas en función de su tamaño (Raffel et al., 2007).	47
Figura 3.39.	Esquema de la técnica de desplazamientos de las ventanas para mejorar la correlación: (a) Desplazamiento de la segunda ventana de interrogación y (b) desplazamiento de ambas ventanas para mejorar la correlación; (c) Esquema del desplazamiento en un grupo de ventanas (adaptado de Scarano, 2002)...	49
Figura 3.40.	Esquema del procedimiento de refinamiento de malla. Los cuadrados grises del borde inferior izquierdo señalan el tamaño de la ventana de interrogación que decrece de 128x128 px2 a 32x32 px2 (Raffel et al., 2007).....	50
Figura 3.41.	Ejemplo de una función de correlación cruzada en un flujo en una capa de cortadura. (a) Algoritmo de correlación básico, sin ningún procedimiento avanzado y (b) Algoritmo iterativo con múltiples ventanas y deformación de la imagen (McKeon et al., 2007)	51
Figura 3.42.	Principio básico de la técnica de deformación de la imagen. A la izquierda se presenta el patrón de las partículas de la primera exposición y a la derecha el de la segunda (los círculos negros representan las partículas correlacionadas con la primera imagen). En gris se representa la ventana deformada de acuerdo con el movimiento del fluido (adaptado de Scarano y Riethmuller, 2000; Raffel et al., 2007).	51
Figura 3.43.	(a) Campo de partículas no homogéneas correspondientes al vórtice generado en el entorno del ala de un avión y (b) Ejemplo de malla desestructurada y ventanas de interrogación empleadas en un método adaptativo (Theunissen et al., 2007).	53
Figura 3.44.	Mejora de la resolución espacial de la técnica PIV cerca de los contornos: (a) Recolocación del vector velocidad; (b) Empleo de diferentes esquemas de ventanas de interrogación ajustadas a la superficie; (c) Malla y tamaños de ventanas para el esquema adaptativo; y (d) Líneas de corriente cerca de una rampa con una aproximación convencional, una aproximación convencional con recolocación de vectores y ventanas filtradas y, a la derecha, añadiendo una técnica adaptativa. Más detalles en Theunissen et al., (2008).....	53
Figura 3.45.	Campo de vectores instantáneo de un jet en el que se han representado los vectores espurios de color rojo (Westerweel y Scarano, 2005).	55
Figura 3.46.	Desplazamientos correspondientes al campo vectorial de la Figura 3.45. La elipse señala el rango esperable de desplazamientos (McKeon et al., 2007)..	56

Figura 3.47.	Eliminación de las anomalías multiplicando las correlaciones de dos zonas adyacentes. En el producto no aparecen las correlaciones aleatorias, mejorando la calidad de la determinación del desplazamiento (Hart, 200).....	57
Figura 3.48	Montaje experimental del PIV en el canal de hidráulica de la ETSECCP.....	59
Figura 3.49	Forma de los haces láser en el campo cercano medida por el fabricante con ayuda de un sensor CCD especial y un papel fotosensible.	60
Figura 3.50.	(a) Detalle de las fuentes láser y (b) del brazo articulado con el sistema óptico que forma el plano de luz.....	60
Figura 3.51.	Detalle de la cámara CCD FlowMaster 3S© empleada en los experimentos...	61

C04. ANÁLISIS DEL ARRASTRE DEL BERBERECHO *C.edule*

Figura 4.1.	Evolución de las extracciones de moluscos bivalvos y del berberecho <i>C. edule</i> en Galicia y en la ría de Arousa (izquierda) y distribución de capturas del berberecho en el período 1997-2008 (derecha). Datos extraídos de la Plataforma Tecnológica de Pesca, www.pescadegalicia.com	4.1
Figura 4.2.	Volumen e importe de las ventas medios anuales de los principales moluscos extraídos en los bancos naturales gallegos en los últimos 5 años (2004-2008). Datos extraídos de www.pescadegalicia.com	4.2
Figura 4.3.	Situación y batimetría de la Ría de Arousa. En la desembocadura, conocida como Os Lombos do Ulla, se encuentra uno de los bancos de berberecho más importantes de Galicia.	4.2
Figura 4.4.	a) Perspectiva del banco de berberechos y almeja fina de Os Lombos do Ulla, b) Fotografía satélite del mismo y c) velocidades medias para un caudal de 60 m ³ /s y bajamar máxima. La fotografías han sido proporcionadas por los laboratorios Videalab y CartoLab de la Escuela de Caminos y los datos de velocidades son de Cea et al. (2009).	4.3
Figura 4.5.	a) Distribución de la textura sedimentaria superficial en la ría de Arousa, b) detalle del banco de los Lombos do Ulla y c) distribución del contenido en materia en el mismo (Vilas et al., 2005).	4.4
Figura 4.6.	Evolución de la venta de berberecho en Galicia según las estadísticas oficiales (Molares et al., 2008).	4.5
Figura 4.7.	Efecto de las riadas de 2000 y 2001 sobre las capturas de berberecho en las principales lonjas de la Ría de Arousa (adaptado de Morales et al. 2008).	4.6
Figura 4.8.	Evolución de la velocidad del viento, precipitación, nivel de agua en Portodemouros y salinidad en los Lombos do Ulla. En la figura también se han marcado los episodios de mortandad moderada (M*), mortandad severa (M) y de arrastre del stock de berberecho (A) (Parada et al. 2007).	4.7
Figura 4.9.	a) Distribución espacial de los berberechos de talla comercial durante la campaña de 2002-2003 b) distribución espacial al inicio de la campaña de 2003-2004 y c) distribución espacial promedio durante los años 2002 a 2006 (Parada et al. 2006).	4.8

Figura 4.10.	Ciclo de vida (idealizado) de un invertebrado marino bentónico con fases planctónica larvaria y bentónica juvenil y adulta (elaboración propia a partir de Eckman, 1996 y Hendriks, 2004).	4.12
Figura 4.11.	Berberecho <i>C. edule</i> realizando la dispersión de gametos a través de uno de los sifones Fotografía de Brian Spencer/ JNCC (publicada en MarLIN Web site, http://www.marlin.ac.uk).	4.13
Figura 4.12.	Esquema del movimiento helicoidal de la larva de <i>C.Edule</i> (adaptado de Jonsson et al., 1991).	4.15
Figura 4.13.	a) Crecimiento en longitud de los berberechos de las clases 1 y 2 registrados en en una zona explotada en Carril y b) Tasa de crecimiento medio para la clase 1 en el banco experimental explotado por Pérez y González (1984b). En (a) se ha señalado el descenso en tamaño de la clase 2 provocado por el inicio de la etapa marisquera.	4.18
Figura 4.14.	Esquema de un registro temporal de tensiones e identificación de la tensión umbral y la separación en episodios de fijación y no fijación de la larva en el sustrato en los experimentos de Crimaldi et al. (2002).	4.23
Figura 4.15.	Modelo de los procesos que suceden entre la sedimentación y el reclutamiento de las larvas de organismos bentónicos. La larva presentada es un tipo de percebe del Mar del Norte, <i>Balanus improvisus</i> (adaptado de van Duren, 2008).	4.24
Figura 4.16.	Mapa instantáneo de concentraciones del metabolito expulsado por el coral <i>Porites compressa</i> y detalle del tamaño y forma de la larva de <i>Phestilla sibogea</i> inducida por este agente aleloquímico. La imagen se corresponde aun flujo ondulatorio en laboratorio visualizado con LIF (Kohel et al., 2007).	4.27
Figura 4.17.	a) y b) Vista lateral de una larva de <i>P. Sibogae</i> sujeta a las mismas condiciones de flujo, c) y d) representan digramas de la larva en las posiciones a) y b). En a) el agua circulante no contenía el inductor de la sedimentación, el pie y el velo están extendidos y el cilio se mueve. En b) pasa un filamento de metabolito y la larva retrae el velo y el pie y deja de nadar (Koehl y Reindenbach, 2007).	4.28
Figura 4.18.	Trayectorias del movimiento de la larva de <i>P.sibogae</i> digitalizados a partir de una grabación realizada en un ambiente sin flujo: a) movimiento en agua de mar filtrada y b) movimiento en agua de mar satura con el metabolito generado por el coral <i>P.compressa</i> (Hadfield y Koehl, 2004).	4.28
Figura 4.19.	a) Secreción de bisco de un juvenil 0 de <i>Macoma balthica</i> coloreado con alciano azul (Hiddink et al., 2002) y b) disección de la vianda de un juvenil un <i>C.edule</i> con su pie (F), secreción de bisco (B), cilio (Ci), talón (H), depresión y surco pedal (Pg y Pd), músculo abductor posterior (PAM) y masa visceral (VM), adaptado de Yanksson (1986)	4.30
Figura 4.20.	Velocidad de sedimentación (media±SE) de las larvas de poliqueto <i>Pectinaria Koreni</i> en función de su tamaño y estado de segregación de bisco: a) sedimentación pasiva y b) sedimentación activa, con filamento de bisco (Olivier y Retière, 2006). En la figura se presenta también un esquema del patrón de sedimentación de los poliquetos.	4.31

Figura 4.21.	Canal de ensayos Hycobenthos a) fotografía y b) esquema de los ensayos de selección de sustrato (adaptado de de Montaudouin y Bachelet, 1996; de Montaudouin, 1997; de Montaudouin et al., 2003).	4.32
Figura 4.22.	Situación de las áreas estudiadas en las principales referencias bibliográficas del Mar de Wadden / Norte.	4.34
Figura 4.23.	Migraciones durante la fase bentónica de la <i>Macoma balthica</i> en el mar de Wadden (adaptado de van Duren, 2008).	4.36
Figura 4.24.	Efecto de la separación de los individuos en la estructura del flujo: a) flujos sobre un “obstáculo” aislado con una estela aguas abajo y b) flujo rasante sobre una sucesión de individuos (adaptado de Van Duren, 2008). En estas condiciones se produce un desacople entre el flujo rasante y el que actúa sobre los organismos y se reducen los esfuerzos de corte sobre los mismos.....	4.41
Figura 4.25.	Efecto de la actividad filtradora del <i>M.edulis</i> sobre la estructura de la energía cinética turbulenta (a) y sobre las tensiones de Reynolds (b), ((van Duren et al., 2006).	4.42
Figura 4.26.	Esquema de fuerzas actuantes sobre un berberecho aislado en el umbral de movimiento: FD: fuerza da arrastre, FW: peso sumergido y FF: rozamiento (Peña et al., 2008). En este esquema no aparecen las fuerzas de sustentación FL porque se consideraron despreciables (ver apartado 4.2.5.).....	4.45
Figura 4.27.	Resultados de la simulación DNS de un flujo en capa límite y su interacción con el transporte de partículas cerca de lecho. (a) Distribución instantánea de las tensiones de Reynolds, las zonas de mayor tensión se representan en rojo y están correlacionadas con los eventos Q2-sweeps-, representados en color dorado, y las zonas de menor tensión se representan en azul y están correlacionadas con los eventos Q4-ejections-; b) Representación de la distribución de partículas en el lecho y su correlación con las zonas de menor tensión tangencial (Soldati, 2004).	4.46
Figura 4.28.	Las deformaciones excesivas de los cilios de los juveniles del percebe <i>Balanus improvisus</i> provocan una reducción de su capacidad de alimentación y un fenómeno de selección activa hacia entornos con velocidades locales sobre el organismo (U_x) inferiores a los 5-10 cm/s (Larsson y Jonsson, 2006).	4.47
Figura 4.29.	Esquema de los principales tipos de canal para el estudio del bentos marino (Jonsson et al., 2006)	4.48
Figura 4.30.	Perfil vertical de velocidades para los canales de la red BioFlow para una velocidad de la corriente de 5 cm/s. La tipología de los canales es recto: A-G, en circuito de carreras: H-I y anular; J-K, (Jonsson et al., 2006). El nombre de la institución y sus características se recogen en la Tabla 4.6.	4.50
Figura 4.31.	Perfil vertical de velocidades para los canales de la red BioFlow para una velocidad de la corriente de 25 cm/s. La tipología de los canales es recto: A-G, en circuito de carreras: H-I y anular; J-K, (Jonsson et al., 2006). El nombre de la institución y sus características se recogen en la Tabla 4.6.	4.51

Figura 4.32.	Velocidades de corte (a) y rugosidades características (b) obtenidas a partir del ajuste de las leyes de velocidades determinadas en los canales de la red BioFlow. Valores medios \pm 95% IC (Jonsson et al., 2006).	4.52
Figura 4.33.	Esquema de la puesta en suspensión e impacto de los moluscos en el fondo marino (elaborada a partir de Amos et al., 1998).....	4.53
Figura 4.34.	(a) Campo de velocidades y, (b) perfil de velocidades correspondientes al umbral de movimiento para un berberecho situado sobre un lecho de arena de los Lombos do Ulla (Peña et al., 2008).	4.54
Figura 4.35.	Curva original de Shields traducida al inglés (1936). El área rayada representa el valor de la tensión tangencial crítica como función del número de Reynolds granular Re^{**}	4.56
Figura 4.36.	a) Proporción (media \pm SD) de larvas de <i>M.arenaria</i> retenidas en un sustrato de arena fina en función de la velocidad de la corriente y b) Proporción (media \pm SD) de larvas de la misma especie retenidas en función de la velocidad y el grado de enterramiento en el sustrato (Roegener et al., 1995).....	4.58
Figura 4.37.	Proporción (media \pm desviación típica) de juveniles de <i>M.arenaria</i> y <i>M.mercenaria</i> (~1.5 mm) erosionados para velocidades de fricción de 1.1 y 1.6 cm/s en dos sedimentos de 180 y 325 μ m (Hunt, 2004).....	4.58
Figura 4.38.	Perfiles de velocidad de los ensayos de St-Onge y Miron (2007). Nótese que aunque los autores emplearon 4 muestras de sedimento, únicamente presentan las velocidades de fricción correspondientes a uno de los tipos usados.....	4.59
Figura 4.39.	Porcentaje de <i>Mya arenaria</i> erosionada en función de la velocidad de la corriente, el tamaño y el tipo de ambiente sedimentario en los ensayos de laboratorio de St-Onge y Miron (2007).	4.60
Figura 4.40.	Distribución del tamaño de los berberechos en el banco de los Lombos do Ulla a) en la campaña 2002-2003, y b) en la campaña 2003-2004 (Parada et al., 2006).....	4.62
Figura 4.41.	Esquema del canal “cockledrome” empleado en la realización de ensayos..	4.63
Figura 4.42.	Vista general de canal y detalle de las ruedas motrices.	4.64
Figura 4.43.	Granulometría de la arena empleada en la realización de los ensayos de arrastre de berberechos.	4.64
Figura 4.44.	Acuario de agua salada empleado para la conservación de los berberechos: el agua captada por el filtro físico-biológico(1) pasa a través del regulador de temperatura(2) para retornar en forma de cascada al acuario(3) y así favorecer la aireación. El filtro de proteínas (4) funciona en paralelo a este sistema...	4.65
Figura 4.45.	Evolución de los parámetros físico-químicos del acuario durante la fase de maduración. Se puede observar como se produce la reducción de los nitratos, indicador de que se alcanzó la maduración del acuario.	4.66
Figura 4.46.	Ejemplo de imagen doble capturada con el equipo PIV. Se puede apreciar como un pequeño problema de alineación del láser provoca una iluminación diferenciada entre las dos imágenes. Este efecto se puede minimizar con técnicas de preprocesado de las imágenes.	4.68

Figura 4.47.	Ejemplo de aplicación del esquema de preprocesado a las imágenes: (a) y (b) imagen original, (c) imagen preprocesada, (d) y (e) campo de velocidades de la imagen original y de la procesada.	4.69
Figura 4.48.	Plantilla empleada en el proceso de calibración del plano de medida con el equipo PIV. El objetivo de la cámara se ve en primer plano	4.70
Figura 4.49.	Ejemplo de marcado de los berberechos (a) con laca de uñas y (b) con código de colores.....	4.73
Figura 4.50.	(a) Cultivo de <i>Tetraselmis suecica</i> en el laboratorio de microbiología de la UDC, y (b) vista a microscopio del microalga.....	4.74
Figura 4.51.	Distribución de tamaños de los grupos de berberechos empleados en el ensayo de tallas.....	4.75
Figura 4.52.	Configuración geométrica de los ensayos: (a) ensayos por grupos de tamaño y (b) ensayos de poblaciones.....	4.76
Figura 4.53.	Distribución por tamaños de los grupos de berberechos analizados en los ensayos estacionales (a) otoño y (b) primavera.....	4.77
Figura 4.54.	Ejemplo de aplicación del algoritmo de detección de fondo con filtros de media móvil de diferente radio. En (a) se presenta la media de 25 imágenes tomadas con PIV, en (b) el resultado la determinación de la posición de mayor gradiente de intensidades y en (c) la posición del fondo filtrada y superpuesta sobre la imagen original.....	4.81
Figura 4.55.	Ejemplo de aplicación de la máscara de fondo a un campo de velocidades instantáneo del ensayo de determinación de velocidades sobre lecho de arena.	4.82
Figura 4.56.	Longitudes características de los berberechos: altura a, longitud en la dirección del flujo b y anchura c.	4.89
Figura 4.57.	Relación entre longitudes características de los berberechos analizados.....	4.89
Figura 4.58.	Relación entre la anchura del berberecho y (a) la masa de la concha, (b) con la densidad de la concha y la densidad del berberecho.....	4.91
Figura 4.59.	Relación entre la anchura del berberecho y el coeficiente de forma SF.....	4.92
Figura 4.60.	Ejemplo de interacción del fondo de la imagen (izquierda) y de unas gotas (derecha) en la visualización y determinación de los campos de velocidades. En algunos escenarios el borde de la placa de visualización (rectángulo con línea discontinua) ha provocado un descenso artificial de las intensidades turbulentas en la dirección w (Figura 4.67). En la parte izquierda de la imagen se puede apreciar la acumulación de arena durante el ensayo augas arriba de los moluscos.....	4.93
Figura 4.61.	Efecto de la inclusión de zonas localizadas con velocidades mal determinadas por problemas de visualización en los perfiles de velocidad e intensidades turbulentas. Se puede observar como eliminando las zonas incorrectas se elimina el efecto de “peak locking” en los parámetros analizados.....	4.94
Figura 4.62.	Perfiles de velocidad doblemente promediados para los ensayos de lecho de arena o de fondo liso.	4.98

Figura 4.63.	Evolución de la velocidad media en los ensayos con el fondo de arena. Cada punto representa una media de 20 imágenes.....	4.99
Figura 4.64.	Velocidades medias u y w para la zona central del dominio visualizado (100x150 mm ²) en los ensayos V03FL (a) y (b), y V06FL (c) y (d). Aquellas zonas con medidas erróneas originadas por problemas como los señalados en la Figura 4.60 se han identificado con un círculo negro.....	4.100
Figura 4.65.	Distribución vertical de las componentes u y w de la velocidad doblemente promediada en los ensayos con el lecho de arena. Datos escalados con la variable interna u^* y con la externa calado H	4.101
Figura 4.66.	Comparación entre la distribución de las velocidades horizontales para los ensayos de fondo liso y las velocidades registradas en los canales de estudios del bentos de la red BioFlow (Jonsson et al., 2006). Datos escalados con la variables interna u^* y \varnothing/u^*	4.102
Figura 4.67.	Perfiles de intensidades turbulentas de las componentes u y w , (a) y (b) respectivamente, de la velocidad doblemente promediada en los ensayos con el lecho de arena. Datos escalados con la variable interna u^* y con la externa calado H	4.103
Figura 4.68.	(a) y (b) Perfiles de esfuerzos de corte doblemente promediados en los ensayos con el lecho de arena. Datos escalados con la variable interna u^* y con la externa calado H . (c) y (d), ejemplos de la distribución de las tensiones de corte para un flujo 3D en un canal recto y para un flujo no uniforme 2D (datos de Nezu y Nakagawa, 1993 y Song, 1994).....	4.104
Figura 4.69.	Esquema con la nomenclatura empleada en la denominación de los ensayos de grupos de tamaños.....	4.105
Figura 4.70.	Gráficos de cajas y bigotes con el porcentaje de berberechos movilizados en cada uno de los factores analizados: a) velocidad, b) talla, c) reclutamiento y d) estado.....	4.106
Figura 4.71.	Secuencia de video en la que un berberecho se coloca de forma lateral y comienza a enterrarse.....	4.109
Figura 4.72.	Gráfica de interacciones entre los factores principales del análisis. Ensayo de grupos de tallas.....	4.117
Figura 4.73.	Ejemplo de obtención del perfil del lecho así como de los parámetros representativos del mismo: (a) imágenes de los ensayos de tamaño 20-25 mm para con densidades alta y baja (berberechos muertos, velocidad V05) y (b) función de rugosidad de fondo obtenida a partir del campo de imágenes...	4.125
Figura 4.74.	Campo de velocidades obtenido para el ensayo V05T3AV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media (0-0.4 cm/s) y únicamente 1 de cada 3 vectores para facilitar la visualización.....	4.129
Figura 4.75.	Campo de velocidades obtenido para el ensayo V05T3BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media (0-0.4 cm/s) y únicamente 1 de cada 3 vectores para facilitar la visualización.....	4.130

Figura 4.76.	Campo de velocidades horizontales promediadas en el tiempo a) para el ensayo V05T3AV y b) para el ensayo V05T3BV. En la figura correspondiente al ensayo V05T3BV se ha representado en amarillo las zonas de velocidades negativas (inferiores a ~ 1 cm/s).....	4.131
Figura 4.77.	Campo de velocidades verticales promediadas en el tiempo a) para el ensayo V05T3AV y b) para el ensayo V05T3BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media entre -5 y 5 cm/s.	4.132
Figura 4.78.	Campo vectorial de las perturbaciones espaciales de la velocidad para el ensayo V05T3AV. En la figura se ha representado la vorticidad de dicho campo entre $\omega = -50$ y 50 s ⁻¹ y los vórtices asociados a las estelas persistentes formadas en el entorno de los berberechos más grandes del lecho.....	4.133
Figura 4.79.	Campo de la perturbación espacial de la velocidad horizontal a) para el ensayo V05T3AV y b) para el ensayo V05T3BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media entre -25 y 25 cm/s. A la derecha de cada mapa de velocidades se presenta el perfil doblemente promediado \bar{u} así como la función de rugosidad del lecho \bar{z}	4.134
Figura 4.80.	Campo de la perturbación espacial de la velocidad vertical a) para el ensayo V05T3AV y b) para el ensayo V05T3BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media entre -25 y 25 cm/s. A la izquierda de cada mapa de velocidades se presenta el perfil doblemente promediado así como la función de rugosidad del lecho \bar{z}	4.135
Figura 4.81.	Comparación de las velocidades doblemente promediadas para la serie de ensayos con la talla 3 y estado vivo: a) densidad de reclutamiento alta y b) densidad de reclutamiento baja. Los símbolos rellenos representan la zona situada bajo las crestas del lecho para cada escenario analizado.....	4.136
Figura 4.82.	Evolución del perfil de velocidades sobre el lecho de berberechos en el ensayo V06T3BV: a) campo de velocidades sobre el módulo de velocidad, b) perfiles de velocidad horizontal doblemente promediados sobre las coordenadas señaladas bajo cada perfil y c) comparación de la forma de los diferentes perfiles de velocidad con el perfil doblemente promediado sobre todo el dominio de análisis.	4.137
Figura 4.83.	Definición geométrica de la ley logarítmica de velocidades (a) posición general de los planos y longitudes características, z_0 : intersección de la ley con las ordenadas y $z=\pm d$: asíntota de la ley logarítmica; (b) sistema de referencia y posición del plano $z=0$ en la determinación de las velocidades de corte estimadas en este trabajo.....	4.139
Figura 4.84.	Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para la componente horizontal de la velocidad para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm con los moluscos vivos: a) densidad baja y b) densidad alta.....	4.141
Figura 4.85.	Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para la componente horizontal de la velocidad para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm con los moluscos muertos: a) densidad baja y b) densidad alta.....	4.142
Figura 4.86.	Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para la componente horizontal de la velocidad para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25	

- mm: a) moluscos vivos y b) moluscos muertos. En la figura se presentan las dos densidades de reclutamiento ensayadas y se puede apreciar como no existen prácticamente diferencias en el perfil atribuibles a este factor. 4.143
- Figura 4.87. Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para la componente vertical de la velocidad para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: a) moluscos vivos y b) moluscos muertos. En la figura se presentan las dos densidades de reclutamiento ensayadas y se puede apreciar como no existen prácticamente diferencias en el perfil atribuibles a este factor..... 4.144
- Figura 4.88. Perfiles de las intensidades turbulentas de forma horizontales y verticales (símbolos vacíos y rellenos respectivamente) para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: Moluscos vivos con densidad de reclutamiento baja (a) y alta (b) y moluscos muertos con densidad de reclutamiento baja (c) y alta (d)..... 4.145
- Figura 4.89. Perfiles de los esfuerzos de corte de Reynolds y forma doblemente promediados (símbolos rellenos y vacíos respectivamente) para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm y estado vivo: a)densidad baja y b)densidad alta. 4.146
- Figura 4.90. Perfiles de los esfuerzos de corte de Reynolds y forma doblemente promediados (símbolos rellenos y vacíos respectivamente) para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm y estado muerto: a) densidad baja y b) alta. 4.147
- Figura 4.91. Perfiles de los esfuerzos dispersivos doblemente promediados para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: a) densidad baja y b) densidad alta. El resto de factores no se diferencian. Se representa la posición media de las crestas y de los senos del lecho con una línea discontinua..... 4.148
- Figura 4.92. a) Distribución de las tensiones dispersivas en un lecho acorazado de gravas y su relación con b) la posición del punto de medida (Aberle et al., 2008). La flecha azul señala la dirección del flujo. 4.149
- Figura 4.93. Relación entre la posición de las crestas del lecho y de los máximos de las distribuciones de esfuerzos de corte de Reynolds y de forma doblemente promediados. La línea recta representa el ajuste perfecto. 4.150
- Figura 4.94. a) Relación entre la velocidad media de ensayo y la velocidad de fricción (\pm SD) para diferentes grados de reclutamiento (los datos relativos a la densidad baja y alta están desplazados ± 0.002 m/s en las abscisas para facilitar la visualización) y b) Gráfica de cajas y bigotes para la velocidad de fricción media en función del grado de reclutamiento. 4.152
- Figura 4.95. Matriz de correlación entre la velocidad doblemente promediada media y máxima y la velocidad de fricción característica con las velocidades de fricción estimadas a partir del perfil logarítmico $u^* \log$, de la extrapolación de las tensiones de Reynolds $u^* u_w(z=z_c)$, $u^* u_w(z=0)$ y a partir de la tensión tangencial total máxima $u^* \max, u_w$, para los ensayos de tallasen función del grado de reclutamiento. 4.154
- Figura 4.96. Relación entre el porcentaje de los moluscos movilizados y el parámetro de Shields τ^* en función de la densidad de reclutamiento, de la talla y de la

	velocidad de fricción: (a) velocidades de fricción determinadas en los ensayos con berberechos y (b) velocidades de fricción para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27.	4.155
Figura 4.97.	Relación entre el caudal sólido de fondo adimensional \bar{q} y el parámetro de Shields $\bar{\tau}_s$ en función de la densidad de reclutamiento, de la talla y de la velocidad de fricción: (a) velocidades de fricción determinadas en los ensayos con berberechos y (b) velocidades de fricción para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27.	4.156
Figura 4.98.	Relación entre el ratio de movilización \bar{E} y el parámetro de Shields $\bar{\tau}_s$ en función de la densidad de reclutamiento, de la talla y de la velocidad de fricción: (a) velocidades de fricción determinadas en los ensayos con berberechos y (b) velocidades de fricción para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27. En (b) se han representado dentro de una elipse los datos eliminados en el ajuste de la función de transporte.	4.158
Figura 4.69.	Esquema con la nomenclatura empleada en la denominación de los ensayos de poblaciones estacionales.	4.159
Figura 4.99.	Gráficos de cajas y bigotes con el porcentaje de berberechos movilizados en cada uno de los factores analizados: a) velocidad, b) talla, c) reclutamiento y d) estado.	4.160
Figura 4.100.	Comparación de la media de berberechos movilizados en función de la velocidad de la corriente.	4.161
Figura 4.101.	Variación de las tensiones de Reynolds con el espaciamiento Δz en flujo sobre traviesas de sección cuadrada (adaptado de Coleman et al., 2007b). Se puede apreciar como a medida que la rugosidad incrementa, Δz crece, el pico de las tensiones es más pronunciado y las velocidades de fricción también lo hacen para las mismas condiciones de caudal.	4.163
Figura 4.102.	Gráfica de interacciones entre los factores principales del análisis. Ensayo de poblaciones estacionales.	4.170
Figura 4.103.	Campo de velocidades obtenido para el ensayo V05D21AV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media (0-0.4 cm/s) y únicamente 1 de cada 3 vectores para facilitar la visualización.	4.176
Figura 4.104.	Campo de velocidades obtenido para el ensayo V05D21BV. Se ha representado la magnitud de la velocidad media (0-0.4 cm/s) y únicamente 1 de cada 3 vectores para facilitar la visualización.	4.176
Figura 4.105.	Campo de velocidades promediadas en el tiempo para el ensayo V05D21AV: a) velocidades horizontales y b) velocidades verticales. La flecha amarilla señala la posición de un berberecho recolocado por el flujo en una dimensión mayor que el resto del parche.	4.177
Figura 4.106.	(a) Campo de la perturbación espacial de la velocidad horizontal y (b) vertical para el ensayo V05D21AV. La flecha amarilla señala la posición de un berberecho recolocado por el flujo en una dimensión mayor que el resto del parche. A la derecha se represente el perfil de velocidades doblemente promediado así como la función de rugosidad de lecho $\bar{\tau}(z)$	4.178

- Figura 4.107. Comparación de las velocidades doblemente promediadas para la serie de ensayos de la población de $d \sim 21$ mm y estado vivo: a) densidad de reclutamiento alta y b) densidad de reclutamiento baja. Los símbolos rellenos representan la zona situada bajo las crestas del lecho..... 4.179
- Figura 4.108. Perfiles de intensidad turbulenta doblemente promediados para los ensayos de ensayos de la población de $d \sim 21$ mm y estado vivo: a) intensidades horizontales y b) intensidades verticales. En la figura se han agregado las dos densidades de reclutamiento..... 4.180
- Figura 4.109. Perfiles de las intensidades turbulentas de forma horizontales y verticales (Símbolos vacíos y rellenos respectivamente) para el ensayo de la población de $d \sim 21$ mm y estado vivo: a) densidad baja y b) densidad alta. 4.181
- Figura 4.110. Perfiles de los esfuerzos de corte de Reynolds y forma doblemente promediados (símbolos rellenos y vacíos respectivamente) para el ensayo de la población de $d \sim 21$ mm y estado vivo: a) densidad baja y b) densidad alta. 4.182
- Figura 4.111. Perfiles de los esfuerzos dispersivos doblemente promediados para el ensayo de la población de $d \sim 21$ mm y estado vivo: a) densidad baja y b) densidad alta. Se representa la posición media de las crestas y de los senos del lecho con una línea discontinua. 4.183
- Figura 4.112. Matriz de correlación entre la velocidad doblemente promediada media y máxima y la velocidad de fricción característica con las velocidades de fricción estimadas a partir del perfil logarítmico u^*_{log} , de la extrapolación de las tensiones de Reynolds $u^*_{uw}(z=z_c)$, $u^*_{uw}(z=0)$ y a partir de la tensión tangencial total máxima $u^*_{max,uw}$, para los ensayos de poblaciones en función del grado de reclutamiento. 4.185
- Figura 4.113. Relación entre el porcentaje de los moluscos movilizados y el parámetro de Shields τ_s en función de la densidad de reclutamiento y de la población analizada. Las velocidades de fricción empleadas son para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27..... 4.187
- Figura 4.114. Relación entre el caudal sólido de fondo adimensional τ_q y el parámetro de Shields τ_s en función de la densidad de reclutamiento y de la población analizada. Las velocidades de fricción empleadas son para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27. Se han representado los ajustes obtenidos para los ensayos de grupos de tallas, ecuación (4.35), y los de poblaciones, ecuación (4.40). 4.187
- Figura 4.115. Relación entre el ratio de movilización τ_E y el parámetro de Shields τ_s en función de la densidad de reclutamiento y de la población analizada. Las velocidades de fricción empleadas son para fondo sin berberechos, ver Tabla 4.27. Se han representado los ajustes obtenidos para los ensayos de grupos de tallas, ecuación (4.37), y los de poblaciones, ecuación (4.40)..... 4.188

C05. SINTÉISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Figura 5.1.	(a) Fotografía satélite de la Ría de Arousa y su situación en Galicia y (b) perspectiva del banco marisquero de los Lombos do Ulla.....	5.1
Figura 5.2.	Esquema del procedimiento del doble promediado aplicado en los ensayos de arrastre de berberechos con la tecnología PIV.....	5.4
Figura 5.3.	Secreción de bisco de un juvenil de <i>Macoma balthica</i> coloreado con alciano azul (Hiddink et al., 2002).	5.6
Figura 5.4.	(a) Esquema del canal de recirculación y (b) Montaje experimental del equipo PIV.....	5.8
Figura 5.5.	Configuración geométrica de los ensayos: (a) ensayos por grupos de tamaño y (b) ensayos de poblaciones.....	5.10
Figura 5.6.	Perfiles de velocidad doblemente promediados en los ensayos de fondo liso.	5.15
Figura 5.7.	Relación entre la velocidad media doblemente promediada y la velocidad de fricción media determinada a partir de la ley logarítmica de velocidades para los ensayos de grupos de tallas y poblaciones estacionales.	5.19
Figura 5.8.	Distribución de la velocidad horizontal promediada en el tiempo en el ensayo realizado con berberechos vivos de 25-30 mm para la velocidad V05 (0.45 m/s) Se pueden apreciar las diferencias en la distribución espacial de las rugosidades para el reclutamiento bajo y alto y su efecto sobre la estructura de las velocidades. En amarillo se han representado zonas de velocidad negativa...	5.20
Figura 5.9.	Campo vectorial de las perturbaciones espaciales de la velocidad (\tilde{u}, \tilde{w}) para el ensayo con el reclutamiento alto presentado en la Figura 5.8. Se ha representado la vorticidad del campo y las estelas persistentes formadas en el entorno de los berberechos más grandes del lecho.	5.22
Figura 5.10.	Perfiles de los esfuerzos dispersivos doblemente promediados para el ensayo de talla comprendida entre 20 y 25 mm: a) densidad baja y b) densidad alta.....	5.23
Figura 5.12.	Funciones de transporte de a) caudal sólido adimensional Φ_q y b) de ratio de movilización volumétrico Φ_E y el parámetro de Shields Ψ_s obtenidas en los ensayos de tallas (color rojo), de poblaciones (color azul) y con todos los datos disponibles (en color negro).	5.26

ÍNDICE DE TABLAS

C02. ECUACIONES FUNDAMENTALES Y DESCRIPCIÓN DE FLUJOS TURBULENTOS

Tabla 2.1.	Resumen de las diferentes estrategias empleadas en la hidráulica computacional (Spalart, 2000).....	2.8
Tabla 2.2.	Estructura vertical de un flujo hidráulicamente liso en canales abiertos: regiones, capas y características [δ : espesor de la capa límite, $y^+ = y \cdot u_* / \nu$ calado adimensionalizado respecto a la longitud característica de la capa límite viscosa δ_v], (Pope, 2000).....	2.22
Tabla 2.3.	Resumen de los principales estadísticos que representan la turbulencia.	2.79

C04. ANÁLISIS DEL ARRASTRE DEL BERBERECHO *C.edule*

Tabla 4.1.	Episodios de mortandad severa y moderada en el banco de los Lombos do Ulla Parada et al. (2007).....	4.6
Tabla 4.2.	Resumen de los parámetros de ensayo, velocidad libre U_∞ y de corte u^* (media \pm intervalo de confianza del 95%) y de las velocidades de natación (media \pm desviación típica) de la larva de <i>C.edule</i> en los ensayos realizados por Jonsson et al. (1991).	4.15
Tabla 4.3.	Resumen de los procesos y factores implicados en la estructura de las comunidades bentónicas producidos durante las etapas previas a la sedimentación, durante la sedimentación y las etapas posteriores a la misma. (Todd, 1998).	4.22
Tabla 4.4.	Comparación de las velocidades de sedimentación activa y pasiva para juveniles de <i>C.edule</i> (de Montadonuin, 1997).	4.33
Tabla 4.5.	Resumen de los principales parámetros de los ensayos para determinar la influencia de la actividad filtradora en la estructura de la capa límite desarrollada sobre un lecho de <i>Mytilus edulis</i> (van Duren et al., 2006).....	4.43
Tabla 4.6.	Descripción de los canales de la red BioFlow. El resto de características se pueden encontrar en Jonsson et al. (2006).....	4.49
Tabla 4.7.	Coefficientes de arrastre (media \pm desviación típica) correspondientes al umbral de movimiento de movimiento de varios cuerpos biogénicos (adaptado de Peña et al., 2008).....	4.54
Tabla 4.8.	Resumen de los ensayos realizados y sus parámetros más representativos.	4.61
Tabla 4.9.	Resumen de los principales parámetros de configuración del PIV.....	4.68
Tabla 4.10.	Valor de la pendiente del análisis de regresión para el análisis de la alometría tomando como variable independiente la longitud y comparación con los valores medios obtenidos de la literatura (valor medio \pm desv. estándar). .	4.90

Tabla 4.11.	Valores de las densidades de la concha y el berberecho obtenidos en la caracterización de los moluscos.	4.92
Tabla 4.12.	Resumen de las propiedades del flujo en los ensayos realizados sobre el lecho de arena sin moluscos. Los ensayos se han ordenado por velocidades crecientes: V01FL a V06FL, donde FL hace referencia a que son los ensayos de Fondo Liso. El resto de variables de la tabla se definen en el texto (§4.4.2.1).	4.95
Tabla 4.13.	Resumen de los parámetros de corte en los ensayos realizados sobre el lecho de arena de los Lombos do Ulla.	4.96
Tabla 4.14.	Parámetros y escalas geométricas en los ensayos realizados sobre el lecho de arena de los Lombos do Ulla.	4.97
Tabla 4.15.	Porcentaje de berberechos movilizado en función de la velocidad de la corriente y de la talla. Valores medios y error estándar (\bar{x}/σ). Los parámetros estado y reclutamiento están agregados en los anteriores.	4.108
Tabla 4.16.	Porcentaje de berberechos movilizado en función del estado y el reclutamiento. Valores medios y error estándar (\bar{x}/σ). Los parámetros velocidad de la corriente y talla están agregados en los anteriores.	4.109
Tabla 4.17.	Porcentaje medio de berberechos vivos movilizados en los ensayos por grupos de tamaños homogéneos. Valores medios y error estándar (\bar{x}/σ).	4.110
Tabla 4.18.	Porcentaje medio de berberechos muertos movilizados en los ensayos por grupos de tamaños homogéneos. Valores medios y error estándar ()	4.111
Tabla 4.19.	Análisis de la varianza de 4 factores con un modelo factorial con todas las interacciones para el análisis de la velocidad, talla, reclutamiento y estado sobre el porcentaje de berberechos movilizados. Ensayo de grupos de tallas.	4.112
Tabla 4.20.	Aplicación del método de comparaciones múltiples SNK y Ryan para el factor principal velocidad. La significancia del test ($\alpha=0.05$) SNK se marca en tipografía negrita y la del test de Ryan con un asterisco.	4.114
Tabla 4.21.	Aplicación del método de comparaciones múltiples Tukey HSD para el factor principal velocidad. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.	4.115
Tabla 4.22.	Aplicación del método de comparaciones múltiples SNK y Ryan para el factor principal talla. La significancia del test ($\alpha=0.05$) SNK se marca en tipografía negrita y la del test de Ryan con un asterisco.	4.116
Tabla 4.23.	Aplicación del método de comparaciones múltiples Tukey HSD para el factor principal talla. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.	4.116
Tabla 4.24.	Aplicación del contraste t de Student a los factores Densidad y Estado. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.	4.117
Tabla 4.25.	Definición de los niveles de velocidad con igual efecto sobre el porcentaje de berberechos movilizados de 15 a 20 mm. Ninguno de los grupos tiene una significación estadística relevante ($P<0.05$).	4.119

Tabla 4.26. Grupos de velocidad homogéneos sobre la movilización de los berberechos para todos los niveles de tallas analizadas. Ninguno de los grupos tiene una significación estadística relevante ($p < 0.05$).....	4.120
Tabla 4.27. Resumen de las propiedades del flujo en los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación estándar).....	4.121
Tabla 4.28. Velocidad de fricción media en función de los factores talla, densidad de reclutamiento y estado para los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación estándar).....	4.123
Tabla 4.29. Resumen de las características geométricas del lecho en función de los factores analizados para los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación estándar).....	4.124
Tabla 4.30. Resumen de las escalas geométricas para los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación típica).	4.127
Tabla 4.31. Posición del plano $z=0$ relativa a la longitud característica de la rugosidad λ y al diámetro medio de los moluscos en función de los factores talla y densidad de reclutamiento (valor medio \pm desviación típica).	4.139
Tabla 4.32. Velocidades de fricción en los ensayos por grupos de tallas (valor medio \pm desviación típica) para los factores velocidad-densidad y talla-densidad.	4.151
Tabla 4.33. Porcentaje de berberechos movilizado en función de la velocidad de la corriente y de la talla. Valores medios y error estándar (\bar{x}/σ). Los parámetros estado y reclutamiento están agregados en los anteriores.	4.161
Tabla 4.34. Porcentaje de berberechos movilizado en función del estado y el reclutamiento. Valores medios y error estándar (\bar{x}/σ). Los parámetros velocidad de la corriente y talla están agregados en los anteriores.....	4.162
Tabla 4.35. Porcentaje medio de berberechos vivos movilizados en los ensayos por grupos de poblaciones. Valores medios y error estándar (\bar{x}/σ).	4.164
Tabla 4.36. Porcentaje medio de berberechos muertos movilizados en los ensayos por grupos de de poblaciones. Valores medios y error estándar ().....	4.164
Tabla 4.37. Análisis de la varianza de 4 factores con un modelo factorial con todas las interacciones para el análisis de la velocidad, talla, reclutamiento y estado sobre el porcentaje de berberechos movilizados. Ensayo de grupos estacionales.	4.165
Tabla 4.38. Análisis de la varianza de 3 factores con un modelo factorial con todas las interacciones para el análisis de la velocidad, talla y reclutamiento sobre el porcentaje de berberechos movilizados. El factor estado se ha agrupado.	4.166
Tabla 4.39. Aplicación del método de comparaciones múltiples SNK y Ryan para el factor principal velocidad. La significancia del test ($\alpha=0.05$) SNK se marca en tipografía negrita y la del test de Ryan con un asterisco.....	4.167
Tabla 4.40. Aplicación del método de comparaciones múltiples Tukey HSD para el factor principal velocidad. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.....	4.168

Tabla 4.41.	Aplicación del contraste t de Student a los factores Densidad y Estado. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se señala con un asterisco.	4.169
Tabla 4.42.	Aplicación del método de comparaciones múltiples SNK para el factor principal talla. La significancia del test ($\alpha=0.05$) se marca con un asterisco.	4.169
Tabla 4.43.	Resumen de las propiedades del flujo en los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica).	4.171
Tabla 4.44.	Velocidad de fricción media en función de los factores talla, densidad de reclutamiento y estado para los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica).....	4.172
Tabla 4.45.	Resumen de las características geométricas del lecho en función de los factores analizados para los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica).....	4.173
Tabla 4.46.	Resumen de las escalas geométricas para los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica).	4.174
Tabla 4.47.	Velocidades de fricción en los ensayos de poblaciones estacionales (valor medio \pm desviación típica) para los factores velocidad-reclutamiento, talla-reclutamiento y estado-reclutamiento.	4.184

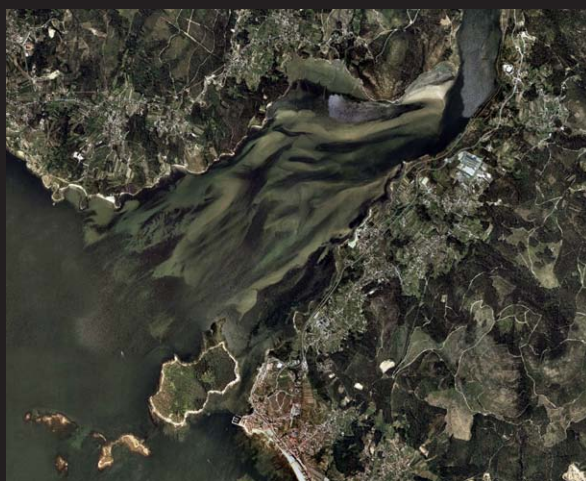
C05. SINTÉSIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tabla 5.1.	Resumen de los escenarios analizados en los ensayos de movilización de berberechos realizados en este estudio.....	5.7
Tabla 5.2.	Principales relaciones entre la anchura del berberecho c y las principales variables geométricas (la definición de las mismas se encuentra en §4.4.1)...	5.13
Tabla 5.3.	Resumen de los principales propiedades del flujo en los ensayos realizados sobre fondo liso. La nomenclatura de los ensayos ha sido V01FL a V06FL, donde donde “FL” hace referencia a Fondo Liso.	5.14
Tabla 5.4.	Porcentaje de berberechos movilizados en función de la velocidad de la corriente y de la talla. Ensayos de grupos de tamaños.....	5.16
Tabla 5.5.	Porcentaje de berberechos movilizados en función de la velocidad de la corriente y la talla. Ensayos de poblaciones estacionales.	5.17

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ARRASTRE DEL MOLUSCO *C.edule* CON LA METODOLOGÍA DEL DOBLE PROMEDIADO. ESTUDIO EN MODELO FÍSICO CON TECNOLOGÍA PIV

La hidrodinámica del flujo juega un papel muy importante en la mayoría de los procesos físicos que se desarrollan en ríos, lagos y aguas de transición. Además, la estructura y funcionalidad de las comunidades biológicas en estos ecosistemas acuáticos está fuertemente ligada y controlada por las relaciones que surgen entre los procesos físicos, químicos y biológicos. Con objeto de mejorar la gestión y el conocimiento de los ecosistemas acuáticos están surgiendo nuevas áreas en la Ingeniería Hidráulica y en la Mecánica de los Fluidos relacionadas con la Hidrodinámica de los Ecosistemas Acuáticos. Estas nuevas disciplinas cubren un amplio rango de escalas y de ecosistemas terrestres y acuáticos, y representan un buen ejemplo de la aproximación multidisciplinar de la ciencia moderna.

Un ejemplo aplicado de la interacción de la hidrodinámica en los ecosistemas acuáticos se puede encontrar en la desembocadura del río Ulla, en la ría de Arousa (Galicia). En el banco marisquero de los Lombos do Ulla se han registrado importantes episodios de mortandad del molusco *Cerastoderma edule*, asociados a fuertes descensos de salinidad y al arrastre de los stocks de este berberecho provocados por los episodios de precipitaciones y las crecidas del río.



El principal objetivo de esta investigación es mejorar el conocimiento del fenómeno de arrastre de los berberechos adultos. Para ello, en esta Tesis Doctoral se ha realizado un estudio hidrodinámico en laboratorio sobre el arrastre de varios grupos de berberechos adultos, con diferentes tamaños y número de individuos por superficie. Para la determinación de los campos de velocidades y esfuerzos turbulentos se ha empleado con éxito la tecnología Particle Image Velocimetry.

Para describir los parámetros hidrodinámicos del flujo rugoso que se produce sobre el lecho irregular y heterogéneo formado por los bivalvos se ha empleado la Metodología del doble promediado (Double Averaged Methodology). Con este procedimiento se han determinado los parámetros descriptores del flujo así como las distribuciones de velocidades, intensidades y tensiones, con sus términos turbulentos y también de forma o dispersivos. El trabajo realizado ha puesto de manifiesto la importancia de las corrientes secundarias y la tridimensionalidad del flujo cerca del lecho en las distribuciones de esfuerzos cortantes, y su relación con la distribución de tamaños y la densidad de los berberechos en el lecho.

En el análisis de los factores que afectan al arrastre de los moluscos se han empleado técnicas estadísticas habituales en los trabajos de ecología y biología marina como el Análisis de la Varianza. En el mismo, se han puesto de manifiesto ciertas interacciones entre el transporte del sedimento del lecho y el arrastre de los moluscos. Por último, la movilización de los bivalvos también se ha descrito a través del ajuste de funciones de transporte de caudal sólido de fondo, de aplicación habitual en la Ingeniería Fluvial.

