



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FINOS
EN UN CANAL CON LECHO DE GRAVA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

WILLIAM FRANCISCO LICANQUEO NOVOA

PROFESOR GUÍA:
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CRISTIÁN GODOY BARBIERI
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

SANTIAGO DE CHILE
2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: WILLIAM FRANCISCO LICANQUEO NOVOA
FECHA: 16/03/2016
PROF. GUÍA: Sr. YARKO NIÑO CAMPOS**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FINOS
EN UN CANAL CON LECHO DE GRAVA**

El lecho de grava en un río puede ser contaminado por partículas de sedimento fino, por ejemplo, en situaciones donde el material fino es liberado de un embalse a través de procesos como el dragado de sedimentos u otros. Procesos de este tipo tienen por finalidad aumentar la capacidad y vida útil del embalse, mejorar las condiciones ambientales de éste, así como reducir las inestabilidades producidas en el río aguas abajo. Sin embargo este proceso es perjudicial para los ecosistemas aguas abajo de la obra, ya que produce la depositación de sedimento fino en los espacios de poros del lecho, modificando el estado natural de este. El proceso de transporte del sedimento liberado se puede generar a través de suspensión o como arrastre de fondo. El objetivo de este estudio es recrear experimentalmente los fenómenos que afectan a sistemas fluviales de este tipo, en particular estudiar el fenómeno del gasto sólido de fondo de sedimentos finos sobre un lecho de grava y como se ven afectados ciertos parámetros asociados a la velocidad del flujo.

Para investigar el fenómeno se llevó a cabo un estudio experimental en el laboratorio de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, ubicado en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Allí se cuenta con un canal de acrílico de sección cuadrada de 30 cm y un largo de 12 m; una tolva ubicada al inicio del canal que contiene sedimento fino (arena) y una trampa de sedimentos localizada al término del canal. Dentro del canal se dispone de un lecho de grava cuyo diámetro medio es de 45 mm. La acción de la tolva permite insertar sedimento fino de diámetro medio 0,45 mm, hacia el interior del canal. Por otro lado, la trampa de sedimento posibilita la cuantificación del arrastre sólido de fondo. La posición de la arena con respecto a la grava se registró a través de un arreglo de cámaras fotográficas localizadas longitudinalmente, mientras que la velocidad del flujo en la zona fotografiada se midió con un Acoustic Doppler Velocimeter (ADV).

Resultados derivados de las mediciones de la velocidad del flujo muestran que la intensidad de la turbulencia presenta un comportamiento concordante con las predicciones realizadas por Nezu and Nakagawa (1993). Además se aprecia como el aumento de la exposición de la arena es inversamente proporcional a la intensidad del esfuerzo de corte de Reynolds. Por último, se desarrolla una expresión que permite predecir el gasto sólido de fondo del sedimento fino sobre un lecho de grava inmóvil, en función del esfuerzo de corte de fondo y la exposición de la arena, mostrando una mejora en la precisión con respecto al empleo de las relaciones clásicas para granulometría uniforme como las obtenidas en los estudios de Meyer-Peter and Müller (1948); Frank and Jørgen (1976); Ashida (1972).

...A mis padres.

Agradecimientos

A mis padres, por regalarme parte de sus vidas.

A mi padre, Francisco, por enseñarme a dar lo mejor de mi.

A mi madre, Luz, por su amor infinito y humildad.

Gracias por apoyarme en cada uno de mis proyectos, si los padres se eligieran los elegiría una y mil veces. Los amo con la vida...

A mi hermana; Nicole, por amarme y ayudar a conocerme mejor.

A mis prim@s, ti@s y abuel@s, por toda la buena vibra enviada.

Al Beto y Estrella, por rodearme de inocencia.

A mis amigos de Chiloe; Marco, Dani, Negro, Kenneth, Leo y Belu. Con ustedes uno viaja en el tiempo.

A Huenchuñir y Jorge, por los consejos y por ayudar a centrarme.

A Rolo, por estar ahí todos estos años.

A Peter, por acompañar en la travesía con la sonrisa, lo mejor de esta experiencia tu amistad.

A los amigos que conocí durante estos años; Chico, Vickson, Gustavo, Gabi, Georginho, Pali, Charlitos, Aru, Emilio, Mati, Cartes. Mención especial a los hidráulicos Edy, Soto, Fepo, Uribe, OSS, Serway, Salvador, Negrete, Vicky, Pacita, Ariel, Alex, Pino, Gerardo; pedazos de personas.

A Ciro y Natalia, por su ayuda en las experiencias y por traer el salsabor al laboratorio.

A Jorgito, por su calidez humana y por recordarme los otros planos.

Al Profe Yarko, por la confianza, la comprensión y el consejo en todos los momentos en que lo necesite. Sin su ayuda este trabajo no sería posible.

A Cristian y al profe Aldo, por la buena disposición en las correcciones y la buena onda en los pasillos.

A Jacqueline, por la amistad y por aportar el lado maternal al tercer piso.

A JD, por la amistad y por mostrarme su particular punto de vista.

A Yuyitsu por entregar la locura y alegría necesaria para cada día.

A Luis Pulgar, Esmirna, Oscarito y Pancho Tapia por facilitarme materiales e instalaciones anexas con la mejor de las disposiciones.

A Pancho Mella, Ricardo, Manuel, Victor, Roberto, Mónica M, Mónica G, Paty, Segundo, Natalia, Pato, Vivi, Negro Zuñiga y Álvaro; por las ayudas varias y su buena onda.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Descripción general	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivos Generales	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. Metodología	3
1.4.1. Estudio de los fenómenos físicos que gobiernan el experimento	3
1.4.2. Modificación, construcción y puesta en marcha del canal	3
1.4.3. Desarrollo de los experimentos	4
1.4.4. Análisis de datos registrados en el laboratorio	4
1.5. Estructura del Informe	4
2. Marco Teórico	6
2.1. Ecuaciones para flujo superficial	6
2.1.1. Ecuaciones de Navier Stokes	6
2.1.2. Ecuaciones promediadas de Reynolds	6
2.1.3. Ecuaciones promediadas de Reynolds	7
2.2. Caracterización del perfil de velocidades	8
2.2.1. Perfil de velocidad	9
2.3. Caracterización del esfuerzo de corte de fondo	9
2.3.1. Método ley logarítmica	9
2.3.2. Método esfuerzos de Reynolds	10
2.3.3. Método de la energía cinética turbulenta	10
2.4. Parámetros adimensionales	11
2.4.1. Número de Froude	11
2.4.2. Número de Reynolds	11
2.4.3. Densidad relativa sumergida del sedimento	11
2.4.4. Gasto solido de fondo adimensional	11
2.4.5. Esfuerzo de corte adimensional	12
2.4.6. Número de Reynolds de la Partícula	12
2.4.7. Número de Rouse	13
2.5. Transporte de sedimentos	13
2.5.1. Gasto solido de fondo para sedimento de tamaño uniforme	13
2.5.2. Corrección gasto solido de fondo	14
2.5.3. Gasto solido de fondo a nivel intersticial	15

2.6.	Espectro de densidad potencial	15
2.7.	Detección y remplazo de picos en series de datos del ADV	17
3.	Instalación y metodología experimental	19
3.1.	Montaje experimental	19
3.1.1.	Descripción general	19
3.1.2.	Cámara de entrada y sistema alimentador de agua	20
3.1.3.	Canal	21
3.1.4.	Sedimento Empleado	21
3.1.5.	Alimentador de sedimentos	21
3.1.6.	Trampa de sedimentos	23
3.1.7.	Placa Orificio	24
3.1.8.	Estación de tamizado	25
3.2.	Instrumentación	26
3.2.1.	Caja de adquisición y software SCI Beta 1.1	26
3.2.2.	Pieza oscura	27
3.2.3.	Sistema de cámaras	28
3.2.4.	Velocímetro acústico Doppler (ADV)	28
3.2.5.	Técnica PIV	29
3.3.	Metodología experimental	32
3.3.1.	Preparación de la experiencia	32
3.3.2.	Toma de muestras de arrastre de solido de fondo	33
3.3.3.	Análisis de fotografías	33
3.3.4.	Medición de velocidades con ADV	34
3.3.5.	Medición de velocidades con técnica PIV	36
4.	Resultados	39
4.1.	Experimentos	39
4.2.	Registros de parámetros asociados a la velocidad	41
4.2.1.	Perfil de velocidad	41
4.2.2.	Perfiles esfuerzo de Reynolds	42
4.2.3.	Intensidad de turbulencia	43
4.2.4.	Calidad medición de la turbulencias con ADV	44
4.2.5.	Espectros de las fluctuaciones de velocidad	45
4.3.	Caracterización esfuerzo de corte	47
4.3.1.	Esfuerzo de corte obtenido de mediciones del ADV	47
4.3.2.	Esfuerzo de corte extrapolado del perfil de velocidades	48
4.3.3.	Comparación de esfuerzos de corte	49
4.4.	Descripción del gasto sólido de fondo	51
5.	Discusiones	56
5.1.	Metodología	56
5.1.1.	Montaje experimental	56
5.1.2.	Instrumentación	57
5.1.3.	Metodología experimental	57
5.1.4.	Procesamiento de la información	58
5.2.	Resultados	58

5.2.1. Gasto solido de fondo	58
5.2.2. Parámetros asociados a la velocidad	59
6. Conclusiones	61
6.1. Metodología Experimental	61
6.2. Análisis del arrastre sólido de fondo	62
6.3. Parámetros derivados de la velocidad del flujo	62
Bibliografía	64
Anexos	67
Anexo A. Estimación porosidad de la grava	68
Anexo B. Cálculo densidad partículas de rodamina	69
Anexo C. Datos estudio experimental Kuhnle et al. (2012)	70
Anexo D. Estimación del número de Rouse para el montaje experimental	72
Anexo E. Espectros de frecuencia de las fluctuaciones de velocidad medidos con ADV	74

Índice de figuras

2.1. Esquema del lecho.	8
2.2. Esquema del lecho.	9
2.3. Traslape de segmentos X_{kj} de la señal para cálculo de espectro promedio (Welch, 1967).	17
3.1. Esquema instalación experimental.	20
3.2. Curvas granulometricas del material utilizado.	21
3.3. Servomotor que controla la expulsión de sedimento fino de la tolva.	22
3.4. Tolva alimentadora de sedimento fino.	22
3.5. Calibración tolva para sedimento fino de $D_{50_{arena}} = 0.45$ mm, giro entre 35-55.	23
3.6. Esquema zona final del canal.	23
3.7. Placa orificio.	24
3.8. Calibración placa orificio.	24
3.9. Transductor de presión de marca Honeywell.	25
3.10. Calibración sensores de presión.	25
3.11. Sistema de tamizado.	26
3.12. Caja de adquisición	27
3.13. Ventana de operación software SCI Beta 1.1.	27
3.14. GoPro Hero3 White.	28
3.15. Soporte de camaras.	28
3.16. Esquema transmisor y receptor acústico del ADV.	29
3.17. Carro ADV.	29
3.18. Laser.	30
3.19. Carro láser.	30
3.20. Cámara de alta velocidad Fastcam SA3	30
3.21. Partículas trazadoras.	31
3.22. Curvas granulometricas para las partículas trazadoras	32
3.23. Delimitación de contornos.	34
3.24. Caracterizacion de tiempos de convergencia.	35
3.25. Ruido vs SNR (Sontek, 1996).	36
3.26. Efectividad del metodo de despiking.	36
3.27. Curva granulometrica de la rodamina para PIV.	37
3.28. Esquema del montaje para PIV.	38
4.1. Gasto solido de salida en el tiempo para el experimento 3.	40
4.2. Perfil de velocidades medias $\langle \bar{U} \rangle$, en función de e/Dg	42

4.3.	Esfuerzos de Reynolds promediados , para distintos valores de e/Dg y Re .	42
4.4.	Intensidad de la turbulencia en función de y/h y la rugosidad ks/h .	43
4.5.	Espectros del primer perfil del experimento 4, puntos 1 y 2.	45
4.6.	Espectros del primer perfil del experimento 4, puntos entre 3 y 6.	46
4.7.	Extrapolación τ .	48
4.8.	proporcional a la velocidad.	48
4.9.	Comparación esfuerzos de corte.	49
4.10.	Comparación velocidad de corte.	50
4.11.	Comparación esfuerzos de corte.	51
4.12.	Datos experimentales contrastados con relaciones clásicas.	52
4.13.	Calidad del ajuste propuesto.	53
4.14.	Calidad del ajuste propuesto para los valores τ^*_{Re} .	54
4.15.	Comparación entre las ecuaciones de gasto solido de fondo.	54
A.1.	Porosidad grava.	68
D.1.	N° de Rouse para arena de diámetro 0,3 mm.	72
D.2.	N de Rouse para arena de diámetro 0,45 mm.	73
E.1.	Espectros del perfil 1 de 3, del experimento 1.	75
E.2.	Espectros del perfil 1 de 4, del experimento 2.	76
E.3.	Espectros del perfil 1 de 4, del experimento 3.	77
E.4.	Espectros del perfil 2 de 4, del experimento 4.	78
E.5.	Espectros del perfil 1 de 4, del experimento 5.	79
E.6.	Espectros del perfil 1 de 4, del experimento 6.	80

Índice de tablas

4.1. Resumen de experimentos realizados.	39
4.2. Especificación del gasto solido.	40
4.3. Errores experimentales.	41
4.4. Valores de frecuencia adimensionalizada.	44
4.5. Estimación de esfuerzo de corte a partir de los esfuerzos de Reynolds.	47
4.6. Estimación de τ_{log}^* y los parámetros asociados.	49
B.1. Calculo densidad de rodamina.	69
C.1. Datos experimentales de Kuhnle et al. (2012).	71

Capítulo 1

Introducción

1.1. Descripción general

Este trabajo de título consiste en la realización de un estudio experimental del transporte de sedimentos finos en un canal con lecho de grava. Esto se enmarca en el contexto de cómo lechos de grava se ven afectados por la depositación de sedimentos finos. Estos son nocivos por que actúan como medio de transporte de contaminantes o incluso por que solo su presencia afecta ciertos ecosistemas (Jobson and Carey, 1989). Fenómenos como éste se producen, por ejemplo, con el dragado de sedimentos en embalses y su liberación aguas abajo con el fin de aumentar la vida útil del embalse

El objetivo general es recrear experimentalmente, los fenómenos que afectan a este tipo de sistemas fluviales, para estudiar, en particular, el gasto sólido de fondo asociado a los sedimentos finos. Para llevar a cabo esto inicialmente, se realizó el estudio de los parámetros que condicionan los fenómenos de transporte, con tal de realizar las modificaciones y puesta en marcha del montaje experimental, que correspondió a un canal ubicado en el Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez, Universidad de Chile. Posterior a esto se desarrolló una metodología de trabajo para llevar a cabo los experimentos así como para el procesamiento de la información derivada de estos.

1.2. Motivación

El lecho de grava en un río puede ser contaminado por partículas de sedimento fino, por ejemplo cuando material fino es liberado de un embalse a través de procesos como el dragado de sedimentos, entre otros, (Diplas and Parker, 1992).

Procesos de este tipo tienen por finalidad el aumentar la capacidad útil del embalse, mejorar las condiciones ambientales de éste, así como reducir las inestabilidades producidas en el canal aguas abajo. Sin embargo este proceso es ecológicamente perjudicial para los ríos aguas abajo de la obra, ya que produce la depositación de partículas de sedimento en los espacios

de poros del lecho, entendiéndose como sedimentos fino partículas de un tamaño menor o igual a 2 mm (limo, arcilla o arenas). La utilización de los espacios intersticiales por estos últimos produce problemas de intercambio de oxígeno con el agua trayendo una serie de problemas ambientales, como la falta de oxigenación en los huevos de peces o la recirculación de nutrientes (Waters, 1995).

Existen estudios experimentales que han investigado el transporte de sedimentos en lechos compuestos por arena-grava, como lo son los estudios de Wilcock and Crowe (2003), alcanzando predicciones razonables. Sin embargo estos dejan de tener validez cuando la granulometría no es gradualmente variada, como sucede en este estudio, donde $D_{50_{grava}}/D_{50_{arena}} = 100$, y lo único que se transporta es el sedimento fino. Estudios experimentales más recientes, con configuraciones similares a las de este estudio, como el de Tuijnder (2010), hacen alusión a que debería ser un ajuste de las relaciones para granulometria uniforme, como Meyer-Peter and Müller (1948). Por otro lado Kuhnle et al. (2012) propuso una relación para el transporte en este tipo de configuraciones, pero válida solo para la zona bajo la grava y donde uno de los parámetros a obtener requiere un modelo de elevación digital para ser determinado.

El trabajo experimental propuesto en el siguiente documento tiene por principal motivación estudiar el transporte de sedimentos finos en un canal con lecho de grava, centrándose en avanzar en la comprensión del gasto solido de fondo y los parámetros derivados de la velocidad en el flujo, lo que en conjunto de estudios posteriores en las mismas instalaciones permitirá mejorar la comprensión de los procesos de contaminación producto de sedimento fino.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos Generales

El objetivo principal de esta investigación es estudiar experimentalmente la contaminación por sedimentos finos de un canal con lecho de grava.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Reparación, modificación e implementación de técnicas de medición de un canal presente en el Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez de la Universidad de Chile. Por reparación se entiende la reparación de filtraciones, operación correcta de la trampa de sedimentos y mantención de la estructura. Las modificaciones vienen asociadas a construir una nueva tolva que sea útil para el material a emplear, construir una placa orificio que permita medir el caudal para cada experiencia, logrando que estas variables se puedan registrar digitalmente. Las técnicas de medición tienen por objetivo la identificación de la interfaz arena-grava, así como también las velocidades del flujo, y la altura de escurrimiento.
- Generación de una metodología para el trabajo experimental, que permita desde recrear

el fenómeno interesado en estudiar, hasta manipular de buena manera la instrumentación empleada para caracterizar. Con esto, desarrollar y procesar los resultados de los fenómenos producidos en el canal.

- Análisis y discusión de los resultados obtenidos en la instalación experimental enfatizando el análisis en como la exposición de la arena afecta el gasto sólido de fondo comprobando la validez de relaciones que describen este fenómeno, además se analiza como se ven afectados algunos parámetros del flujo como lo son los esfuerzos turbulentos, perfiles de velocidad, etc.

1.4. Metodología

1.4.1. Estudio de los fenómenos físicos que gobiernan el experimento

Es fundamental entender los fenómenos que afectan a los sistemas fluviales del problema en estudio. El principal fenómeno a estudiar es el gasto sólido de fondo. Si bien no se presentan estudios que abarquen directamente el fenómeno como será recreado en la investigación, si se cuenta con aproximaciones de primer orden que permiten evaluar la capacidad que tiene el estudio experimental de poder reproducir el fenómeno de manera adecuada. Dentro de los parámetros que controlan el fenómeno del gasto sólido, el esfuerzo de corte es uno de los más relevantes, este tiene diversas maneras de estimarse es por eso que también se estudian las formas de estimar éste a partir de las velocidades del flujo y otros parámetros derivados de estas mediciones.

1.4.2. Modificación, construcción y puesta en marcha del canal

En esta etapa se busca recrear experimentalmente los fenómenos que afectan a los sistemas fluviales, para estudiar en particular el transporte de sedimentos. La necesidad del estudio experimental radica en que un ambiente más controlado, permite medir variables que en terreno serían muy difícil de registrar, logrando una mayor comprensión los fenómenos en estudio. Las etapas que se identifican son:

- Verificación del correcto funcionamiento del canal ubicado en el laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez de la Universidad de Chile, su sistema de alimentación y los dispositivos con los que cuenta. Se realizan las reparaciones necesarias.
- Para recrear de buena manera el fenómeno estudiado, se diseñan modificaciones necesarias como: i) Tolva alimentadora de sedimentos ii) Placa orificio iii) Trampa de sedimentos iv) Sistema de registro digital (caja de adquisición) para las dos primeras.
- Implementación de las modificaciones del montaje experimental y con ello obtener la correcta reproducción del fenómeno en estudio.

- Finalmente para medir variables de interés, como la interfaz arena-grava o la velocidad del flujo, se realiza la implementación de un sistema de cámaras y del sensor ADV (o técnica PIV en su defecto), respectivamente. Para desplegar esta instrumentación se realiza la construcción de una pieza oscura, soportes metálicos de cámara, carros con rieles para el plano láser y ADV, entre otros.

1.4.3. Desarrollo de los experimentos

Posterior a establecer una correcta operación del canal y de la instrumentación a utilizar, se desarrollará una metodología de trabajo, la que tiene por objetivo crear un procedimiento para preparar y desarrollar cada experiencia. Esto comprende desde recrear de manera correcta el fenómeno a observar, hasta una adecuada operación instrumental. Una vez que se tenga desarrollada la metodología de trabajo se llevarán a cabo los experimentos, los cuales serán registrados. Posterior a esto, se generará una metodología para el procesamiento preliminar de los datos obtenidos, permitiendo realizar el análisis de estos posteriormente.

1.4.4. Análisis de datos registrados en el laboratorio

Se realiza el análisis de los resultados experimentales, estudiando la validez de las relaciones que describen el gasto sólido de fondo para granulometría uniforme clásicas (Meyer-Peter and Müller, 1948; Frank and Jørgen, 1976), y se identifican las causas de no validez de estas. Además se estima el esfuerzo de corte a partir de las mediciones de velocidad por diversos métodos y se contrasta con el esfuerzo de corte medio. Finalmente, se analiza la calidad de las mediciones de estos últimos, para ver la validez que poseen.

1.5. Estructura del Informe

El informe se compone de seis capítulos, los que son descritos a continuación:

- **Capítulo 1: Introducción.** Se detallan los objetivos del trabajo, que son los que motivan el desarrollo del estudio experimental.
- **Capítulo 2: Marco Teórico.** Se describen las ecuaciones de flujo superficial para escurrimientos de este tipo: además se incluyen diversas maneras de caracterizar el esfuerzo de corte, se incluyen relaciones predictivas para el gasto sólido de fondo, para sedimentos uniformes. Se adiciona, además, una descripción del método de cálculo de densidad espectral como del método de eliminación de spikes de las series de velocidad.
- **Capítulo 3: Metodología Experimental.** En esta sección se realiza una descripción de los componentes de la instalación experimental y la instrumentación empleada para registrar las diversas variables. Además, se detalla la metodología llevada a cabo para

la preparación y realización de los experimentos.

- **Capítulo 4: Resultados Experimentales.** Se incluye la presentación de los resultados obtenidos para los parámetros derivados de la medición de velocidades, como lo son perfiles de velocidad, esfuerzos de Reynolds promediados e intensidad de la turbulencia. Se analiza y propone una expresión predictiva para el gasto sólido de fondo para este tipo de configuraciones. Incluye, también, información descriptiva de la calidad de las mediciones.
- **Capítulo 5: Discusión y Conclusiones.** Discusión acerca de la metodología experimental utilizada. Se incluyen sugerencias para perfeccionarla. Además se comparan los resultados obtenidos con estudios similares. Finalmente, se sintetizan las conclusiones relevantes del estudio.
- **Capítulo 6: Anexos.** Se presentan los datos utilizados del estudio de Kuhnle et al. (2012) y el detalle del cálculo de ciertos parámetros utilizados para diseñar o llevar a cabo el estudio como: porosidad de la grava, densidad de las partículas de rodamina, número de Rouse y espectros de frecuencia de las fluctuaciones de velocidad.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ecuaciones para flujo superficial

2.1.1. Ecuaciones de Navier Stokes

Las ecuaciones de movimiento gobernantes para un fluido newtoniano incompresible son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes, para fluidos homogéneos. Estas pueden ser escritas en notación tensorial como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial^2 x_j} \quad (2.1)$$

donde (x_1, x_2, x_3) son el conjunto de coordenadas cartesianas, cuyas respectivas velocidades son (u_1, u_2, u_3) . El termino p corresponde a la presión termodinámica; g_i es la aceleración del campo de fuerzas másicas, la cual depende de la coordenada cartesiana $i = 1, 2, 3$; ρ es la densidad del fluido y ν es la viscosidad cinemática.

Por otra parte, para un fluido incompresible la ecuación de continuidad viene dada por:

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

2.1.2. Ecuaciones promediadas de Reynolds

Producto de las limitadas capacidades computacionales, modelar flujos turbulentos a gran escala es impracticable. Como alternativa para modelar estos flujos surgen las ecuaciones de promediadas de Navier-Stokes por Reynolds (RANS). En éstas se descomponen las variables de la siguiente forma $V = \bar{V} + V'$, donde \bar{V} representa el promedio temporal de la variable y V' son sus fluctuaciones temporales. Con esto se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial^2 x_j} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.4)$$

de esta ecuación se puede observar la siguiente expresión para el esfuerzo de corte τ_{ij}

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2.5)$$

donde el termino de mano izquierda se denomina el esfuerzo de corte viscoso y el de la derecha corresponde al esfuerzo de corte turbulento.

2.1.3. Ecuaciones promediadas de Reynolds

Las RANS no permiten describir la estructura del flujo de una manera satisfactoria para la zona cercana a lechos altamente rugosos. En particular, este problema se hace mas notable si la altura de escurrimiento no es significativamente más grande que el diámetro característico del lecho. Para resolver estos problemas, se promedian las ecuaciones promediadas de Reynolds en planos paralelos al lecho. El procedimiento de promediado a un nivel z es definido como:

$$\langle \bar{V} \rangle (x, y, z, t) = \frac{1}{A_f} \int_{A_f} \int V(x', y', z, t) dx' dy' \quad (2.6)$$

donde V es una variable definida solo dentro del flujo y las llaves simbolizan el promedio espacial de ésta y el termino A_f es definido como la superficie ocupada por fluido dentro del plano promediado. A continuación se presentan las ecuaciones doblemente promediadas desarrolladas por Giménez-Curto and Lera (1996) para escurrimientos sobre lechos rugosos permeables.

Para la zona sobre la grava $z > H_{grava}$ las ecuaciones vienen descritas por

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_i \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial^2 x_j} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.8)$$

Mientras que para la zona bajo la grava están descritas por

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_i \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_i} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{A} \frac{\partial A \langle \bar{u}'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{A} \frac{\partial A \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial^2 x_j} - \frac{1}{\rho} \langle \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \rangle \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial A \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.10)$$

donde $A(z)$ es la función de la geometría de la rugosidad. Aberle (2007) describe esta, como la razón de A_{fluido}/A_{total} para una posición del eje z , siendo el valor de $A(z) = 1$ para $z > H_{Grava}$ y $A(z) = 0$ para zonas impermeables.

Es importante mencionar que, mientras las ecuaciones temporalmente promediadas se describen a través de $V = \bar{V} + V'$, las doblemente promediadas se describen de una manera análoga con una descomposición $\bar{V} = \langle \bar{V} \rangle + \tilde{V}$, donde el termino \tilde{V} corresponde a la fluctuación espacial.

2.2. Caracterización del perfil de velocidades

La distribución de velocidades en escurrimientos del tipo $H \gg \Delta$, donde Δ representa una escala de rugosidad como el diámetro característico de la grava que compone el lecho, pueden ser descritos a través de la división de la altura del flujo en 4 zonas (Nikora et al., 2001), donde 3 de estas se encuentran sobre H_{Grava} , mientras que las restantes se encuentran bajo ésta, como se aprecia en la Figura 2.1.

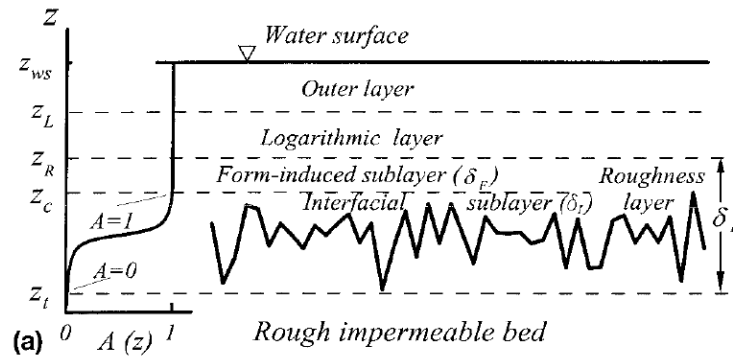


Figura 2.1. Esquema del lecho.

Sin embargo se sugiere que en la zona $z > H_{Grava}$, se puede representar el perfil de velocidades simplemente por un ajuste del tipo logarítmico, siempre y cuando la zona exterior (outer layer) sea corregida por un factor dependiente del n de Reynolds y que el espesor de la subcapa influenciada por la forma de las rugosidades sea tal que $\delta_F \approx 0$. Para la zona de $z < H_{Grava}$ la distribución de la velocidad sigue un comportamiento del tipo lineal.

2.2.1. Perfil de velocidad

Czernuszenko (2011) asumiendo un flujo bidimensional desarrollo un ajuste del tipo logarítmico para caracterizar el perfil de velocidad. Este, en particular, ésta validado experimentalmente para $z > H_{Grava}$ (que es donde usualmente se dispone de mediciones para el flujo), pero también nos es útil como una primera aproximación para describir la zona restante. Este ajuste viene dado por:

$$\frac{\langle \overline{u(y)} \rangle}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{k_{ef}} + B \quad (2.11)$$

donde k es la constante de von Karman, u_* es la velocidad de corte, k_{ef} es la altura de las rugosidades interfiriendo con el flujo (Figura 2.2) y B es una constante para flujos hidráulicamente rugosos.

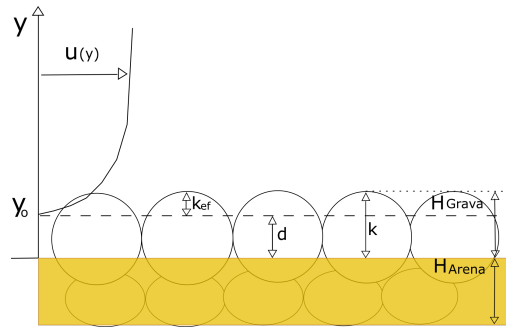


Figura 2.2. Esquema del lecho.

2.3. Caracterización del esfuerzo de corte de fondo

El esfuerzo de corte de fondo en flujo uniforme es uno de los parámetros críticos para caracterizar el gasto sólido de fondo. Si bien, por lo general, este se describe a través del esfuerzo de corte medio $\tau = \rho g R h S$. A continuación se describen otras maneras de obtener éste:

2.3.1. Método ley logarítmica

Reagrupando la ecuación 2.11, obtenemos la siguiente expresión para la velocidad de corte u_* :

$$u_* = \frac{\langle \overline{u(y)} \rangle}{\frac{1}{k} \ln \frac{y}{k_{ef}} + B} \quad (2.12)$$

Evaluando esta para los datos experimentales obtenidos y utilizando la relación $\tau = \rho u_*^2$, se puede obtener el esfuerzo de corte.

2.3.2. Método esfuerzos de Reynolds

Asumiendo flujo uniforme y una distribución de presiones bastante similar a la hidrostática, para la ecuación 2.7, correspondiente al eje x donde $z > H_{Grava}$, se puede obtener la siguiente expresión:

$$gS_o = \frac{\partial}{\partial y} \left(- \langle \overline{u'v'} \rangle - \langle \tilde{u}\tilde{v} \rangle + \nu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} \right) \quad (2.13)$$

donde S_o corresponde a la pendiente del lecho, integrando esta ecuación en el eje y, para la zona en que se valida, se obtiene la siguiente representación para el esfuerzo de corte:

$$\frac{\tau(y)}{\rho} = ghS_o \left(1 - \frac{y}{h} \right) = \left(- \langle \overline{u'v'} \rangle - \langle \tilde{u}\tilde{v} \rangle + \nu \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} \right) \quad (2.14)$$

En la última igualdad de la expresión 2.14, se pueden apreciar de izquierda a derecha: los esfuerzos de Reynolds promediados τ_{Re} , los esfuerzos inducidos por la forma τ_f y los esfuerzos viscosos promediados τ_v . Si se presenta un flujo altamente turbulento y la zona influenciada por la forma del lecho es despreciable, los dos últimos términos no se consideran y se obtiene la siguiente representación para el esfuerzo:

$$\tau = \tau_{Re} = -\rho \langle \overline{uv} \rangle \quad (2.15)$$

2.3.3. Método de la energía cinética turbulenta

El esfuerzo de corte de fondo puede ser estimado a través de la energía cinética turbulenta TKE. Esta viene expresada por:

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.16)$$

Soulsby (1981) encontró la siguiente relación de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte medio y la energía cinética turbulenta:

$$|\tau| = \rho C_1 TKE \quad (2.17)$$

donde para estudios de laboratorio Pope et al. (2006) emplearon el valor de la constante $C_1 = 0,19$.

2.4. Parámetros adimensionales

En la siguiente sección se describen los parámetros adimensionales empleados en la memoria. Estos son utilizados ya sea para caracterizar el flujo, gasto sólido de fondo, etc. Estos surgen del análisis dimensional del problema, siendo los siguientes los más relevantes.

2.4.1. Número de Froude

Expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales. Viene dada por la razón entre una velocidad característica, como la velocidad media U , y la raíz del producto entre la aceleración de gravedad g y el radio hidráulico R_h :

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gR_h}} \quad (2.18)$$

2.4.2. Número de Reynolds

Este parámetro indica la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas, permitiendo determinar si el flujo es laminar o turbulento. Se compone por la razón del producto de la velocidad media U y el radio hidráulico R_h , con la viscosidad cinemática ν en el denominador:

$$R_e = \frac{UR_h}{\nu} \quad (2.19)$$

2.4.3. Densidad relativa sumergida del sedimento

Es la relación entre la densidad del sedimento, ρ_s , y del fluido, ρ . Se expresa de la siguiente forma:

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (2.20)$$

2.4.4. Gasto sólido de fondo adimensional

Es la adimensionalización del gasto sólido de fondo por unidad de ancho q . Para esto se divide el gasto sólido de fondo q , por la raíz cuadrada del producto entre la densidad relativa del sedimento R , la aceleración de gravedad g y el diámetro característico del sedimento D_s , como se presenta a continuación:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{gRD_s}} \quad (2.21)$$

Cuando se pretende estudiar relaciones para granulometría extendida, utilizar la variable q^* no es conveniente ya que la dependencia del diámetro característico del material queda en esta variable, como en el esfuerzo de corte. En pos de eliminar esta dependencia, la tasa de transporte se define a través de la variable W_i^* :

$$W_i^* = \frac{Rgq}{u_*^3 F_i} \quad (2.22)$$

donde la razón q/F_i representa una medida de la cantidad de material transportado asociado al diámetro d_i . En particular, para estudios donde existe una granulometría uniforme, la expresión queda de la siguiente forma:

$$W^* = \frac{Rgq}{u_*^3} \quad (2.23)$$

2.4.5. Esfuerzo de corte adimensional

Corresponde a la adimensionalización del esfuerzo de corte medio τ . Este se divide por el producto del diámetro característico del sedimento D_s , la densidad relativa R , la aceleración de gravedad g y la densidad del agua ρ , como se aprecia en la siguiente expresión:

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g R D_s} \quad (2.24)$$

El esfuerzo de corte empleado, τ , corresponde al esfuerzo de corte medio, el cual viene derivado de un balance de fuerzas para escurrimientos uniformes. Este es expresado por $\tau = \rho g R h S$, donde $R h$ es el radio hidráulico y S es la pendiente.

El esfuerzo adimensional se puede relacionar con la velocidad de corte a través de la siguiente expresión:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.25)$$

2.4.6. Número de Reynolds de la Partícula

Es un parámetro que cuantifica de la influencia que tienen las fuerzas viscosas del flujo en el movimiento de las partículas. Se presenta en la siguiente ecuación, donde D_s es el diámetro

característico del sedimento, ν es la viscosidad cinemática y u_* representa la velocidad de corte, pero también se estila usar la velocidad de sedimentación w_s :

$$Re_p = \frac{u_* D_s}{\nu} \quad (2.26)$$

2.4.7. Número de Rouse

Es un parámetro que permite determinar el tipo de transporte de sedimento que predominara en el escurrimiento. Viene dado por la razón entre la velocidad de sedimentacion w_s y el producto entre la velocidad de corte u_* y la constante de von Karman k , como se puede apreciar a continuación:

$$R_o = \frac{w_s}{k u_*} \quad (2.27)$$

2.5. Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos en cauces naturales se puede clasificar en dos tipos, como lo son transporte en suspensión y transporte de fondo.

El transporte en suspensión, es aquel durante el cual las partículas de sedimento son difundidas en la totalidad de la columna de agua, teniendo un infrecuente contacto con el lecho. El transporte de fondo, en contraposición, es aquel durante el cual las partículas de sedimento transportadas por el flujo se mantienen en frecuente contacto con el lecho. El movimiento de estas partículas ocurre fundamentalmente en tres submodos distintos deslizamiento, rotación y saltación, siendo este ultimo el predominante.

2.5.1. Gasto solido de fondo para sedimento de tamaño uniforme

A partir de la información respecto al proceso de saltacion recopilada por Niño et al. (1994) y Niño and García (1998), formularon de una manera analítica una relación que permita determinar el gasto solido de fondo inducido por un flujo dado sobre un lecho de sedimento de tamaño uniforme. Esta viene descrita por:

$$q^* = a(\tau_* - \tau_{*c})(\tau_*^{1/2} - b\tau_{*c}^{1/2}) \quad (2.28)$$

esta expresión tiene la misma forma de la relación empírica de gasto solido de fondo propuesta por Frank and Jørgen (1976) y Ashida (1972)

$$q^* = 18,74(\tau_* - \tau_{*c})(\tau_*^{1/2} - 0,7\tau_{*c}^{1/2}) \quad (2.29)$$

$$q^* = 17(\tau^* - \tau^*_{*c})(\tau^*{}^{1/2} - \tau^*_{*c}{}^{1/2}) \quad (2.30)$$

donde el valor de τ^*_{*c} viene dados por 0,05, ademas resulta similar a la propuesta por Meyer-Peter and Müller (1948):

$$q^* = 8(\tau^* - \tau^*_{*c})^{3/2} \quad (2.31)$$

donde $\tau^*_{*c} = 0,048$. Esta ultima es una de las más utilizadas en la predicción del gasto sólido de fondo, principalmente por la simplicidad de su aplicación y por poseer una base empírica extensa de un total de 251 experimentos, donde el transporte de fondo se encuentra en condiciones equilibrio, con flujo permanente y uniforme. Es importante tener en cuenta que pequeños errores en la estimación de τ^* pueden conducir a grandes errores en la estimación de q^* .

2.5.2. Corrección gasto solido de fondo

Tuijnder (2010) desarrollo experimentos para estudiar las formas de fondo en una configuración, bimodal de arena y grava, donde $D_{50Grava}/D_{50Arena} \approx 15$, en la que, al igual que en este estudio solamente se transportaban las arenas. Para estimar el gasto solido de fondo usó una corrección de las formulas de Meyer-Peter and Müller (1948) de la forma:

$$q^* = \psi \cdot q^*_{MPM} \quad (2.32)$$

donde q^*_{MPM} representa a la estimación tradicional del gasto sólido de Meyer-Peter and Müller (1948) y ψ es un factor de ajuste que según Struiksma (1999) puede corresponder a las siguientes relaciones:

$$\psi = d/d_o \quad (2.33)$$

$$\psi = \sin(\pi d/2d_o) \quad (2.34)$$

donde d es la altura de la arena y d_o corresponde al valor sobre el cual converge el gasto medido con el predicho por las relaciones tradicionales. Finalmente Tuijnder (2010) concluyó que la relación que mejor se ajustaba para la predicción del gasto correspondía a la siguiente relación:

$$q^* = (1 - p)q^*_{MPM} \quad (2.35)$$

donde p corresponde al porcentaje descubierto del lecho. Es importante destacar que en este estudio el transporte intersticial es despreciable.

2.5.3. Gasto solido de fondo a nivel intersticial

Kuhnle et al. (2012) desarrolló estudios con el fin de predecir el gasto solido de fondo para la relación $D_{50Grava}/D_{50Grava} \approx 100$, dentro de la zona de la grava, es decir para $H_{Arena} < H_{Grava}$. El gasto sólido viene descrito por:

$$q^* = 2,29 \cdot 10^{-5} A(z_{arena})^{2,14} \left(\frac{\tau^*}{\tau^*_c} \right)^{3,49} \quad (2.36)$$

donde $A(z_{arena})$ es la función de la geometría de la rugosidad, evaluada para la altura de la arena con respecto al fondo. Esta función se obtiene a partir de un modelo de elevación digital. Es importante mencionar que la expresión 2.36 no tiene validez para $H_{Arena} > H_{Grava}$ y esta no se desprende de un desarrollo analítico mayor, sino que corresponde principalmente a un ajuste numérico.

2.6. Espectro de densidad potencial

El espectro de densidad de potencia (PSD) permite determinar la distribución de la energía a lo largo de un intervalo de frecuencias. Las funciones de densidad espectral pueden ser definidas equivalentemente de tres maneras: mediante funciones de correlación, mediante la transformada de Fourier finita y mediante operaciones de filtro, promedio y elevación cuadrada (Bendat and Piersol, 2000).

Sea $y_k(t)$ el registro de una muestra y $0 \leq t \leq T$ un intervalo de tiempo finito, entonces la transformada de Fourier finita de $y_k(t)$, $Y_k(f, T)$, es :

$$Y_k(f, T) = \int_0^T y_k(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.37)$$

Con ello, la función de densidad autoespectral, $G_{yy}(f)$ es (Bendat and Piersol, 2000):

$$G_{yy}(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E [|Y_k(f, T)|^2] \quad (2.38)$$

Esta última fórmula es estimada por la transformada de Fourier rápida (FFT), la cual tiene la ventaja de reducir los tiempos computacionales de cálculo. La aplicación de la transformada de Fourier FFT sobre una señal $X(j)$, $j = 0, 1, \dots, N - 1$; segmentada y promediada, se conoce como el método de Welch. El tratamiento Welch de la señal genera una mejora notable de la correlación de los datos, mejorando la confiabilidad de la estimación (Welch, 1967).

Este método traslapa K segmentos de la señal $X(j)$, cada uno de largo L . Calcula un espectro para cada segmento, los cuales posteriormente son promediados. Cada uno de los segmentos se encuentran distanciados inicialmente por una cantidad D de puntos. De acuerdo al diagrama

de la Figura 2.3, se obtiene que $N = (K - 1)D + L$. De esta manera, se define una sucesión de nuevas series $X_k(j)$ dependientes del segmento k , con la forma:

$$X_1(j) = X_j, j = 0, \dots, L - 1. \quad (2.39a)$$

$$X_2(j) = X_{j+D}, j = 0, \dots, L - 1. \quad (2.39b)$$

$$X_k(j) = X(j + (k - 1)D), j = 0, \dots, L - 1. \quad (2.39c)$$

El método de estimación del espectro promedio comienza con el cálculo de los periodogramas modificados, $I_k(f_n)$. Éstos se construyen considerando una ventana de información $W(j)$, con $j = 0, \dots, L - 1$, y calculando la transformada finita de Fourier, $A_k(n)$, a las secuencias de la forma $X_k(j)W(j)$. De esta forma, se obtiene:

$$A_k(n) = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} X_k(j)W(j)e^{-2kijn/L} \quad (2.40)$$

donde $i = \sqrt{-1}$. Además, los periodogramas modificados, $I_k(f_n)$, son iguales a:

$$I_k(f_n) = \frac{L}{U} |A_k(n)|^2, k = 1, 2, \dots, K. \quad (2.41)$$

donde:

$$f_n = \frac{n}{L}, n = 0, \dots, L/2. \quad (2.42a)$$

$$U = \frac{1}{L} \sum_{j=0}^{L-1} W^2(j) \quad (2.42b)$$

Finalmente, se obtiene el valor del espectro estimado, $\hat{P}(f_n)$, como el promedio de los periodogramas $I_k(f_n)$ (Welch, 1967):

$$\hat{P}(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_k(f_n) \quad (2.43)$$

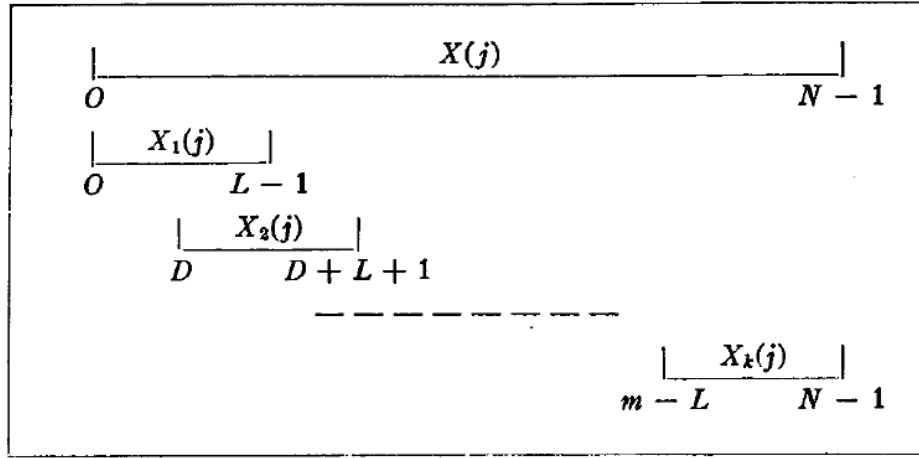


Figura 2.3. Traslapo de segmentos $X_k(j)$ de la señal para cálculo de espectro promedio (Welch, 1967).

2.7. Detección y remplazo de picos en series de datos del ADV

Los ADV son instrumentos de gran popularidad, tanto en terreno como en laboratorio, producto de su buena precisión para caracterizar la velocidad del flujo. Sin embargo, este posee sus desventajas ya que dentro de sus series de datos se generan "spikes". Los spikes se atribuyen al fenómeno de aliasing, el cual puede producirse cuando el flujo excede las velocidades prefijadas por el usuario o cuando existen contaminación de impulsos previos, los cuales pueden provenir del reflejo sobre geometrías complejas.

El método de espacio fase 3D, es el algoritmo mas eficiente para remover "spikes" del registro de velocidades entregadas por un ADV. Este método fue propuesto por Goring and Nikora (2002) y Wahl (2003) sugirió una modificación de éste. Este método emplea el concepto de un mapa de Poincaré, en cual la variable registrada u , su primera y segunda derivada, son graficadas. Los puntos localizados fuera de la elipse en el mapa de Poincaré son eliminados. Este proceso se realiza de forma iterativa, hasta que el número de irregularidades detectadas se vuelve cero. El procedimiento que realiza el algoritmo es resumido por Mori et al. (2007) de la siguiente manera.

1. Calcular las primeras y segundas derivadas de la velocidad u .
2. Calcular la desviación estándar de las 3 variables calculadas previamente, σ_u , $\sigma_{\Delta u}$, y $\sigma_{\Delta^2 u}$.
3. Calcular el umbral universal donde $\lambda = \sqrt{2 \ln N}$ donde N es el numero de datos.
4. Calcular la correlación entre u y la segunda derivada Δu^2 .
5. Generar una elipsoide inclinada de u , Δu y Δu^2 con el angulo calculado de la correlación.
6. El mayor y el menor eje de la elipsoide viene dado por $\lambda \sigma_u$, $\lambda \sigma_{\Delta u}$ y $\lambda \sigma_{\Delta^2 u}$, respectivamente.

7. Identificar los puntos que quedan afuera de la elipsoide y remplazarlos. Continuar el proceso hasta que no existan reemplazos necesarios.

El remplazo de datos previamente mencionado puede realizarse de diversas maneras, como; sustituir por el valor anterior, sustituir por el valor promedio de todas las mediciones, emplear un ajuste polinómico de los puntos colindantes al "spike" entre otros. Ninguno de estos métodos tiene más validez que otro, aunque Goring and Nikora (2002) sugieren utilizar una interpolación del tipo cúbico en la vecindad de los 12 puntos colindantes al "spike".

Es importante mencionar que este método es válido para cualquiera de los componentes del flujo, pero en el que suele ser más frecuente este problema es en la componente principal (eje x).

Capítulo 3

Instalación y metodología experimental

En el presente capítulo se describe el montaje experimental localizado en el laboratorio de Hidráulica Francisco J. Dominguez. Además, se incluye la metodología empleada para llevar a cabo las experiencias.

Dentro del montaje se hace alusión a las partes que componen la instalación experimental para recrear el fenómeno propiamente tal, así como la instrumentación necesaria para realizar la adquisición de datos como mediciones de la interfaz arena-grava y velocidades en el flujo. Dentro de la metodología se describen los pasos necesarios para recrear el fenómeno deseado, así como también los métodos utilizados para medir las variables de interés. Además, se incluye el procesamiento que se realiza a la información obtenida.

3.1. Montaje experimental

3.1.1. Descripción general

Para realizar el estudio de como se ven afectado los ríos con lecho de grava producto de la contaminación por sedimentos finos, se dispone de la instalación experimental que se detalla en este y los siguientes subcapítulos.

La instalación experimental (Figura 3.1) consiste en un canal de acrílico, de 10 mm de espesor, cuya forma es rectangular y abierta. Este posee 12 m de largo, con un ancho y alto de 30 cm. Sobre este canal se monta un lecho de grava de aproximadamente 7 cm de espesor y cuyo diámetro medio es de 4.5 cm. El canal reposa sobre un sistema de apoyos ajustables, los cuales permiten variar su pendiente.

Posterior a la zona donde se desarrolla el fenómeno en estudio, el canal presenta una grada que evita el desplazamiento del lecho, seguida por una fosa que captura el material corres-

pendiente al arrastre de fondo, y una clapeta de altura regulable para controlar la altura de escurrimiento.

Además, existe una trampa de sedimento, que corresponde a una caja prismática, donde su armazón se compone principalmente de plástico y cuyas paredes están recubiertas en su mayoría por una malla Tyler N^o 200, la cual está conectada a la fosa permitiendo recuperar el material depositado. De esta manera, se puede obtener valores promedios del gasto sólido de fondo en un determinado instante.

La arena a emplear tiene un diámetro medio de 0,45 mm. Esta se introduce al experimento a través de un sistema dispensador. Este se compone de una caja de acrílico, la cual posee un dúo de servomotores, los cuales se encargan de descargar el material sobre una bandeja, cuya función es distribuir de manera uniforme el sedimento en el ancho del canal.

Para ajustar el caudal a utilizar en cada experiencia, se construye e implementa una placa orificio. La interfaz arena-grava se caracteriza entre los 3 y 6 metros, a través de un sistema de cámaras GoPro Hero 3 White. Finalmente para caracterizar el flujo se utilizan instrumentos, como un ADV de marca Sontek, aunque también se emplea, pero no simultáneamente, la técnica PIV. Esta requiere la utilización de cámaras de alta velocidad, láser y partículas de rodamina.

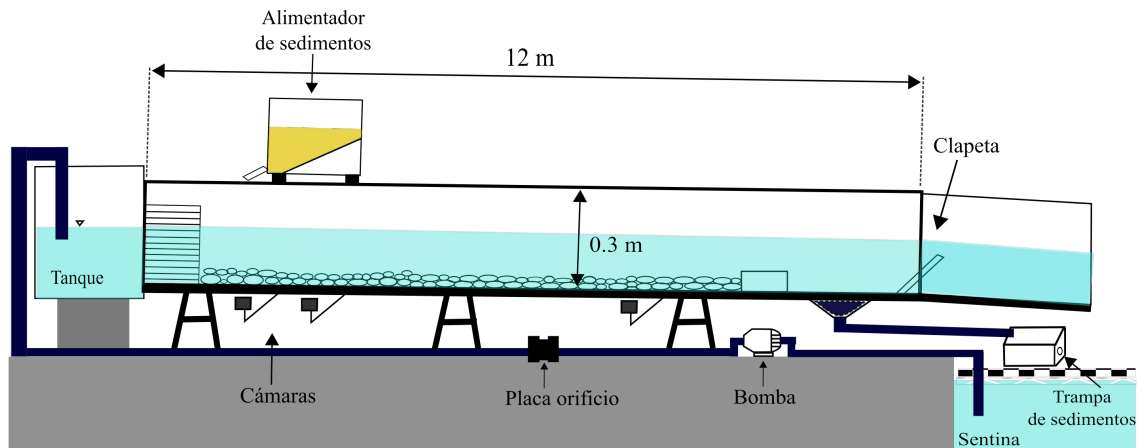


Figura 3.1. Esquema instalación experimental.

3.1.2. Cámara de entrada y sistema alimentador de agua

La cámara de entrada al canal es una estructura metálica de sección transversal trapezoidal, con capacidad de almacenamiento de aproximadamente 0.5 m³. El agua es transportada a la cámara desde una sentina, con capacidad de almacenamiento de aproximadamente 36 m³, por medio de una tubería de 4" de diámetro. Para realizar el impulso del agua se cuenta con una bomba de marca Pedrollo, de 2.2 HP.

Entre la estructura metálica y el inicio del canal se cuenta con un sistema aquietador del flujo, el cual está compuesto por una red de tubos de PVC de 20 mm de diámetro y 10 cm de largo, los cuales cubren en su totalidad la sección transversal del canal.

3.1.3. Canal

El canal rectangular tiene una longitud de 12 m, mientras que su ancho y alto es de 30 cm. La estructura basal sobre la cual se edifica el canal, se compone de acero, sobre esta se montan paredes de acrílico de 10 mm y un fondo de madera. A su vez, esta estructura reposa sobre apoyos de acero de altura regulable manualmente, dotando al sistema de un rango de pendientes entre 0 y 1 %.

Al final de la zona destinada a recrear el fenómeno, existe una grada que tiene por finalidad evitar el arrastre del lecho. Enseguida, se encuentra una fosa que permite la captura del material transportado. Luego se encuentra una clapeta regulable manualmente, que permite ajustar la altura de escurrimiento. Finalmente, el canal termina en una canaleta de metal que encauza el escurrimiento hacia una sentina.

3.1.4. Sedimento Empleado

Para conformar el lecho se utiliza una grava del tipo redondeada, cuyo diámetro característico es $D_{50grava}=45$ mm. Esta se pinta de color negro para facilitar la detección de la altura de la arena en un posterior análisis de imágenes. Por otra parte, el sedimento fino que se emplea es una arena rubia, con un diámetro característico $D_{50arena}=0,45$ mm. En la Figura 3.2 se presentan las curvas granulométricas de los materiales utilizados.

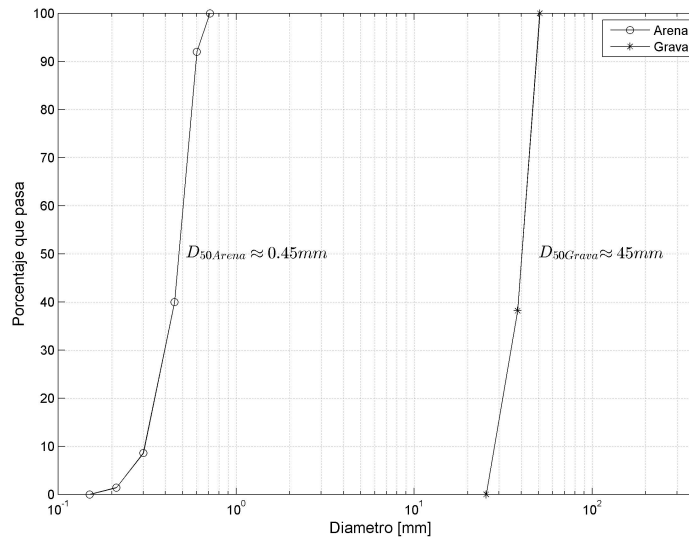


Figura 3.2. Curvas granulométricas del material utilizado.

3.1.5. Alimentador de sedimentos

El sistema alimentador de sedimentos finos (Figura 3.4) consiste en una caja de acrílico, con un ancho de 35 cm y un largo y alto de 50 cm. En su interior, posee una pendiente interior

de 40°, que tiene por objetivo acumular el material en la parte frontal de la tolva. En la zona inferior de la caja se localizan dos ventanillas, donde en cada una se encuentra una paleta conectada a un servomotor Hitec 850 (Figura 3.3) que controla la expulsión del material.



Figura 3.3. Servomotor que controla la expulsión de sedimento fino de la tolva.

En el lugar de descarga de la tolva se encuentra una bandeja distribuidora, la cual tiene como función distribuir en forma transversal al flujo el sedimento entregado, evitando que la alimentación sea efectuada como dos descargas puntuales.

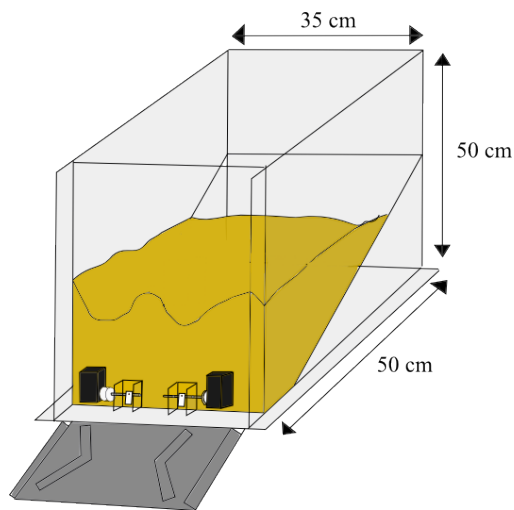


Figura 3.4. Tolva alimentadora de sedimento fino.

Los servomotores funcionan de manera alternada (mientras uno produce la entrega de material el otro restaura su posición), siendo controlados de forma simultánea a través del software SCI 2.0, el cual permite seleccionar parámetros, como la velocidad a la cual las paletas se desplazan y el rango de giro que tendrán. Para obtener la tasa a la cual se entrega el material al flujo, se realiza una calibración alternando los valores de la velocidad de los motores para cada posición de giro (Figura 3.5).

Tanto los valores de velocidad como los de giro son valores entregados por el software y no se asocian a unidades tradicionales.

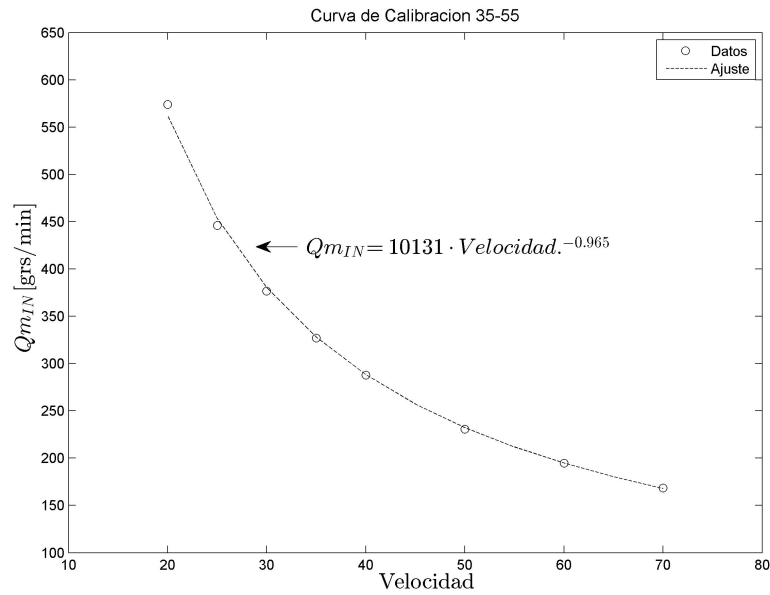


Figura 3.5. Calibración tolva para sedimento fino de $D_{50_{arena}} = 0.45$ mm, giro entre 35-55.

3.1.6. Trampa de sedimentos

La trampa de sedimento (Figura 3.6) se posiciona posterior a la grada que da por finalizada la zona donde se estudia el fenómeno. Esta consiste en una fosa de forma trapezoidal de volumen $0.018 m^3$, que al incrementar la sección transversal del canal produce la depositación del material. Esta fosa consta de un tapón, que al elevarlo libera el material a través de una tubería de PVC de 2.5" de diámetro, hacia una caja ubicada en el exterior. Esta caja tiene dimensiones 45 cm de largo, 35 cm de ancho y 30 cm de alto, y sus paredes se encuentran recubiertas con una malla Tyler N° 200, la cual permite retener el sedimento para su posterior cuantificación.

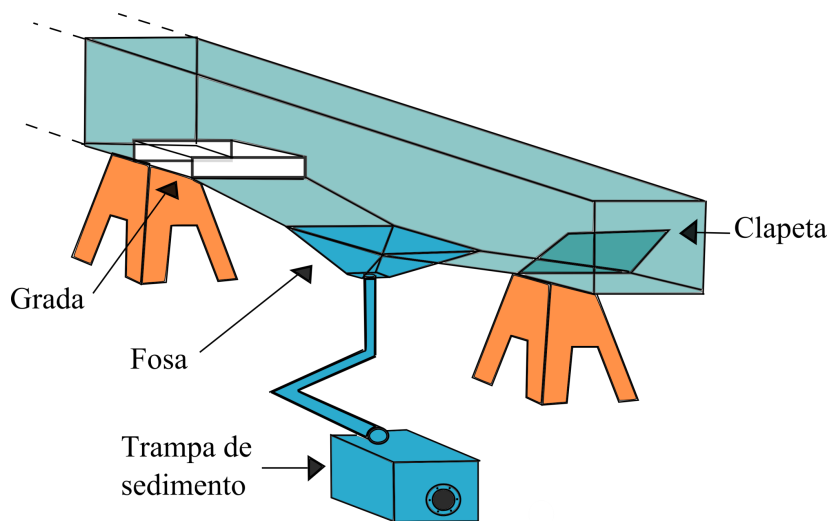


Figura 3.6. Esquema zona final del canal.

3.1.7. Placa Orificio

Para registrar el caudal con el que se trabaja, se diseña una placa orificio con las características presentes en la Figura 3.15, la cual esta instalada en la cañería que alimenta el canal.

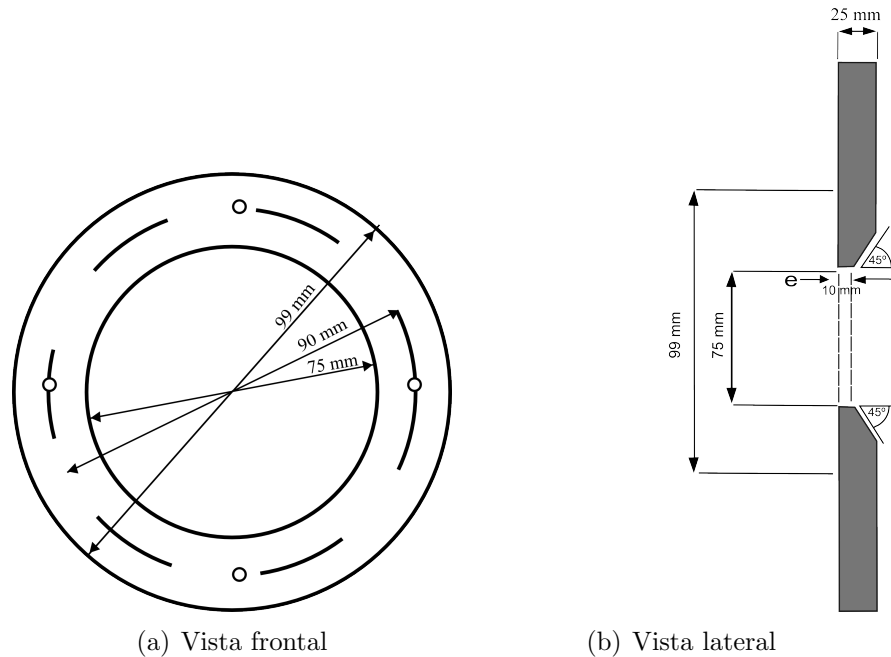


Figura 3.7. Placa orificio.

Para registrar las diferencias de presión se conecta la placa a unos piezómetros. La calibración de la placa se realiza a través del aforo del flujo de agua en un estanque de $0.5 m^3$. Cada punto de la curva esta compuesto por 3 aforos (Figura 3.8).

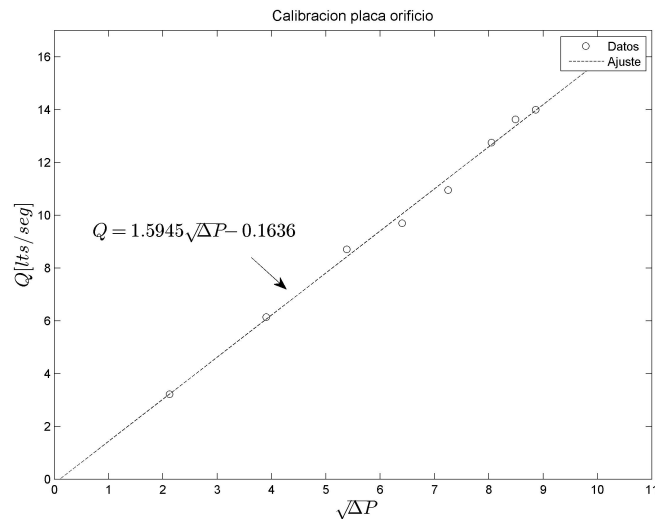


Figura 3.8. Calibración placa orificio.

Para la digitalización y el registro de esta variable se implementaron transductores de presión de la serie PX2 marca Honeywell (Figura 3.9), cuyas principales características son:

- Conector 18 NPT.
- 0 a 30 PSI presión absoluta.
- Exactitud de 0.25 %.



Figura 3.9. Transductor de presión de marca Honeywell.

Estos sensores no poseen calibración de fábrica, por lo que ésta se realiza de dos maneras. En la primera se utilizaron las instalaciones del MECESUP IDIEM, donde se conectaron los sensores a la maquina de ensayos triaxiales, permitiendo variaciones de presión de 0.5 PSI, mientras que en la segunda se utiliza una pipeta, la cual se llena gradualmente con variaciones de 0.1 PSI (Figura 3.10).

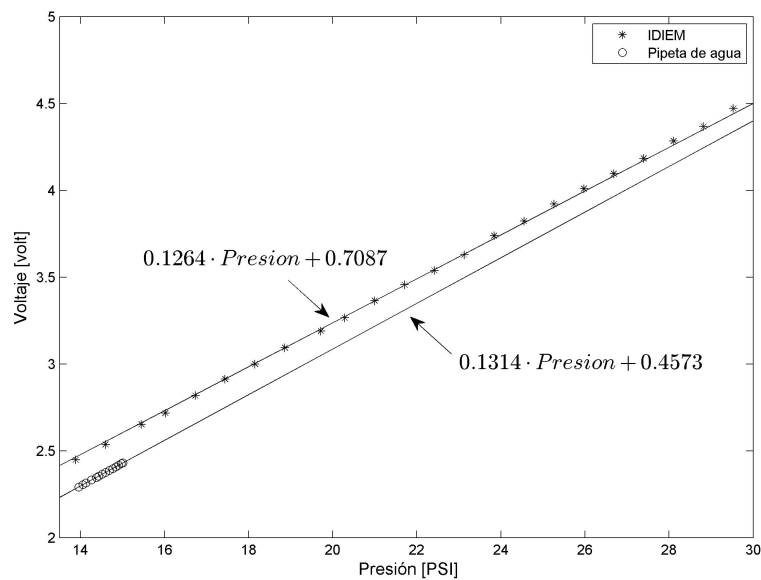


Figura 3.10. Calibración sensores de presión.

3.1.8. Estación de tamizado

Para realizar las curvas granulométricas de la fracción fina (tamaños ≤ 1 mm) del gasto sólido de fondo y del lecho para las diversas experiencias, se cuenta con una estación de tamizado (Figura 3.11). Esta consiste en un soporte donde se disponen los tamices en una configuración en línea, ordenados según el tamaño de malla en orden descendiente. Estos son sacudidos a

través de un motor que genera una vibración sobre el sistema, permitiendo el tamizado del sedimento. Posteriormente cada fracción retenida es pesada en una balanza digital.

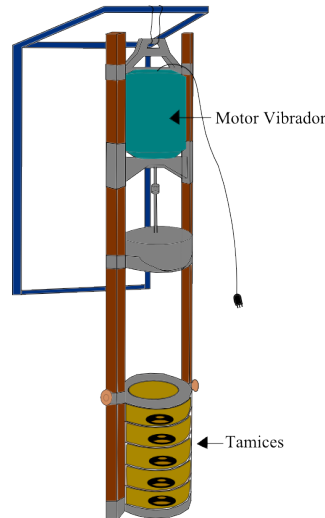


Figura 3.11. Sistema de tamizado.

Para la fracción gruesa del material (tamaños mayores a $1/2'$) se realiza el tamizado de manera manual, por medio de mallas de mayor tamaño. Luego, cada fracción es pesada en una romana, ya que ésta tiene mayor capacidad de pesado con respecto a la balanza digital.

3.2. Instrumentación

En la siguiente sección se describen la instrumentación empleada para registrar variables como mediciones de velocidad o interfaz de la arena-grava y el montaje necesario para desplegar esta.

3.2.1. Caja de adquisición y software SCI Beta 1.1

Se cuenta con una caja de adquisición (Figura 3.12) que permite unificar la información de diversos instrumentos con que cuenta la instalación experimental. Estos son: servo motores para descargar el sedimento fino, sensores capacitores que registran la altura de escurrimiento y sensores de presión pertenecientes a la placa orificio.

El registro y control de datos entregados por los sensores se realiza a través del software SCI Beta 1.1, el cual tiene una interfaz como la observada en la Figura 3.13. En el centro de la ventana se visualizan los controles de los servomotores, un cronómetro que simplifica realizar la calibración de gasto sólido de la tolva y el selector de frecuencia de muestreo para los sensores. Por otra parte, en el sector izquierdo de la imagen se gráfica en tiempo real la altura de escurrimiento para cada sensor capacitor. Finalmente, en el sector derecho se encuentran los registros en tiempo real de los valores de voltaje entregados por los sensores de

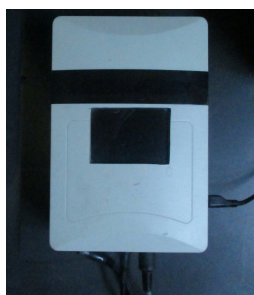


Figura 3.12. Caja de adquisición

presión, información que se traduce a valores de diferencia de presión gracias a la utilización de curvas de calibración.

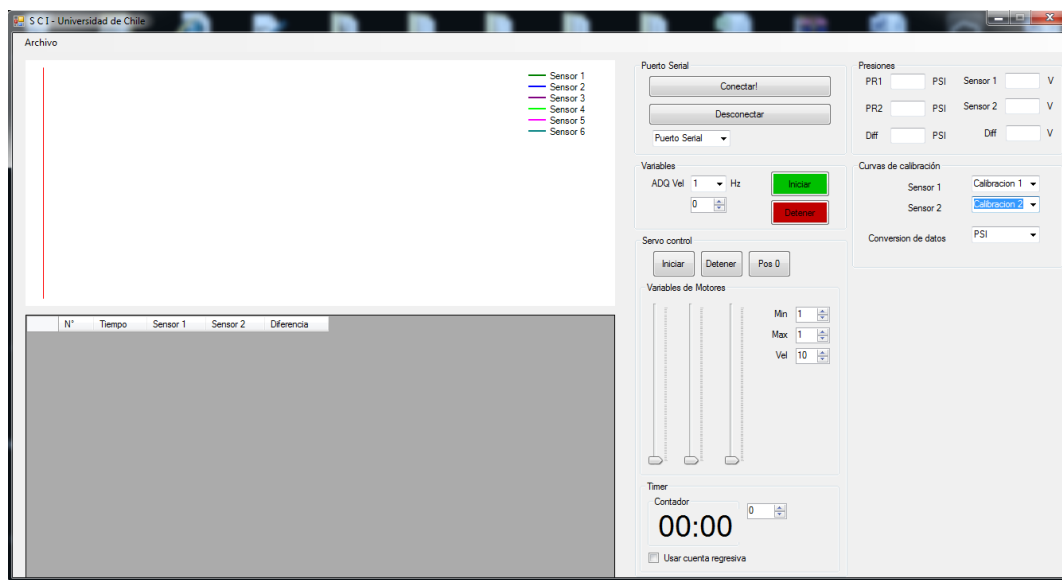


Figura 3.13. Ventana de operación software SCI Beta 1.1.

3.2.2. Pieza oscura

Dado que se utilizan cámaras para delimitar variables, como la interfaz arena-grava, es importante que la luz solar presente en el laboratorio no varíe. Para controlar este efecto se construye una pieza que impida el paso de la luz exterior. Esta se compone de una estructura de PVC de 40 mm de diámetro, conformada por uniones del tipo cupla, tee's y codos. Esta se recubre con una lona impermeable de color negro. La pieza oscura tiene unas dimensiones de 2.2 m de alto, 10.0 m de largo y 3 m de ancho, ofreciendo suficiente espacio para el desplazamiento del experimentador antes y durante la experiencia. Además permite una cómoda cabida a los instrumentos de medición a utilizar.

Por otro lado, se recubre la pared del canal mas lejana a las cámaras con un cartón piedra negro. Esto es realizado para evitar que la presencia de usuarios o reflexiones de luz en esta zona perjudiquen la calidad en el contraste deseado.

3.2.3. Sistema de cámaras

Para registrar la interfaz arena-grava, se dispone un sistema de cámaras. Tres a lo largo del canal, entre los 4 y 7 metros.

Las cámaras utilizadas corresponden al modelo GoPro Hero 3 White (Figura 3.14). Algunas de sus características son:

- Fotografías con resolución de 5 megapíxeles.
- Intervalómetro de 0.5, 1, 2, 5, 10, 30 y 60 segundos.
- Wi-Fi incorporado que permite el control remoto de una o más unidades en conjunto.



Figura 3.14. GoPro Hero3 White.

Cada una de éstas se posiciona sobre un soporte de acero, que se encuentra adosado al canal (Figura 3.15), permitiendo regular la distancia al canal desde 40 a 55 cm, posicionarlos a alturas desde 0 hasta 15 cm con respecto al fondo y orientarlos en 360°.

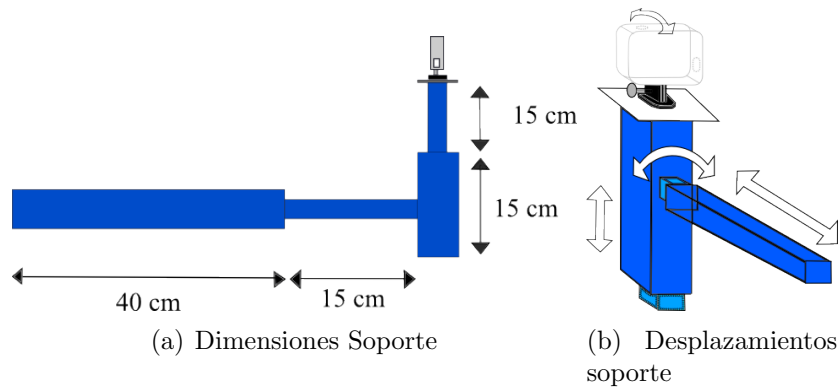


Figura 3.15. Soporte de camaras.

3.2.4. Velocímetro acústico Doppler (ADV)

Para registrar las velocidades del flujo se dispone de un Micro ADV Sontek de 16 MHz (Figura 3.16), el cual permite registrar la velocidad en los ejes de un sistema cartesiano, con una máxima tasa de adquisición de datos de 50 Hz, un rango de operación para velocidades entre 0,1 y 250 cm/seg y una exactitud del 1 %.

El instrumento opera bajo el principio del efecto doppler. El sensor actúa sobre un volumen de control de forma cilíndrica, cuyo volumen es aproximadamente 0.1 cm^3 , situado cercano

a los 5 cm bajo el transmisor. El volumen de control puede variar dependiendo del pulso transmitido.

Para operar el instrumento se dispone del programa *Horizon ADV*, cuyo desarrollador es el propio fabricante. El software permite la visualización en tiempo real y la captura de datos de variables tales como: velocidad, relación señal ruido (SNR) y correlación para los tres ejes.

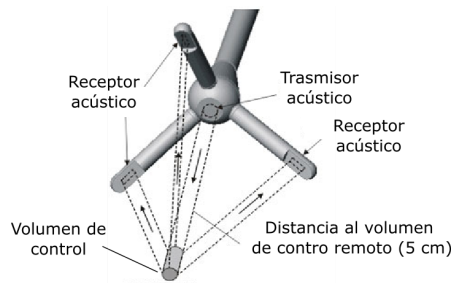


Figura 3.16. Esquema transmisor y receptor acústico del ADV.

El instrumento se monta sobre un carro (Figura 3.17), que permite su desplazamiento a lo largo del canal, así como también variar su posición en la vertical, permitiendo recorrer toda la altura del escurrimiento. Esta altura se ajusta a través de un tornillo sin fin en conjunto con una regla que se usa como indicador.

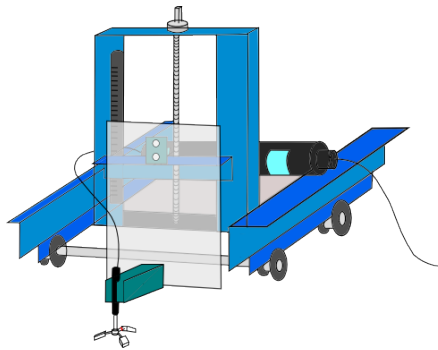


Figura 3.17. Carro ADV.

3.2.5. Técnica PIV

La velocimetría de partículas por imágenes (PIV) es un método óptico de la visualización del flujo, utilizado para obtener mediciones instantáneas de la velocidad en un fluido. Para desarrollar ésta, se alimenta el fluido con un trazador (pequeñas partículas de plástico teñidas con rodamina) que se asume siguen la dinámica del flujo, éstas partículas son iluminadas (plano láser) y fotografiadas (cámara de alta velocidad). Analizando las fotografías se determina la velocidad y dirección del flujo. A continuación se describen las características de cada uno de los componentes utilizados para la técnica.

Plano láser

Se cuenta con un láser compacto de la línea Flex, de marca BW TEK inc (Figura 3.18). Este se compone de dos partes: un cuerpo, cuya función es actuar como fuente de poder y una parte compacta, que cumple la función de entregar el haz de luz. Algunas de sus características son: ser un láser continuo, entregar una señal con bajo ruido y contar con una buena estabilidad energética.



Figura 3.18. Laser.

El plano láser se forma al posicionar sobre la linterna del láser un espejo colimador. Además, para utilizar el láser a lo largo y ancho del canal, se monta sobre un carro (Figura 3.19) que se desplaza a través un sistema de rieles.

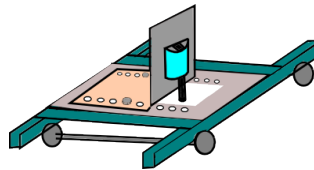


Figura 3.19. Carro láser.

Cámara de alta velocidad

Se cuenta con una cámara de alta velocidad modelo Fastcam SA3, marca Photron (Figura 3.20). Dentro de sus características destacan un sensor CMOS, con una resolución máxima de 1024x1024 pixeles, asociada a una tasa máxima de registro de 2000 cuadros por segundo. En tanto, cuando la resolución es de 128x16 pixeles, se puede grabar a 120000 cuadros por segundo. La cámara posee una memoria interna de 4 gb, además, es compatible con una gran variedad de lentes ya que cuenta con un adaptador muy versátil. En particular, se emplea un lente 50 mm F 1.8 dada la buena calidad lumínica de éste.

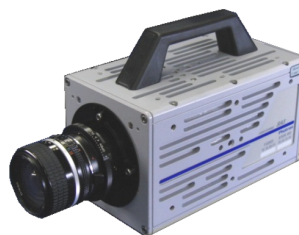


Figura 3.20. Cámara de alta velocidad Fastcam SA3

Partículas de rodamina

Se cuenta con partículas fluorescentes (Figura 3.21), de pequeños tamaños y con una densidad cercana a la del agua, igual a 1200 kg/m^3 . La utilización de éstas permiten caracterizar el flujo a través de la técnica PIV.

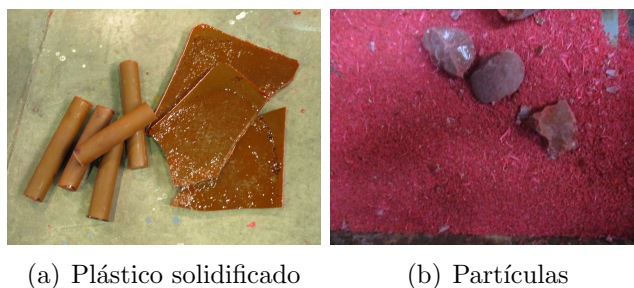


Figura 3.21. Partículas trazadoras.

Para generar las partículas se requieren los siguientes materiales: resina poliéster, rodamina tipo B, cobalto y peróxido. La metodología empleada es la utilizada por Pedocchi et al. (2008). A continuación se describe brevemente.

Se vierte sobre 1 litro de resina poliéster, 1 gramo de rodamina tipo B disuelta al 20 % en agua, la mezcla se revuelve hasta adquirir un color rojo ladrillo. Posteriormente, se agregan 40 gotas del acelerante octato de cobalto y se mezcla nuevamente, para luego agregar 400 gotas de peróxido, el cual cumple el rol de catalizador en la reacción.

Una vez constituida la mezcla líquida se vierte en un molde a elección, en particular se utilizan dos tipos de moldes; el primero, un cilindro de 4 cm de diámetro y 20 cm de largo, mientras que el segundo es un bloque prismático de 40 cm de largo, 30 cm de ancho y 1 cm de alto.

La solidificación de la mezcla está ligada directamente a la temperatura en que ésta se expone, pudiendo demorar desde una hora a un día completo. Para evitar esta incertidumbre, se emplea por unos minutos un calefactor, hasta que se oscurezcan algunas zonas de la mezcla. Este procedimiento tiene como objetivo acelerar la reacción y obtener la solidificación en un plazo máximo de 2 horas.

Para la generación de partículas se destruye el plástico empleando métodos como:

- Limar los cilindros con la ayuda de un torno perteneciente al laboratorio de Hidráulica.
- Emplear un molino de bolas durante unos 1000 giros, perdiéndose una fracción del plástico empleado producto de la pulverización de éste.
- Emplear un molino de muelas perteneciente al laboratorio de Minería, permitiendo controlar de mejor manera la granulometría, pero sumando inconvenientes asociados a la lentitud del proceso y difícil acceso al molino.

En la Figura 3.22 se aprecian las distintas distribuciones granulométricas para las partículas generadas.

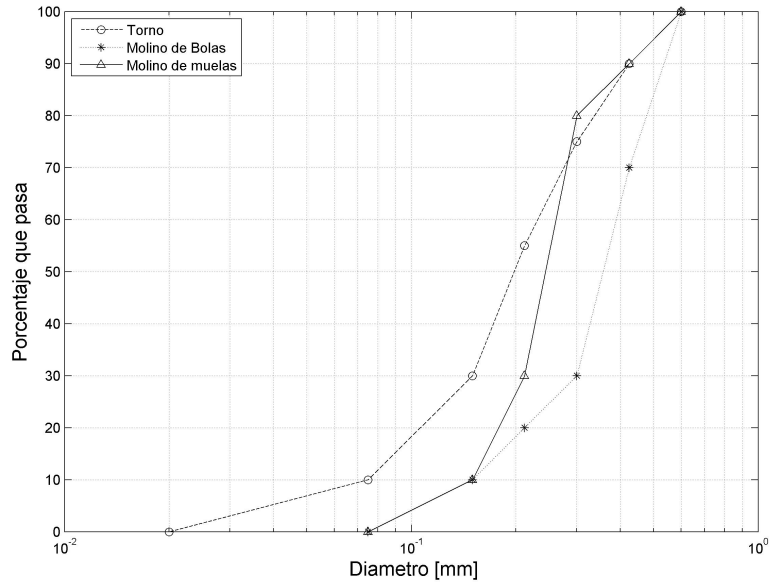


Figura 3.22. Curvas granulométricas para las partículas trazadoras

3.3. Metodología experimental

3.3.1. Preparación de la experiencia

Para que las experiencias se ejecuten de una manera adecuada se desarrollan una serie de preparativos necesarios, estos son los siguientes:

1. **Fijar Pendiente** Previo a cada set de experimentos se fija la pendiente del canal i. Esta es cuantificada a partir de las distancias longitudinales entre los soportes del canal y el desnivel vertical de estos. Las primeras distancias son medidas con una huincha, mientras que las segundas se miden con un nivel topográfico en conjunto de una regleta. En caso de necesitar modificar la pendiente se ajusta la altura de los soportes metálicos con la ayuda de una llave francesa.
2. **Construcción lecho** Se posicionan las gravas redondeadas en el canal, formando un lecho con un espesor de 7 centímetros, aproximadamente. Este se compone de 2 capas y media de rocas, las que se acomodan de forma tal que el lecho tenga la superficie lo mas regular posible.
3. **Preparar material de entrada** Se prepara la arena para cada experiencia. Esto significa acumular un total de unos ≈ 200 Kilogramos de material en estado seco. Posterior a esto se carga la tolva. Finalmente según la tasa de gasto solido de entrada deseada en la experiencia, se calibran los parámetros en el *software SCI*, donde se utiliza como guía la curva de la Figura 3.5.
4. **Instalar cámaras** Se disponen las cámaras GoPro Hero 3 White sobre sus soportes, ubicados entre los 4 y 7 metros, procurando que éstas queden niveladas en todas sus direcciones y que la cara en la que se encuentra el lente quede posicionada de forma paralela al canal. Una vez niveladas, se conectan a la corriente a través de los adaptadores

de casa USB Belkin (2,1A 10W).

5. **Fotografías Previas** Por medio de un control remoto las cámaras se sincronizan al intervalo deseado usando como sistema de conexión el Wi-Fi incorporado en éstas. Antes del inicio del experimento, se colocan hojas blancas en la pared mas alejada del canal, con tal de generar un contraste que permita delimitar el limite superior del lecho, H_{grava} . Una vez realizado esto se fotografía el canal y se sacan las hojas para dar inicio al experimento.
6. **Fijar caudal** Para fijar el caudal deseado se utiliza la curva de la calibración de la placa orificio presente en la Figura 3.8. Con ésta se calcula el ΔP necesario para obtener el caudal deseado. Se procede a encender la bomba y a través de la válvula se ajusta el caudal hasta alcanzar el ΔP determinado.
7. **Controlar escurrimiento** Se regula la altura de la clapeta tal que $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$, con tal de generar altura normal.

Posterior a preparar todo, se procede a comenzar la experiencia activando la tolva y las cámaras al mismo instante.

3.3.2. Toma de muestras de arrastre de solido de fondo

Las tomas de muestras se comienzan a realizar una vez que el sedimento llega al final del canal. Estas se realizan a intervalos regulares, los cuales son determinados por la cantidad de material transportado, siendo para mayores tasas de transporte menor el intervalo empleado. Con esto se evita que la fosa se llene en demasía y comience a perder la capacidad para atrapar material.

Para realizar cada muestreo, es necesario levantar el tapón que comunica a la fosa con la trampa de sedimento. Es importante que al levantar el tapón sea por un tiempo breve, ya que de no producirse esto, podría traer como consecuencia que la trampa que recibe el material se llene de agua evitando la optima recolección del material.

Cada muestra recolectada se vierte sobre una batea plástica, para su posterior secado, pesado y tamizado.

3.3.3. Análisis de fotografías

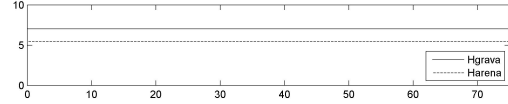
Concluido el experimento, las fotos se post-procesan con el softwatre *Lightroom 5*, a través de la herramienta 'corrección del lente'. Esta herramienta permite eliminar las distorsiones ópticas generadas por el lente gran angular que poseen estas cámaras.

Con las fotos corregidas se procede a analizar las fotos previas al experimento, donde se determina la altura máxima de la grava, H_{grava} , y con las fotos asociadas al periodo de equilibrio del experimento, se determina la altura media de la arena, H_{arena} . En la Figura 3.23 se puede apreciar la delimitación de estos contornos.

Para realizar el análisis de las imágenes se emplea el toolbox de imágenes presente en



(a) Imagen Original



(b) Contornos medios

Figura 3.23. Delimitación de contornos.

MATLAB. En este se importan las imágenes compuestas de 3 matrices, donde cada una representa un color primario. Se analiza cada una de las matrices, buscando la que permita obtener la mejor delimitación de la interfaz arena-grava, para solo trabajar con esta. Sobre la matriz seleccionada se utiliza un filtro con tal de obtener la interfaz definitiva. Esta imagen filtrada se binariza y se recorre cada columna de la matriz, donde se identifica el umbral del cambio de fase para cada columna, aceptando como válido solo si este cambio es sostenido por una cantidad de pixeles determinada (esto se realiza para no considerar como un límite los pequeños depósitos aislados de arena que se conforman).

Para escalar las fotografías a dimensiones reales se utiliza la "distance tool" del software, sobre las zonas en que se encuentran las cintas de medir colocadas en el canal. De esta manera se asocian distancias reales a cantidades de pixeles. Este proceso se realiza en reiteradas oportunidades y sobre diversas distancias, con tal de disminuir el error humano de posicionar la herramienta manualmente. La cantidad promedio de pixeles por mm es, por lo bajo de 2, por lo que las mediciones obtenidas por la cámara tienen una precisión de 0.25 mm.

3.3.4. Medición de velocidades con ADV

Una vez que el experimento ha alcanzado condiciones de equilibrio, se registran mediciones de los perfiles de velocidad. Estas se realizan a lo largo de la zona central del canal, espaciadas cada 50 cm aproximadamente, abarcando la zona donde se fotografió lateralmente. O sea entre los 4 y 7 metros.

Se busca que la cantidad de puntos en la vertical que componen cada perfil de velocidad sea la mayor posible, sin embargo esta cantidad se encuentra limitada por las condiciones experimentales, como por ejemplo que la intrusión del ADV no altere las mediciones. Por lo general en los registros se abarca una zona en la vertical $y/H < 0,3$, con una cantidad de 8 puntos, aproximadamente, mientras que la cantidad de perfiles realizados en la longitudinal, para cada experiencia, corresponde a 4. A través de esto, se busca anular los efectos particulares de una zona espacial.

Las mediciones para cada uno de los puntos se desarrollan durante un tiempo determinado de la siguiente manera. La velocidad media es graficada en función del tiempo para cada una de las componentes del flujo. El tiempo que se demora en estabilizarse la ultima componente es el tiempo mínimo para el cual se deben realizar las mediciones. En el caso de este estudio, como también se busca caracterizar ciertas mediciones de la turbulencia, se utilizara el doble

de tiempo. En la Figura 3.24 se puede apreciar como para experiencias preliminares el tiempo de convergencia es alrededor de los 90 segundos. Considerando que la tasa de muestreo es de 50 Hz y el intervalo de tiempo empleado es como mínimo 3 minutos, se puede concluir que se cuenta con una cantidad de 9000 datos por punto.

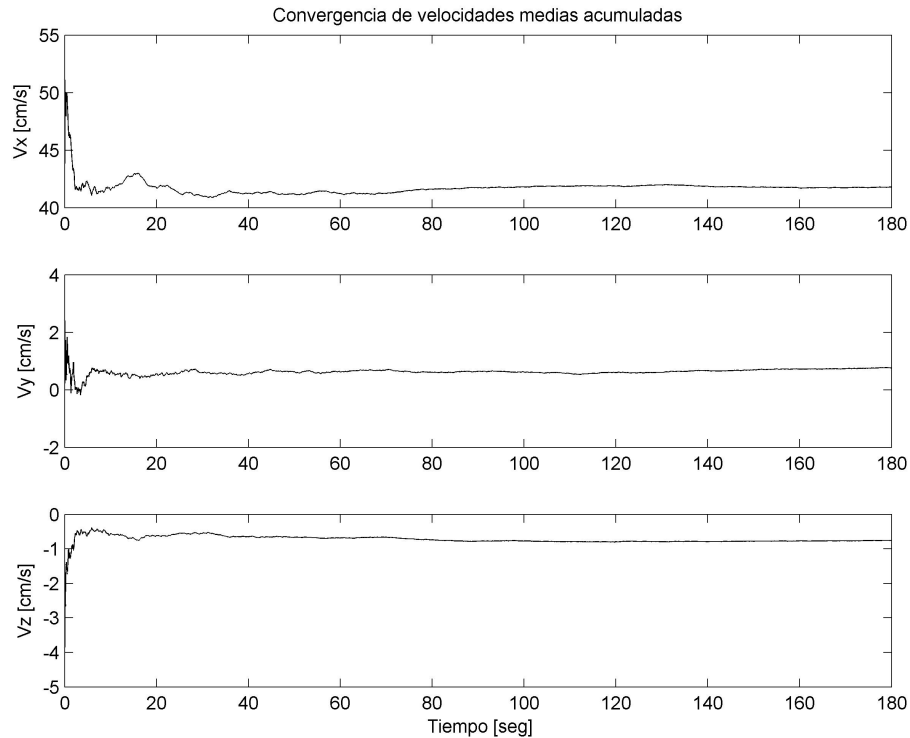


Figura 3.24. Caracterización de tiempos de convergencia.

La interacción entre el instrumento y el ordenador se realiza a través del programa *Horizon ADV*. Este programa permite visualizar velocidad, SNR y correlación para todos los ejes. Antes de utilizar el instrumento se deben seleccionar datos de entrada, como la temperatura, salinidad y rango de velocidades presentes en el flujo. Este último puede variar entre ± 3 y 250 cm/s. En este estudio se utilizó el valor de ± 100 cm/s.

Es importante al momento de realizar las mediciones, que ciertos parámetros que muestran la calidad de las mediciones, como la correlación o SNR, se encuentren sobre ciertos rangos, tal de asegurar correctas mediciones. El fabricante Sontek (1996) propone que el parámetro SNR debe presentar valores mayores a 20 con tal de que las mediciones no se vean considerablemente afectadas por el ruido, como se puede apreciar en la Figura 3.25. Sobre las correlaciones se recomienda que estos valores excedan el 70 % para que las mediciones permitan el estudio de fenómenos turbulentos, aunque Sontek (1996) también comenta que en flujos extremadamente turbulentos, puede que sea difícil alcanzar esta calidad de los estadísticos. Cada punto de los perfiles de velocidad fue desarrollado respetando los criterios previamente mencionados.

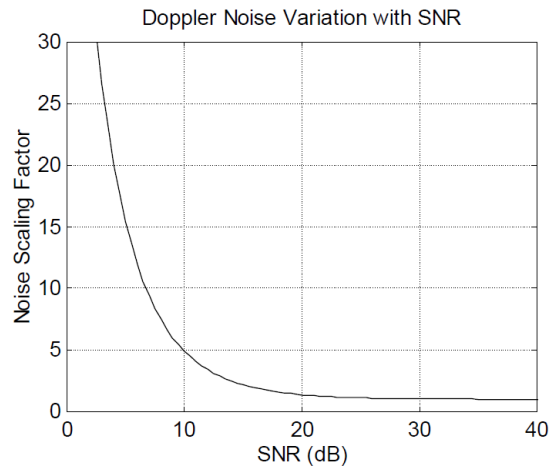


Figura 3.25. Ruido vs SNR (Sontek, 1996).

Finalmente una vez obtenida la serie de datos, ésta se postprocesa con tal de eliminar los picos generados por fenómenos como el aliasing. El método para realizar esto es el propuesto por Goring and Nikora (2002) y se puede apreciar su efectividad en la Figura 3.26.

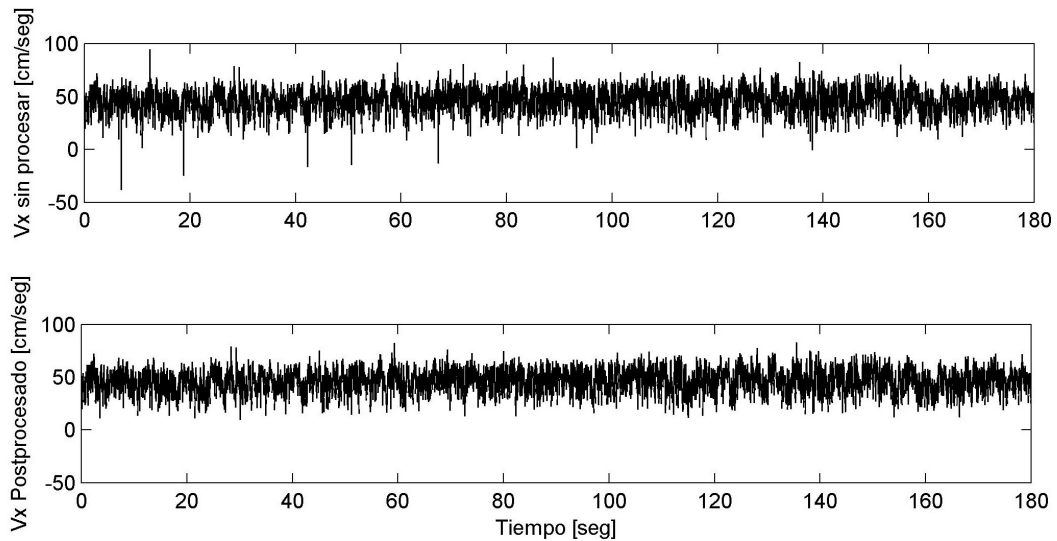


Figura 3.26. Efectividad del metodo de despique.

3.3.5. Medición de velocidades con técnica PIV

Cuando las condiciones para la medición no son óptimas para el uso del ADV, se opta por emplear la técnica de PIV. Esta se ejecuta de la siguiente manera.

Se coloca el láser sobre el carro de la Figura 3.19, posteriormente se conecta éste al compu-

tador para, a través del programa *flex control interface* fijar la máxima potencia de operación. Una vez que éste se enciende se produce el plano láser, el cual debe ser acomodado en el centro del canal. Si el plano presentara una distribución poco regular de la luz, se debe acomodar el colimador hasta disminuir al máximo este efecto.

Se conecta la cámara de alta velocidad al computador y se posiciona a unos 50 cm del canal, capturando la zona donde se genera el plano láser. Posteriormente, se enfoca el lente de 50 mm en la zona de interés. Además se fija la apertura máxima del lente (f/1.8 en este caso) con tal de obtener la mejor iluminación posible. Es importante que en la zona donde se filmará se debe posicionar una regla que permita escalar los pixeles de la imagen a centímetros.

Previo a introducir las partículas trazadoras necesarias para realizar la técnica, se genera una mezcla de unos 50 gramos de partículas de plástico con rodamina por litro y medio de agua. Esto tiene por objetivo evitar que las partículas se queden flotando en la superficie. Para generar una distribución de partículas homogénea en la vertical, las partículas empleadas deben poseer una distribución granulométrica similar a la de la Figura 3.27.

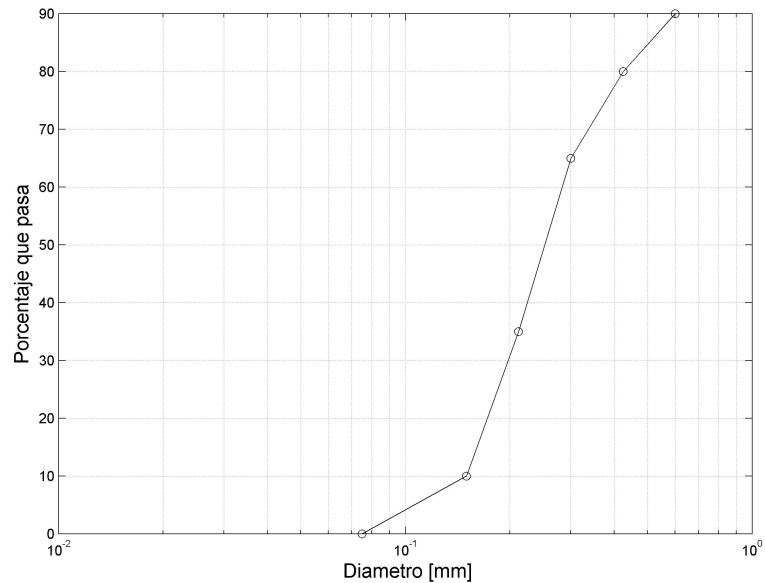


Figura 3.27. Curva granulométrica de la rodamina para PIV.

Una vez depositadas las partículas se procede a grabar, capturándose una cantidad de 10 vídeos como mínimo. La razón de la cantidad de vídeos realizados es por que la cámara solo puede grabar 10 segundos de forma continua, a 500 FPS (fotogramas por segundo). Esto implica que la cantidad mínima de vídeos que se debe realizar con tal de alcanzar el tiempo de convergencia en las velocidades medias es de 10. El valor del tiempo de convergencia utilizado se asume similar al determinado en la toma de datos del ADV, presentado en la Figura 3.24.

Una vez obtenidos los vídeos se procesan en el programa *Digiflow*, con tal de obtener las mediciones de velocidad en el flujo.

En la Figura 3.28 se aprecia un esquema con la disposición de los elementos necesarios para realizar la técnica PIV.

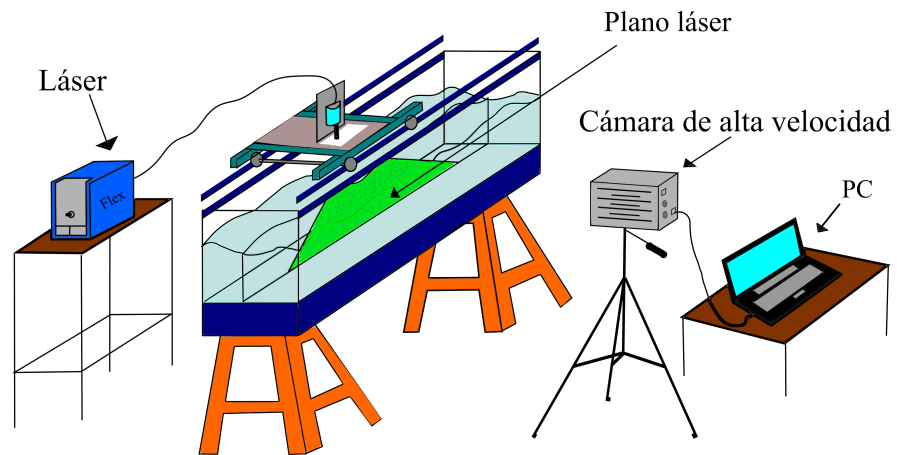


Figura 3.28. Esquema del montaje para PIV.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Experimentos

Se realiza un total de 10 experimentos. Estos se pueden agrupar en cinco pares, donde para cada uno de estos se utiliza la misma descarga Q y solo se varia la tasa de inserción de sedimento Q_{sIN} . Del total de experimentos, los 6 primeros se realizaron con una pendiente i del 0,5% y los restantes con un valor de 0,25%. Esto tiene por objetivo obtener menores valores del esfuerzo de corte medio, además de incrementar la altura de escurrimiento y volver posible las mediciones de la velocidad en el flujo.

En la Tabla 4.1 se presenta un resumen de las experiencias desarrolladas, donde la mayoría de parámetros adimensionales presentados se describieron en el capítulo 2, salvo los parámetros τ^*_{VB} y e/Dg . El primero corresponde a τ^* descontando el efecto de las paredes, a través del método de Vanoni and Brooks (1957) y el segundo viene motivado por representar la exposición que presenta la arena con respecto la grava, donde $e = H_{Arena} - H_{Grava}$ y $Dg = D_{50Grava}$, la motivación de adimensionalizar la exposición de la arena por $D_{50Grava}$ viene dada a que éste es una escala importante del flujo intersticial (Nikora et al., 2001).

Tabla 4.1. Resumen de experimentos realizados.

Exp	i [%]	Q [lt/s]	Q_{sIN} [g/s]	Q_{sOUT} [g/s]	Fr	Re	e/Dg	τ^*	τ^*_{VB}
1	0,5	16,2	230	212	0,62	124067	-0,25	0,428	0,670
2	0,5	16,2	135	123	0,61	123549	-0,35	0,430	0,677
3	0,5	14,2	215	198	0,62	113307	-0,11	0,403	0,608
4	0,5	14,2	134	118	0,61	112726	-0,16	0,406	0,617
5	0,5	12,4	225	209	0,69	106217	0,06	0,359	0,500
6	0,5	12,4	109	100	0,63	103237	-0,09	0,377	0,554
7	0,25	14,2	112	105	0,65	114905	0,07	0,197	0,268
8	0,25	14,2	207	202	0,68	116446	0,21	0,193	0,257
9	0,25	10,2	225	215	0,60	88545	0,38	0,175	0,230
10	0,25	10,2	113	103	0,57	87235	0,27	0,180	0,242

El valor del gasto solido de salida Q_{sOUT} corresponde al valor del promedio de las ultimas mediciones obtenidas en la trampa de sedimentos. Este promedio corresponde a los últimos valores, ya que para estos se asume una estabilización de la variable medida. Con el propósito de describir mejor esto, en la Figura 4.1 se presenta el Q_{sOUT} en función del tiempo para la experiencia número 3, se puede apreciar la similitud de este valor con Q_{sIN} , donde estos difieren probablemente solo por la dispersión que presenta el registro de estas variables.

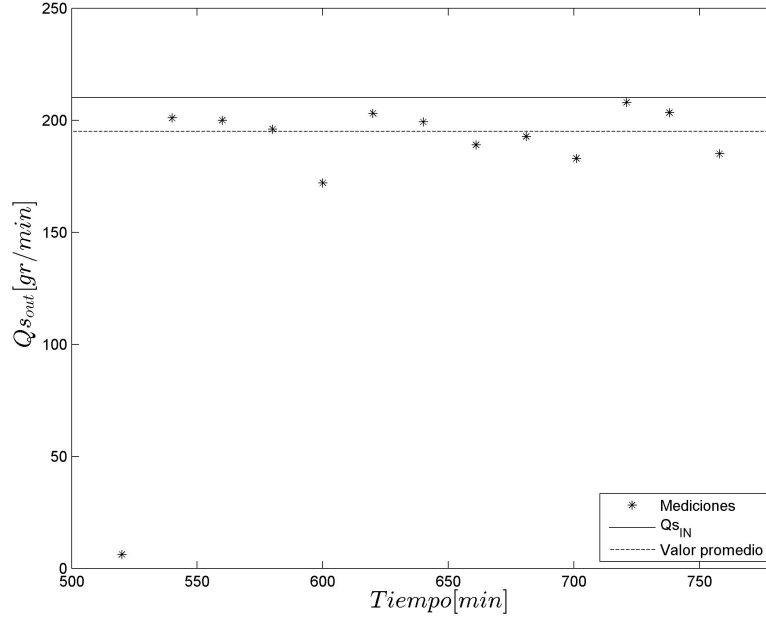


Figura 4.1. Gasto solido de salida en el tiempo para el experimento 3.

En la Tabla 4.2 se presentan los valores Q_{sOUT} medidos en cada uno de los experimentos. Además se adiciona el valor de la desviación estándar, $\sigma_{Q_{sOUT}}$, de estas cantidades y la representación adimensional por unidad de ancho, q^* , de estos valores.

Tabla 4.2. Especificación del gasto solido.

Exp	Q_{sIN} [g/s]	q^*_{IN}	Q_{sOUT} [g/s]	q^*_{OUT}	$\sigma_{Q_{sOUT}}$ [g/s]	$\sigma_{q^*_{OUT}}$
1	230	0,126	212	0,116	16	0,009
2	135	0,074	123	0,067	9	0,005
3	215	0,117	198	0,108	14	0,008
4	134	0,073	118	0,064	6	0,003
5	225	0,123	209	0,114	9	0,005
6	109	0,059	100	0,055	7	0,004
7	112	0,061	105	0,057	18	0,010
8	207	0,113	202	0,110	10	0,005
9	225	0,123	215	0,117	19	0,010
10	113	0,062	105	0,057	12	0,007

Para realizar una posterior propagación de errores, en la Tabla 4.3 se cuantifican los errores de medición sobre las diversas variables involucradas.

Tabla 4.3. Errores experimentales.

Parámetro	Notación	Valor del error	Unidad	Medición
Error Ancho canal	σ_{ac}	0,50	mm	Directa
Error Altura de flujo	σ_H	0,50	mm	Directa
Error medición cámara	σ_{cpx}	0,50	px	Directa
Error medición cámara	σ_{cmm}	0,25	mm	Indirecta
Error altura arena	σ_{arena}	0,02	mm	Indirecta
Error altura grava	σ_{grava}	0,02	mm	Indirecta
Error e	σ_e	0,03	mm	Indirecta

4.2. Registros de parámetros asociados a la velocidad

Para caracterizar la velocidad en el flujo se utilizó el sensor ADV. Con este al final de cada experimento se midió una cantidad de 4 perfiles de velocidad que abarcan el rango $0 < y/H < \approx 0,3$ estos perfiles se realizaron en el centro del canal espaciados cada 50 cm entre los 3 y 5 metros, en la longitudinal.

En la siguiente sección se presentan los parámetros que se desprenden de los datos de velocidad registrados, como son: perfiles de velocidad, esfuerzos de reynolds, intensidad de turbulencia, entre otros. Es importante recordar que estos parámetros provienen del promedio de los perfiles de velocidad para cada experiencia y donde cada uno de los puntos de cada perfil corresponde al promedio temporal de la medición.

En las figuras que se presentaran a continuación, la simbología viene asociada a los valores de la Tabla 4.1, pero para simplificar la lectura de los datos estos se presentan en el orden en que se desarrollaron las experiencias.

4.2.1. Perfil de velocidad

En la Figura 4.2 se presentan los perfiles de velocidad media en la longitudinal en función de la distancia al fondo y/h .

Se puede apreciar que las mediciones son poco sensibles a la exposición de la arena, e/Dg , y que incluso entre los perfiles de velocidad para distintas descargas no presentan mucha diferencia. Esto se puede atribuir a que las variaciones de descarga entre la mayor y menor utilizada no son lo suficientemente significativas (variaciones no exceden el 25 %) o simplemente las variaciones entre perfiles se perciben de mejor manera para valores superiores de y/h . Estas observaciones son coincidentes con las realizadas por Wren et al. (2011).

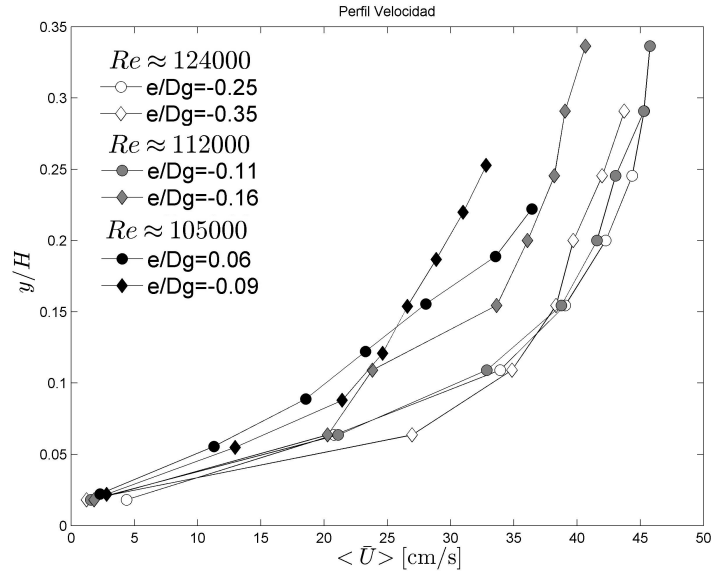


Figura 4.2. Perfil de velocidades medias $\langle \bar{U} \rangle$, en función de e/Dg .

4.2.2. Perfiles esfuerzo de Reynolds

En la Figura 4.3 se presentan los perfiles del esfuerzo promediado de Reynolds adimensionalizado τ_{Re}^* , el cual viene dado por $\frac{-\rho \langle u'w' \rangle}{\rho g R D_{50 \text{arena}}}$, este se expresa en función de la distancia del fondo y/H .

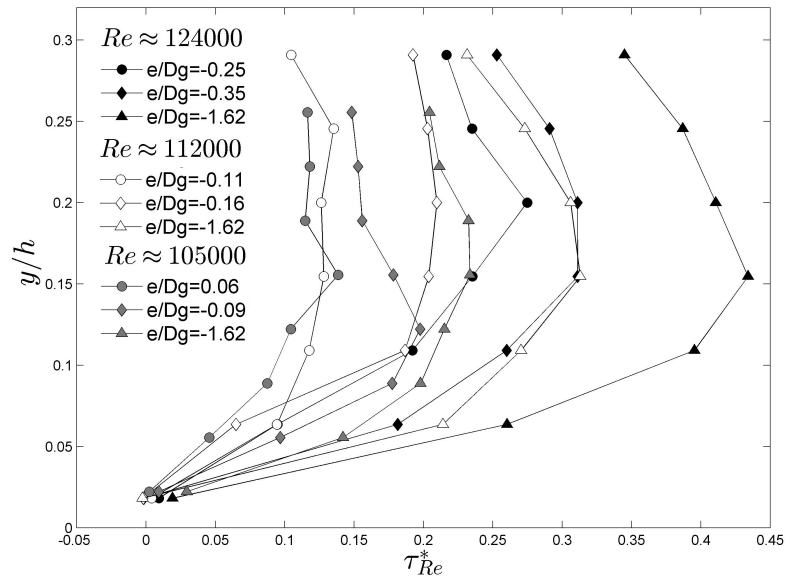


Figura 4.3. Esfuerzos de Reynolds promediados, para distintos valores de e/Dg y Re .

Se puede determinar de la figura que a una mayor exposición de la arena los esfuerzos turbulentos se ven reducidos. De los nueve perfiles presentados solo seis corresponden a mediciones asociadas a experiencias realizadas, las mediciones extras ($e/Dg = 1,62$) corresponden a me-

diciones previas a las experiencias (antes de introducir arena) y se adicionan con el objetivo de lograr la visualización del efecto de la exposición de la arena sobre la magnitud del esfuerzo de Reynolds.

4.2.3. Intensidad de turbulencia

En la Figura 4.4 se presentan la intensidad de la turbulencia en función de la distancia del fondo y/h , para todas las componentes del flujo. La intensidad de la turbulencia se entiende como la razón entre la desviación estándar de la fluctuación de la velocidad, sea esta u' , v' o w' , y la velocidad de corte u^* . Esta última se puede estimar de diversas maneras pero en función de ser consistente entre las cantidades involucradas, se estima a través de las mediciones del valor $\sqrt{u'w'}_{z \rightarrow 0}$ registrado por el ADV. Estos valores son graficados en conjunto de las relaciones semiteóricas propuestas por Nezu and Nakagawa (1993).

Cada experimento se identifica a través su rugosidad relativa ks/h , observándose una convergencia a las curvas semiteóricas para los valores de $y/h > 0,15$.

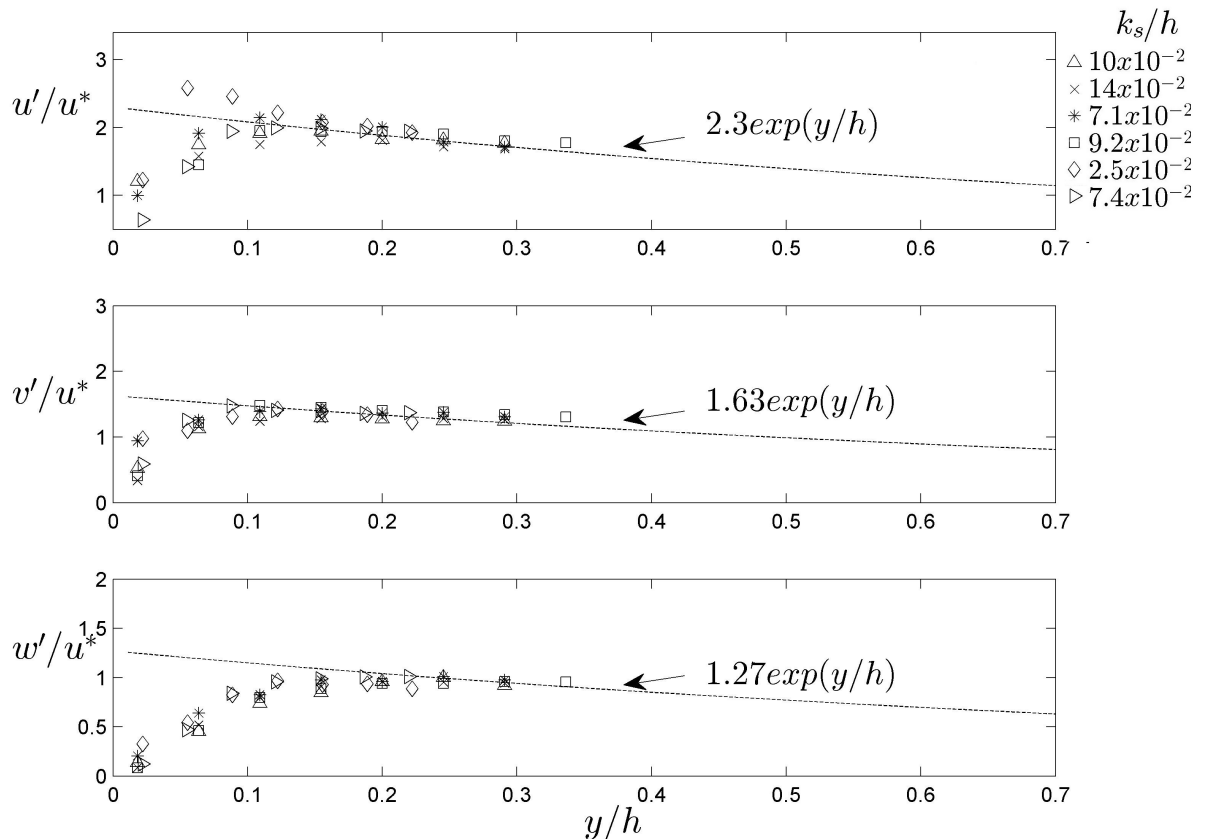


Figura 4.4. Intensidad de la turbulencia en función de y/h y la rugosidad ks/h .

4.2.4. Calidad medición de la turbulencias con ADV

Si bien los errores asociados a las velocidades medias registradas por un instrumento como el ADV son del 1 % (Sontek, 1996), el fabricante no hace alusión a la calidad de las mediciones de la turbulencia. Esto es por que estas mediciones no son estrictamente dependientes del sensor, sino también de las condiciones de flujo.

En función de caracterizar de buena manera las mediciones de turbulencia se utiliza una frecuencia adimensionalizada, F , la cual refleja la razón entre la frecuencia de muestreo del sensor y la frecuencia del remolino de mayor escala presente en el flujo. La frecuencia adimensionalizada propuesta se describe a través de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{f_r}{f_T} = \frac{f_r L}{Uc} \quad (4.1)$$

- F : Frecuencia adimensionalizada.
- f_r : frecuencia de muestreo del sensor.
- f_T : frecuencia asociada al remolino de mayor escala presente en el flujo.
- L : Escala de longitud asociada al remolino de mayor escala presente en el flujo.
- Uc : Velocidad convectiva (Heskestad, 1965).

De esta definición se desprende que a mayores valores de F , mejores son las descripciones de la turbulencia que pueden ser alcanzadas por el instrumento. Además, se deduce que, en teoría ninguna escala de la turbulencia puede ser descrita por el instrumento para valores de $F < 1$.

García et al. (2005) propone que $F > 20$ permite obtener una buena resolución del espectro relacionado a la medición, mientras que otros autores como Nezu and Nakagawa (1993) determinaron empíricamente que valores de $F > 16$ permiten lograr mediciones satisfactorias. Es importante mencionar que este último criterio es acotado solo para mediciones en canales abiertos, donde L es la altura de escurrimiento y Uc es representado por la velocidad media longitudinal.

Para realizar la estimación de este parámetro en nuestras mediciones, se utiliza un valor de 50 Hz como frecuencia de muestreo, L viene dado por la altura de escurrimiento y Uc es la velocidad media en la longitudinal.

Tabla 4.4. Valores de frecuencia adimensionalizada.

Experimento	f_r [Hz]	Uc [cm/s]	L [cm]	F
1	50	49,0	11,0	11,2
2	50	48,6	11,1	11,4
3	50	47,5	10,0	10,5
4	50	47,4	10,1	10,5
5	50	50,1	8,3	8,2
6	50	46,3	8,9	9,6

En la Tabla 4.4 se presenta la calidad de las mediciones para cada uno de los experimentos realizados. Donde si bien se aprecia que las mediciones están bajo el parámetro sugerido, éste se mantiene en el orden del valor propuesto (las variaciones significativas son al variar ordenes de magnitud).

4.2.5. Espectros de las fluctuaciones de velocidad

Los parámetros como el esfuerzo de Reynolds o la intensidad de la turbulencia son obtenidos a partir de las series de velocidad medidas con el ADV. Estas mediciones están asociadas a una cantidad de ruido que es inherente al instrumento de medición empleado, como también a las condiciones experimentales bajo las cuales opera. La identificación de este ruido motiva la elaboración de los espectros de las fluctuaciones de la velocidad. Estos reflejan la distribución de las distintas escalas o frecuencias de energía presentes en el flujo, pero también permite identificar la zona donde el ruido instrumental predomina a través del aplanamiento del espectro.

Para conformar los espectros se empleo el método de Welch (1967). Cada espectro se compone del promedio de unos 6 espectros los cuales están conformados por una cantidad aproximada de 1500 puntos. Estos se obtienen al dividir la serie de velocidad. El objetivo de realizar el promediado es disminuir la varianza del espectro calculado y así suavizar el efecto del ruido. Esto es importante, ya que el ruido presente en las mediciones puede producir una sobre estimación de la energía del sistema.

Los espectros son presentados con el fin de visualizar el rango de frecuencia en que las mediciones del instrumento no son afectadas por el ruido instrumental. Además de como la distancia en la vertical influye en la presencia del ruido.

En las Figuras 4.5 y 4.6 se muestran los espectros de todas las componentes del flujo, para cada uno de los puntos que conforman uno de los 4 perfiles desarrollados para la experiencia N^o4. En cada una de las figuras se incluye la línea $-5/3$, que representa el subrango inercial propuesto por Kolmogorov. El resto de los espectros se muestran en el Anexo E.

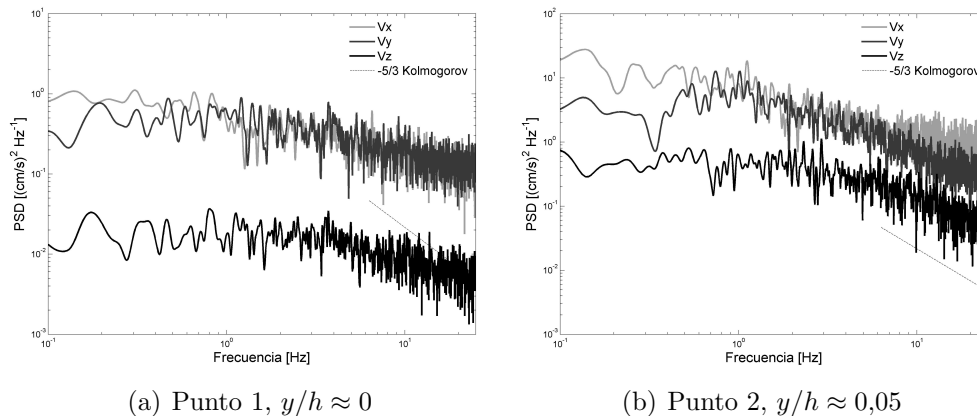


Figura 4.5. Espectros del primer perfil del experimento 4, puntos 1 y 2.

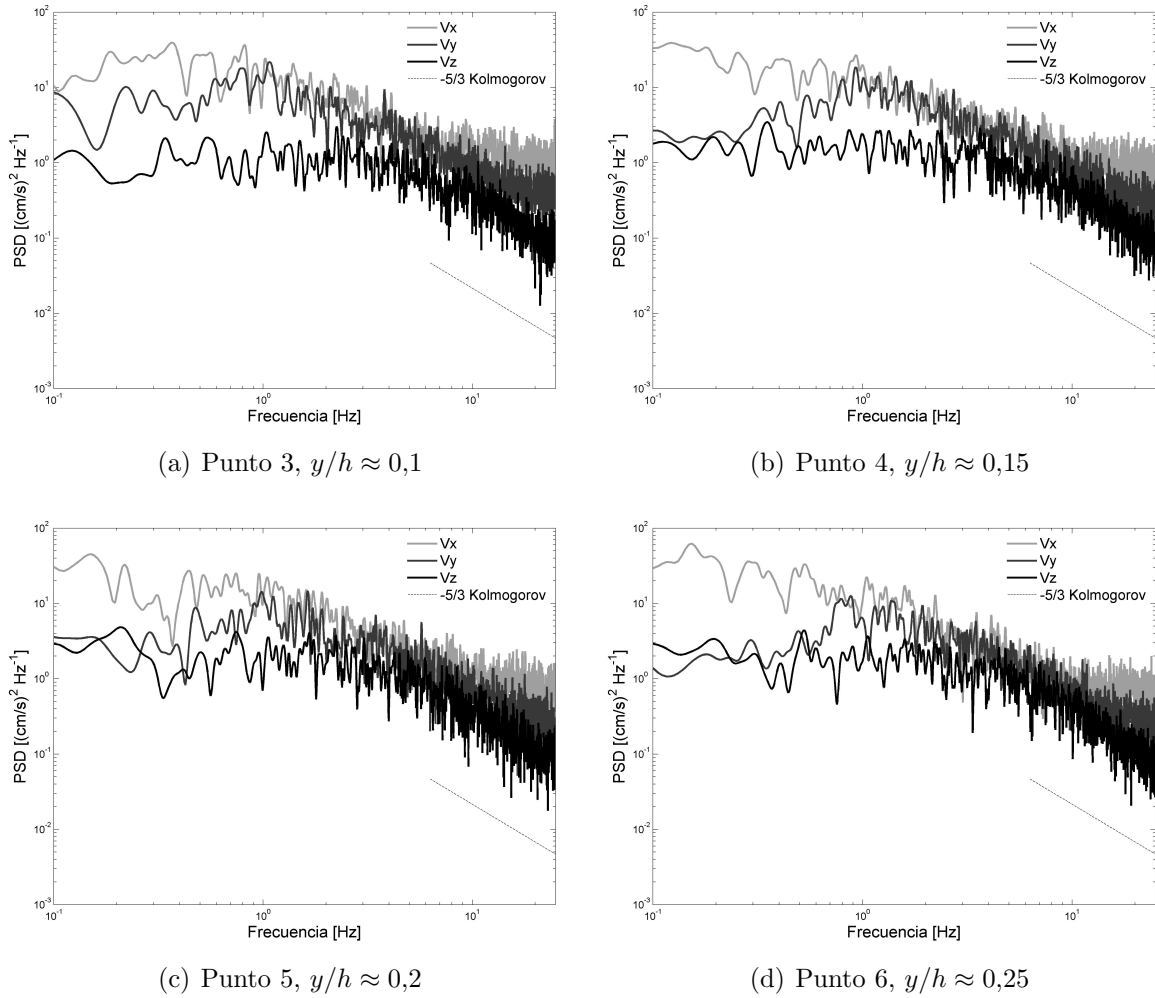


Figura 4.6. Espectros del primer perfil del experimento 4, puntos entre 3 y 6.

En los dos primeros puntos se puede apreciar una gran presencia de ruido instrumental, indicando que las mediciones de estos puntos no debería ser empleada para desarrollar un análisis más profundo, esta observación no se presenta para los puntos superiores, de hecho la calidad de las mediciones mejora progresivamente, por lo que este fenómeno se atribuye a medir cerca del fondo, y en particular sobre superficies duras. Además, se puede apreciar que para frecuencias superiores a 10 Hz, el espectro se aplanara para la componente longitudinal y transversal del flujo, indicando que a partir de esta frecuencia la energía presentada corresponde al ruido instrumental, el motivo de éste puede asociarse a que el volumen de control del instrumento no permite resolver vórtices asociadas a frecuencias mayores, la predominancia del ruido en las componentes mencionadas se asocia a la geometría de la construcción del instrumento.

4.3. Caracterización esfuerzo de corte

El esfuerzo de corte es un parámetro crítico para estimar el transporte de sedimento. Es por esto que en la siguiente sección éste se estimará a partir de las mediciones de velocidad en el flujo. Estas estimaciones se contrastaran con la manera más tradicional de calcularlo, que corresponde al esfuerzo de corte medio para flujo uniforme el que viene representado por $\tau_{medio} = \rho g R h S$.

4.3.1. Esfuerzo de corte obtenido de mediciones del ADV

El esfuerzo de corte se puede representar por la suma de $\tau_{viscoso}$ y τ_{Re} , como se aprecia en la siguiente expresión:

$$\tau = \tau_{viscoso} + \tau_{Re} = \mu \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial x} - \rho \langle \overline{u'w'} \rangle \quad (4.2)$$

Dado que los puntos cercanos al fondo no presentan la mejor calidad de medición (ver sección 5.3) se utilizan para estimar el esfuerzo de corte un promedio de las mediciones correspondientes a los puntos 3 y 4 con respecto al fondo. Esto puede implicar cierto sesgo, ya que no representa el esfuerzo en el fondo exactamente. Aun así estos valores se incluyen en la Tabla 4.5, donde se presenta el valor del esfuerzo total y el porcentaje de cada uno de los esfuerzo que componen éste.

De la tabla se puede apreciar que el gran porcentaje del esfuerzo total corresponde al esfuerzo de Reynolds. Dado esto y asumiendo que el esfuerzo total varía linealmente desde $\tau(y/H = 1) = 0$ a $\tau(y/H = 0) = \tau_{max}$, realizamos para los perfiles de la Figura 4.3 una interpolación lineal que pasa por cero para $y/H = 1$ y pase tangencialmente por los valores medidos. Así se obtiene el valor del esfuerzo de corte en el fondo. Un esquema del procedimiento se puede apreciar en la Figura 4.7.

En la Tabla 4.5 se presentan los esfuerzos calculados directamente de la expresión 4.1, indicando la proporción asociada al $\tau_{viscoso}$ y τ_{Re} . Además, se incluye el valor del esfuerzo extrapolado $\tau_{Reextrapolado}$.

Tabla 4.5. Estimación de esfuerzo de corte a partir de los esfuerzos de Reynolds.

Experimento	$\tau_{viscoso}$ [%]	τ_{Re} [%]	$\tau_{Re+viscoso}^*$	$\tau_{Reextrapolado}^*$
1	1,1	98,9	0,1761	0,324
2	0,5	99,5	0,2522	0,380
3	1,6	98,4	0,1154	0,179
4	0,9	99,1	0,1533	0,267
5	3,1	96,9	0,0818	0,164
6	1,9	98,1	0,14	0,228

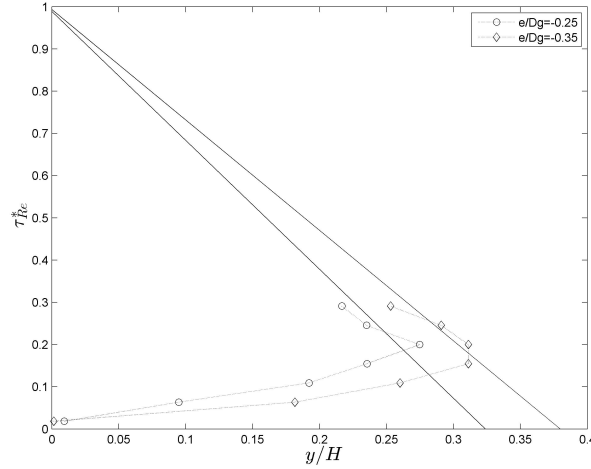


Figura 4.7. Extrapolacion τ .

4.3.2. Esfuerzo de corte extrapolado del perfil de velocidades

Para estimar el esfuerzo de corte utilizamos los perfiles de velocidad presentados en la Figura 4.8, que complementado con la ecuación 2.12, nos permite estimar el esfuerzo de corte del perfil logarítmico de velocidades, τ_{log} . El valor del parámetro k_{ef} es estimado a partir de la resta entre el diámetro de la grava expuesta, k , y el valor que se obtiene de extrapolar cada perfil logarítmico hasta el valor de velocidad cero. En el caso que $H_{arena} > H_{grava}$ se asume lo propuesto por Nikuradse (1950) y se emplea $k = k_{ef} = D_{50Arena}$. El valor de B viene dado por 7.5, siempre que Re_* sea mayor a 10, salvo en el caso de $H_{arena} > H_{grava}$, donde se asume un valor de $B = 5$ para estos casos.

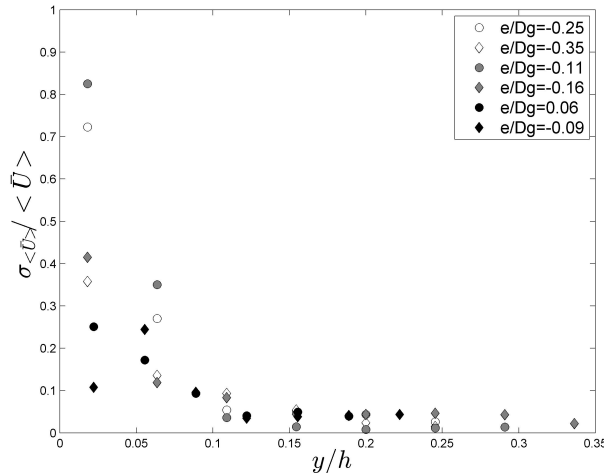


Figura 4.8. proporcional a la velocidad.

Es importante mencionar que la ecuación empleada en este análisis es valida solo en la zona en que la magnitud de la desviación estándar espacial del promedio de los perfiles de velocidad media, $\sigma_{<\bar{U}>}$, es despreciable con respecto a la velocidad en si (Czernuszenko, 2011). Es por esto que observando la Figura 4.8 se puede apreciar que para valores desde el cuarto punto

con respecto al fondo se cumple este criterio, y es a partir de este punto en donde se realizan las interpolaciones de la velocidad y se utilizan los datos para la estimación deseada.

En la tabla 4.6 se presentan los parámetros empleados, como los τ_{log} calculados.

Tabla 4.6. Estimación de τ_{log}^* y los parámetros asociados.

Experimento	k [mm]	k_{ef} [mm]	u_* [mm/s]	Re_* [u_*k_{ef}/ν]	τ_{log}^*
1	9,6	7,8	45,8	358	0,476
2	15,2	12,8	48,9	626	0,542
3	5,1	4,4	38,6	171	0,338
4	7,4	6,1	41,0	251	0,381
5	0,5	0,5	18,6	8	0,078
6	4,2	1,3	24,4	31	0,135

4.3.3. Comparación de esfuerzos de corte

En la Figura 4.9 se presenta la comparación entre los esfuerzos de corte medio corregido, τ_{VB} , los esfuerzos estimados a través de la extrapolación del perfil de velocidades, τ_{log} , y los valores obtenidos a partir de la extrapolación del esfuerzo de Reynolds promediado, τ_{Re} . Todos estos esfuerzos son adimensionalizados por la cantidad $\rho g R D_{50 \text{arena}}$.

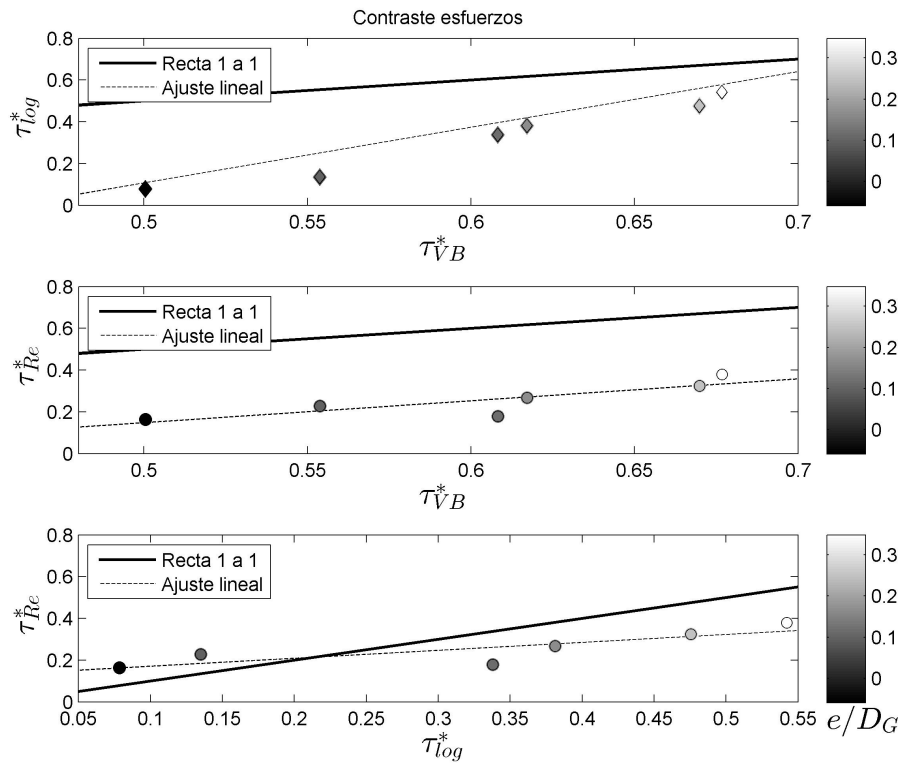


Figura 4.9. Comparación esfuerzos de corte.

De la Figura 4.9 se puede apreciar que τ_{log} difiere en los valores y en la tendencia en comparación con los esfuerzos de corte medio. Esto es consistente con lo observado por Bagherimiyab and Lemmin (2013), quien concluye que utilizar este método para estimar el esfuerzo de fondo solo debería utilizarse para condiciones de lecho plano. Por otro lado los valores τ_{Re} si bien subestiman los valores del τ_{VB} , estas cantidades presentan una tendencia similar.

Sustentado en que Nezu and Nakagawa (1993) mencionan que la mejor manera de representar los esfuerzos de corte medios a partir de mediciones de velocidad es a partir de los esfuerzos turbulentos, en la Figura 4.10, se analiza la velocidad de corte teórica $u_* = \sqrt{gRhS}$ en función del radio hidráulico corregido, el radio hidráulico y la altura de escurrimiento. Estos se contrastan con una curva ajustada de la forma $A \cdot \sqrt{gRhS}$ que colapsa sobre los datos registrados de u_{*Re} , se incluyen en la figura los valores de u_{*log} solo para denotar la dispersión de estos.

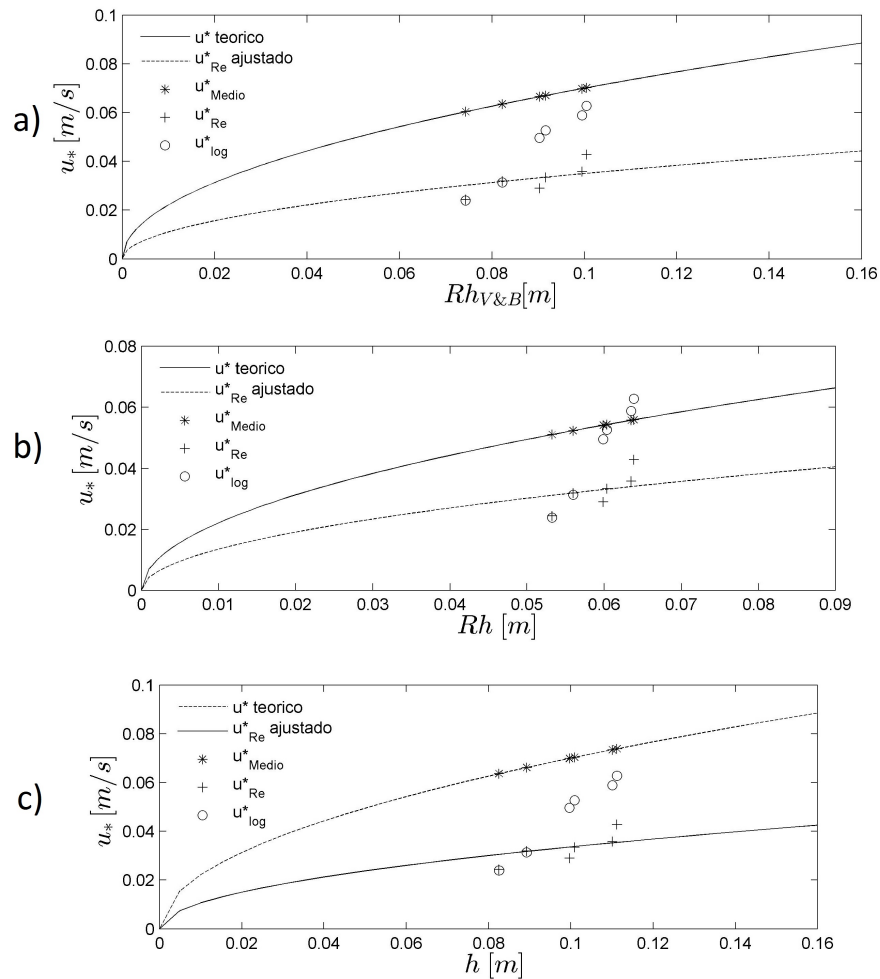


Figura 4.10. Comparación velocidad de corte.

El valor del parámetro de ajuste para las curvas de u_{*Re} corresponde a 0,6 para Rh , 0,5 para Rh_{VB} y 0,45 para h , se observa que la curva en función de Rh_{VB} y h presentan un mejor ajuste de los valores de u_{*Re} , esto nos hace considerar lo importante que es corregir el esfuerzo de corte medio ya que las mediciones de los instrumentos reflejan la influencia

del fondo y no así de las paredes como Rh , como las mediciones del ADV se asocian a un promedio del esfuerzo en el lecho, se asume como mejor indicador el análisis en función Rh_{VB} .

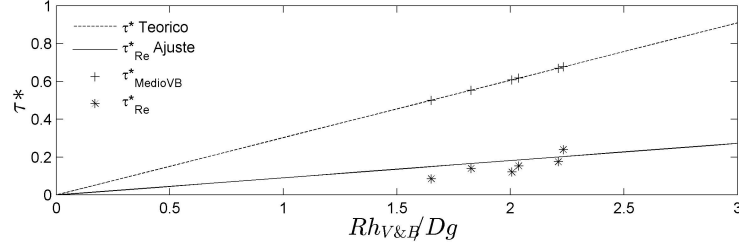


Figura 4.11. Comparación esfuerzos de corte.

Tomando en cuenta la observación anterior en la figura 4.11 se realiza un procedimiento análogo para los esfuerzos de corte en función de Rh_{VB}/Dg obteniendo que el $\tau^*_{Re} = 0,35 \cdot \tau^*_{medio}$.

La dispersión de los datos con respecto a la curva propuesta en las figuras 4.10 y 4.11 podría verse mitigada al incluir una mayor cantidad de perfiles de velocidad por experimento. Por otro lado la diferencia en magnitudes de los esfuerzos de corte se ha observado en estudios como el de Bagherimiyab and Lemmin (2013). Además, el hecho de que solo ciertas zonas del lecho permitan las mediciones podrían causar un sesgo en la magnitud de estas, por ultimo no poseer la frecuencia adimensional de muestreo optima podría repercutir en no apreciar la magnitud total de esta variable.

4.4. Descripción del gasto sólido de fondo

En la siguiente sección se busca una relación que permita caracterizar el gasto sólido de fondo producido en las experiencias. Para esto se conforma la Figura 4.12 en donde los datos experimentales de τ^* corregido y q^* obtenidos se grafican con un promedio de las relaciones clásicas para el gasto sólido de fondo para granulometría uniforme, (Meyer-Peter and Müller, 1948; Frank and Jørgen, 1976; Ashida, 1972) (de ahora en adelante se nombrará como M-P&M). Como la cantidad de datos experimentales es limitada, se utilizan los datos registrados por Kuhnle et al. (2012) (representados en la figura por los círculos). Con tal de visualizar mejor tendencias que puedan presentarse, además de los parámetros mencionados se adiciona en el gráfico el parámetro e/Dg . Recordemos este parámetro viene motivado por representar la exposición que presenta la arena con respecto a la grava, donde $e = H_{Arena} - H_{Grava}$ y $Dg = D_{50Grava}$.

Es importante hacer mención a que los datos del estudio de Kuhnle et al. (2012) se utilizan, ya que pertenecen a un estudio bastante similar, donde se cumple la relación $D_{50Grava}/D_{50Arena} \approx 100$, sin embargo no fueron medidos bajo las mismas condiciones experimentales. La instalación asociada a los datos de Kuhnle et al. (2012) consiste en un canal en el cual el flujo se encuentra en recirculación, y si bien los valores de τ^* y q^* se miden de forma similar, el nivel de la arena es estimado a partir de la conservación del material para los valores de baja

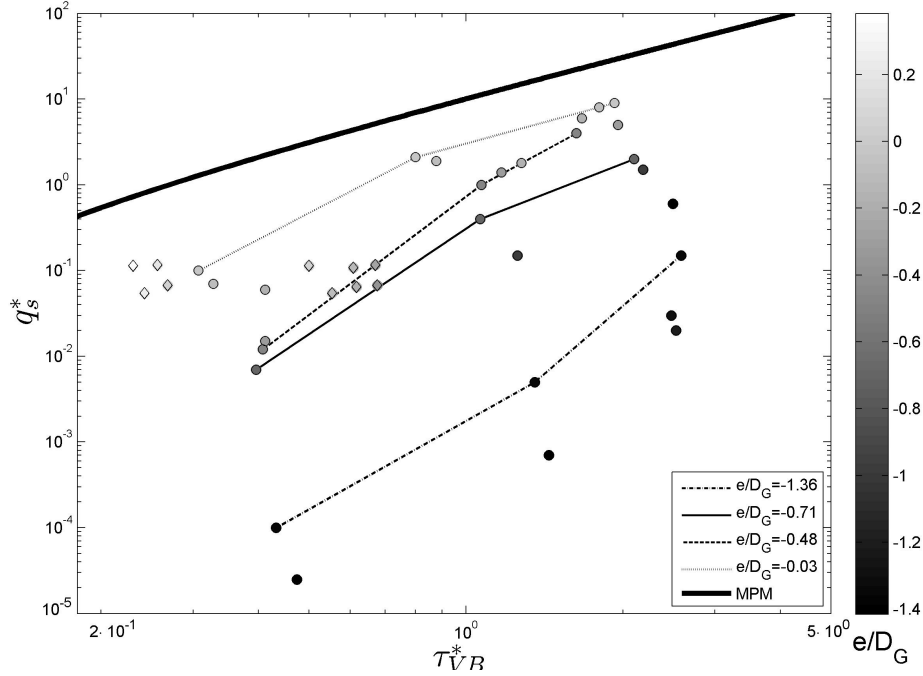


Figura 4.12. Datos experimentales contrastados con relaciones clásicas.

exposición (se utiliza el volumen de sedimento presente y el valor de porosidad de la grava), mientras que para los valores de exposición más superficiales fueron estimadas a través de mediciones directas.

En la Figura 4.12 se observa que si bien las predicción del gasto sólido de fondo (M-P&M) sobrestima el valor de los gastos medidos en las experiencias, se puede apreciar que al unir los datos que presentan el mismo valor de e/Dg , se forma una curva que sigue una tendencia similar a estas relaciones. Esto motiva a no despreciar esta relación, sino proponer una variación de ésta, en donde se agrega el parámetro de exposición e/Dg , permitiendo ajustar los valores precedidos.

A partir de un ajuste numérico empleando la función de MATLAB *lsqcurvefit*, se obtiene la siguiente relación predictiva para el arrastre de fondo:

$$q^* = A \cdot \exp(B \cdot (e/Dg)) \cdot (\tau^*/\tau_c)^C \cdot (\tau^* - \tau_c)^{3/2} \quad (4.3)$$

donde los valores de los parámetros A, B y C corresponden a 2.620 0.791 y 1.091 respectivamente. En la Figura 4.13 se puede contrastar los valores del ajuste propuesto con los valores medidos, observando un ajuste bastante satisfactorio.

Ahondando en la calidad del ajuste propuesto se realiza sobre los datos del estudio un análisis de errores (recuadro amplificado en la Figura 4.13) en donde se aprecia que las fuentes de error asociadas a la medición directa de q^* (eje vertical), no son significativas, mientras que la propagación de errores para el ajuste propuesto si presenta una mayor dispersión de los valores, permitiendo que parte de los datos experimentales eventualmente colapsen mejor

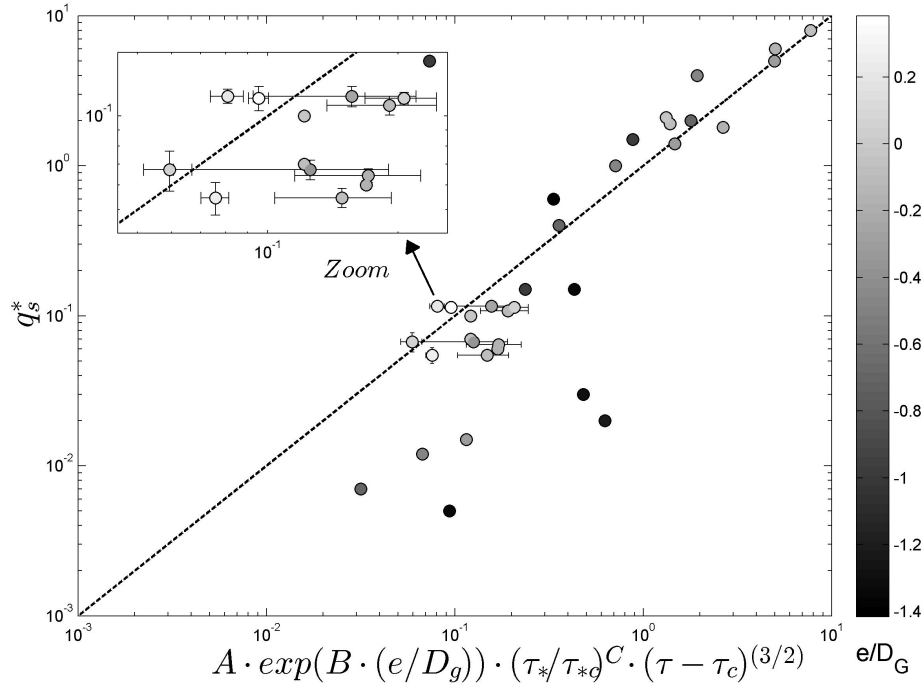


Figura 4.13. Calidad del ajuste propuesto.

sobre el ajuste. Es importante recalcar que si bien las líneas de error representan cantidades iguales alrededor de un dato, un eje se ve favorecido producto de la escala en que se presenta la información, por lo tanto si un dato no colapsa de buena manera sobre el ajuste, es mucho más conveniente que éste se encuentre sobreestimado, ya que el error lo favorecerá a estar dentro del rango.

Sobre los datos del estudio de Kuhnle et al. (2012), es importante recalcar que el gasto sólido fue cuantificado de diversas maneras dependiendo de la magnitud de éste. Para valores altos se cuantifica a través de un sensor ubicado en la cañería de recirculación del experimento, mientras que para valores bajos fue medido directamente a través de la recolección con una malla. El mayor error asociado a las mediciones puntuales con la malla podría explicar que la relación propuesta no se ajuste de buena manera para los valores bajos de q^* . Además, como se observó en el análisis de errores, hay que considerar que a menores valores de q^* las incertidumbres son más significativas.

En búsqueda de poder utilizar el ajuste propuesto en la ecuación 4.3 para las mediciones de τ^*_{Re} , se recalculan los coeficientes de esta empleando los valores de los estudios de Kuhnle et al. (2012) y el presente, pero estos se ajustan por la corrección $\tau^*_{Re} = A \cdot \tau^*_{medio}$ observada en la sección anterior. Con esto se obtiene que los valores de los parámetros A', B' y C' corresponden a 3.158 0.614 y 0.762 respectivamente.

En la Figura 4.14 se puede contrastar la calidad del ajuste para los nuevos coeficientes y los valores medidos, se puede observar que este presenta una mayor dispersión en general a lo largo de los diversos valores de q^* , pero esta no se eleva en ninguna zona particular, a diferencia de la Figura 4.13, esto se ve prometedor pero para considerar válido el uso de estos coeficientes se requiere un registro mucho más amplio de τ^*_{Re} .

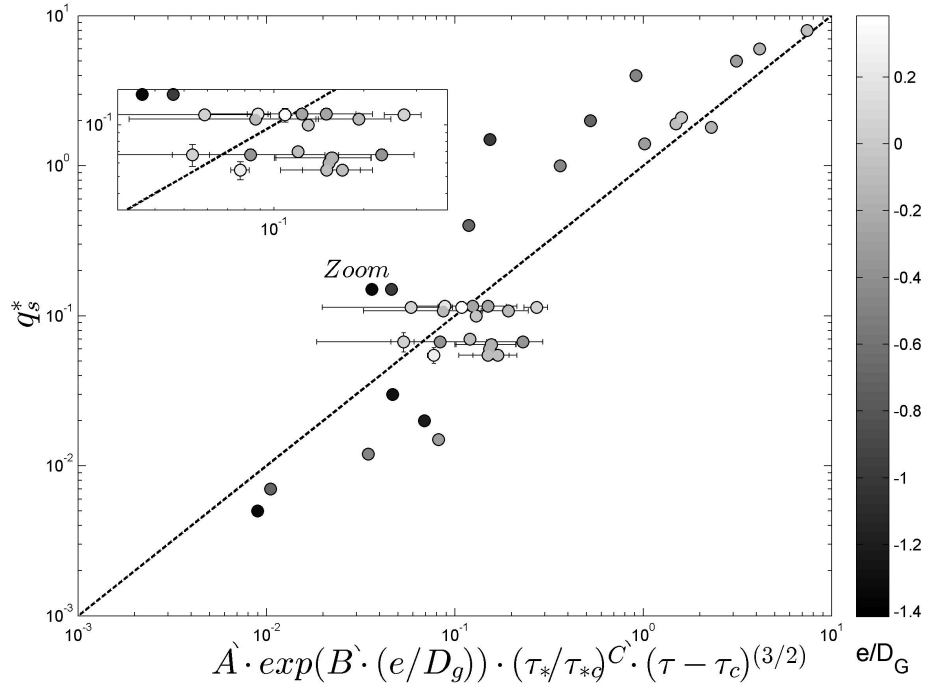


Figura 4.14. Calidad del ajuste propuesto para los valores τ^*Re .

Con fines de explorar mas sobre los resultados obtenidos se gráfica en la figura 4.15 la función W_{s*} para las relaciones predictivas del gasto solido de fondo para granulometría uniforme como es la de Meyer-Peter y Muller (M-P&M) y la propuesta en este estudio estas se grafican en función del esfuerzo de corte critico τ/τ_c , como estas relaciones se expresan para q^* es necesario realizar la siguiente conversion $W_s^* = \frac{q^*}{\tau^{*3/2}}$ con tal de poder utilizarlas.

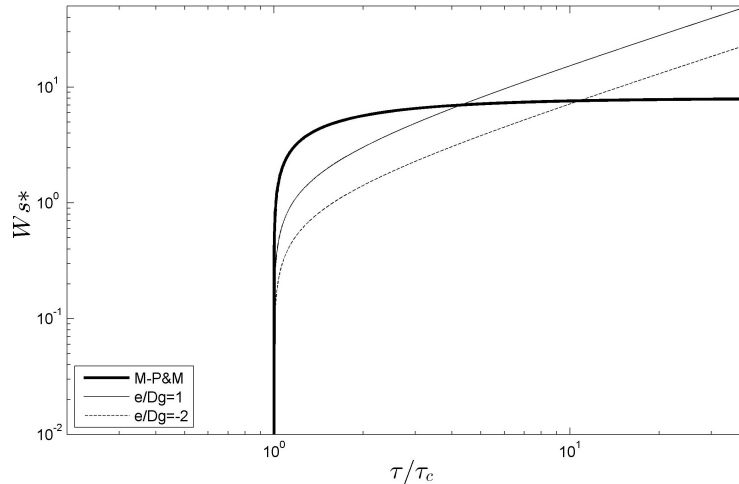


Figura 4.15. Comparación entre las ecuaciones de gasto solido de fondo.

Es importante recordar que la relación propuesta en este estudio predice el gasto en $f(\tau^*, e/Dg)$. Como en el gráfico solo se puede representar W_{s*} y τ^* , la otra variable se presenta graficando dos curvas para los valores de 1 y -2, respectivamente, del parámetro e/Dg . Estos valores corresponden a los rangos aproximados entre los que se dispone de datos experimentales.

Se observa que entre valores superiores al esfuerzo de corte crítico y $\tau/\tau_c > 10$, la relación de M-P&M tiende a sobrestimar el arrastre en comparación a la propuesta en este estudio. Esta tendencia cambia para valores de $\approx \tau/\tau_c > 10$, donde la relación propuesta en el estudio es la que sobrestima el gasto. En el rango analizado esta sobrestimación no parece ser significativa.

En pos de afinar el ajuste propuesto en la ecuación 4.3 es necesario adicionar los datos de estudios posteriores, que buscarán abarcar otros valores de esfuerzos de corte, diámetros característicos y exposición de la arena. En particular, para este último es necesario poner énfasis en ampliar el rango de datos para los valores $H_{arena} > H_{grava}$.

Capítulo 5

Discusiones

5.1. Metodología

5.1.1. Montaje experimental

El montaje experimental permite reproducir de manera satisfactoria el fenómeno del transporte de sedimentos sobre un lecho de grava en ríos, sin embargo los tiempos empleados entre preparar y realizar cada experimento son demasiado extensos y laboriosos (hasta de aproximadamente 5 días). Para acortar los tiempos en la medición de la velocidad del flujo implementar métodos, como la técnica PIV, parecen una buena medida. Además, esta técnica permite registrar una mayor zona en la vertical del flujo y medir en condiciones mas adversas, lo que posibilita por ejemplo trabajar con pendientes mayores, lo que tiene como consecuencia reproducir los fenómenos mas rápidamente. Otra mejora propuesta, pero que implica cambios significativos, es trabajar con instalaciones de menor escala, lo que a la vez implicaría una inversión en instrumentos de medición para escalas menores como lo son: flujometro, lentes Micro con gran apertura de diafragma y un sistema que pueda generar un plano láser mas homogéneo e intenso.

Una mejora que disminuiría lo engorroso del cambio de pendiente sería sostener la estructura bajo un sistema mecánico, que permita ajustar la pendiente a través de un pistón o motor, dejando de lado el método actualmente empleado, que requiere de más de una persona y necesita instrumentos como nivel topográfico que de ser mal empleados o no encontrarse en las mejores condiciones, pueden inducir a error.

La caja de adquisición y sus sensores son un gran avance en pos de automatizar la instalación. Sin embargo, estos muestran ser sensibles a la cantidad de elementos que se encuentran conectados a la red eléctrica del laboratorio. Con el paso del tiempo, las instalaciones tenderán a masificar este tipo de tecnología y se hará necesario contar con un estabilizador de voltaje para las instalaciones del laboratorio.

5.1.2. Instrumentación

El ADV es un instrumento de gran precisión y alta utilidad para caracterizar la velocidad del flujo en todos sus ejes. Sin embargo, dadas, las condiciones del montaje experimental, hacen que este solo se puede utilizar para registrar el primer tercio del escurrimiento total. Para la zona restante, la intrusión del equipo altera el escurrimiento generando burbujas que se adhieren al sensor, lo que se ve reflejado en la bajada calidad de los parámetros como la correlación o el SNR. Experimentos con escalas mas grandes permitirían disminuir el efecto relativo de la intrusión del sensor, permitiendo abarcar un rango más alto en la vertical.

La calidad de las mediciones según el criterio de García et al. (2005), no son las óptimas, sin embargo, es importante mencionar que el modelo propuesto sobrestima los valores mencionados como aceptables. Es importante mencionar que inicialmente se trato de implementar un ADV de marca Nortek, el cual permite el registro de datos con una frecuencia de hasta 200 Hz. Con ello las frecuencias adimensionales rondarían el valor de 50. Lamentablemente éste presenta problemas asociados a la grava del lecho, que inhabilita las mediciones. Dado esto, se opta por utilizar el sensor de marca Sontek, que si bien también se ve afectado por las condiciones adversas, es mucho menos sensible que el equipo anterior.

Las alturas del escurrimiento fueron registradas a través de reglas dispuestas en las paredes del canal. Si bien este método cumple su función, no es muy práctico en el estudio de regímenes impermanentes. Para registrar las alturas de escurrimiento digitalmente, se diseñó e implementó un prototipo de sensor capacitivo, cuyo voltaje de salida es proporcional a la altura de agua. Las curvas de calibración de éste se pueden ingresar al *software SCI*, permitiendo registrar la variable en tiempo real. Lamentablemente este sensor no pudo ser producido en serie pero quedo próximo a implementarse en futuros estudios.

5.1.3. Metodología experimental

La implementación de una placa orificio permite realizar la selección del caudal para las experiencias de una forma rápida y sencilla, en comparación a métodos previamente utilizados en la instalación, como el sistema de aforo directo. Esta, además, ofrece mayores precisiones, ya que si bien su calibración fue llevada a cabo por el sistema de aforos, estos se realizaron de una manera mucho más rigurosa, utilizando un estanque de 500 litros, cuyo error asociado es bastante inferior a usar un estanque de aproximadamente 70 litros.

El fenómeno de introducir una tasa de gasto sólido constante se puede recrear de una forma satisfactoria, a través del uso de la tolva con servomotores. Desafortunadamente ésta no puede ingresar más de dos tasas lo suficientemente diferentes de Q_{SIN} , producto del torque limite que poseen los equipos. Además, como ya se mencionó, los servo-motores al ser análogos pueden ser sensibles a las variaciones de voltaje producto del uso de equipos eléctricos de alto consumo, trayendo como consecuencia leves irregularidades en su funcionamiento. Los puntos mencionados anteriormente se pueden solucionar a través de la implementación de servomotores digitales de gama alta.

La recolección del gasto sólido de fondo se ve mejorada con la implementación del sistema de

la fosa. Este soluciona la dificultad de tomar la muestra directamente desde el final del canal para altos caudales. La duración de los intervalos de recolección de muestras se busca sean lo suficientemente prolongados, con tal de disminuir el error asociado al tiempo que demora recolectar la muestra o la imprecisión de no tomarla exactamente en el instante determinado. Sin embargo, la duración de estos intervalos está condicionada al arrastre de fondo que se este generando, ya que la fosa tiene un límite operativo. Fuera de esta consideración, el método es efectivo y permite apreciar el valor del arrastre generado de buena manera.

5.1.4. Procesamiento de la información

El análisis de fotografías permite identificar de manera exitosa la interfaz arena-grava. Sobre ésta se aplica un método que permite remover picos y suavizar levemente el limite identificado. La aparición de singularidades puede asociarse a pequeños destellos en el acrílico, producto de una particular posición de la arena. Estos, posiblemente, puedan removerse al cambiar la iluminación a una posición cenital. El uso de iluminación LED, con temperaturas de color regulable, permitiría encontrar la temperatura de color en que se excite de mejor manera la frecuencia del espectro de color RGB asociado a la arena utilizada, volviendo adaptable la instalación a diversos tipos de arena.

Las series de tiempo registradas por el ADV fueron procesadas para remover los spikes. Para esto se utiliza el método del espacio umbral, propuesto por Goring and Nikora (2002), el que ofrece resultados satisfactorios. Una vez ejecutado esto, no se realiza otro tipo de procesamientos según parámetros como el SNR o correlación, ya que las observaciones para estos criterios no son concluyentes para el caso de flujos turbulentos, como lo es este caso. Una vez que los datos se depuran, se realiza un promediado temporal sobre cada punto y un promediado de los perfiles medidos en la experiencia (promediado espacial), con el objetivo de eliminar las singularidades espaciales de los datos obtenidos. Si bien en los parámetros derivados de la velocidad se pueden realizar observaciones valiosas, una mayor cantidad de mediciones, considerando por ejemplo planos paralelos al ya medido, permitiría tener registros mas prolijos.

5.2. Resultados

5.2.1. Gasto solido de fondo

En la búsqueda de una relación que prediga el gasto sólido de fondo, se empleó como punto de partida la relación clásica para granulometría uniforme tipo M-P&M y fue ajustada por el parámetro e/Dg . Este expresa la razón entre la exposición de la arena y el diámetro característico (escala relevante del transporte intersticial). A diferencia del estudio de Kuhnle et al. (2012), se descarto emplear la función de la geometría de la rugosidad $A(z_s)$, para determinar el gasto sólido de fondo, ya que, este es constante para valores superiores a la altura de la grava y no permitiría lograr una relación unificadora después de ese límite. Además, determinar este parámetro requiere implementar un modelo de elevación digital

(DEM), el cual necesita de mayor instrumentación para determinarlo y lo vuelve poco práctico para utilizar esta relación en problemas de ingeniería.

En el ajuste propuesto se evaluaron diversas funciones sobre el parámetro e/Dg . En particular, se probaron funciones del tipo lineales y sinusoidales, como las mencionadas por Tuijnder (2010). Ninguna de éstas trajo un ajuste satisfactorio y finalmente el ajuste se logro de una manera apropiada, empleando una función exponencial.

Una observación sobre los valores del parámetro e/Dg , utilizados para la calibración de los coeficientes de la ecuación 4.3, es que estos están levemente sobrestimados para los valores $H_{arena} > H_{grava}$, ya que en estas situaciones se generan formas de fondo, las que en la transversal no son del todo regulares. Esto genera que la cámara capture la zona de la pared mas lejana, omitiendo las zona de menor altura de la forma de fondo. Este efecto de variación en la transversal, probablemente, se atribuyen a la grava sobre la cual las formas de fondo se desplazan. Para los valores de e/Dg en donde $H_{arena} < H_{grava}$, asumimos que la representación lateral es acertada. Esto se ratificará en estudios que están siendo desarrollados en la actualidad por el grupo investigador y permiten conocer el perfil de concentración de sedimentos de forma no intrusiva.

Es importante que al momento de aplicar las relaciones de gasto sólido, como la propuesta en este estudio, en situaciones de diseño, no se debe olvidar la alta variabilidad que presentan los datos sobre los cuales son derivadas y no debe aceptarse los valores estimados sin considerar un rango de error. Lo ideal para estos casos es contrastar varias metodologías de cálculo, a pesar que no sean las ideales para la configuración dada, una vez realizado esto, se comparan con las mediciones de terreno (si se dispone de estas).

Futuras investigaciones deberán indagar la extensión que pueda alcanzar la relación propuesta para predecir el gasto sólido de fondo, alterando las razones de los materiales empleados, $D_{50Grava}/D_{50Arena}$. Además, variar las propiedades físicas de los materiales, por ejemplo utilizar sedimentos del tipo cohesivos.

5.2.2. Parámetros asociados a la velocidad

En la Figura 4.3, se aprecia que las mediciones de la intensidad de la turbulencia siguen una tendencia similar a las curvas semiteóricas propuestas por Nezu and Nakagawa (1993), esto difiere de las observaciones realizadas por Wren et al. (2011), donde si bien las mediciones tienen la tendencia a las curvas mencionadas, estas presentan una magnitud menor. Esto podría asociarse a la estimación del valor de u_* utilizado, recordemos que este fue derivado de las mediciones del tercer punto con respecto al fondo (se utilizaron puntos con poco ruido instrumental), lo que pudo traer como consecuencia una subestimación del valor de este parámetro provocando la discordancia en las observaciones.

Nezu and Nakagawa (1993) observó que sobre superficies de alta rugosidad, los valores de la intensidad de la turbulencia para valores de y/H cercanos a cero, se encontraban por debajo de las curvas semi-teóricas. Esto también se percibe en este estudio, pero en particular, para nuestro caso, se observaría que las mediciones asociadas a los dos primeros puntos presentan

alto ruido experimental y la pregunta a realizarse es si acaso no ocurrió lo mismo en estudios previos, dada la dificultad de medir en esta zona.

Al contrastar los valores derivados para el esfuerzo de corte de fondo a partir de la altura de escurrimiento (τ_{VB}) y los obtenidos a partir de las mediciones de velocidad del flujo (τ_{Re} y τ_{log}), se puede apreciar una tenencia similar entre τ_{medio} y τ_{Re} , no así en la magnitud de estos valores. La causa de esto se atribuye a que las mediciones registradas con el instrumento tienen el sesgo que solo se pudieron efectuar en la zona mas lisa de cada roca, pasando por alto las zonas donde se conectan, donde dada la geometría de esta región se producen las mayores fluctuaciones de la velocidad en el flujo.

Para los experimentos donde $H_{grava} < H_{arena}$, el sensor ADV no se pudo utilizar producto de las dificultades de este para operar con lecho móvil, es por esto que se opto por utilizar la técnica PIV. Si bien, los resultados de cada vídeo de las pruebas preliminares para esta técnica mostraban comportamientos del perfil de velocidad similares a los teóricos, al juntar los vídeos se obtuvieron resultados que no tenían sentido físico, esto se atribuye a que al grabar tan desfasado un vídeo de otro (tiempo que requiere la cámara para grabar), las formas de fondo se desplazan y no hay consistencia entre los registros. Para arreglar este problema se sugiere registrar un solo vídeo de una extension cercana al tiempo de convergencia, esto se puede realizar a través una cámara con mayor memoria o grabar a menos FPS (esto ultimo tiene un alto riesgo de no converger).

Realizar mediciones con la técnica PIV sería altamente enriquecedor para las experiencias en que los valores $H_{grava} > H_{arena}$, ya que, midiendo en la zona cercana a la pared del canal, se podrían obtener observaciones del comportamiento de los parámetros hidráulicos en la zona intersticial. Así, por ejemplo, poder describir de manera mas precisa el perfil de velocidad (Nikora et al., 2004), además de comprender aún más en detalle como afecta la arena sobre los parámetros derivados de las mediciones de velocidad.

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo principal de estudiar experimentalmente la contaminación por sedimentos finos en un canal con lecho de grava, centrándose en el gasto sólido de fondo, se cumple, así como también los objetivos específicos que comprenden las modificaciones del montaje experimental (tolva, placa orificio y trampa de sedimentos) y la implementación de técnicas de medición (detección de interfaz arena-grava por fotografías y sensor ADV), permitiendo el correcto desarrollo y registro de los experimentos.

A continuación se presentan las conclusiones mas relevantes del estudio, dividiéndose en metodología experimental, estudio del gasto solido de fondo y parámetros derivados de las mediciones de velocidad del flujo.

6.1. Metodología Experimental

- El montaje experimental del canal permite la ejecución de experimentos de transporte de sedimentos finos en un canal con lecho de grava, de manera satisfactoria. Esto lo vuelve una herramienta científica de gran valor, ya que nos permite realizar estudios de ríos a escala de laboratorio, con las ventajas que esto incluye, como lo son el mayor control de las variables físicas observadas.
- El método de tomas de fotografía del lecho dentro de una cámara oscura permite identificar las interfaces arena-grava de forma satisfactoria. Si bien acá se usó solamente para las condiciones permanentes, también puede ser empleado para regímenes impermanentes, con una frecuencia de fotografía de 1, 2, 12, 60 y 120 Hz según cuales sean las escalas de tiempo del fenómeno en desarrollo.
- El diseño de la tolva permite entregar un gasto sólido de entrada de una manera relativamente constante. Además, su elaboración permite una configuración de una manera rápida e intuitiva.
- El sistema de la caja de adquisición, operando en conjunto con la tolva y placa orificio ofrece un gran avance en función de digitalizar el registro de los datos.
- La caracterización de las velocidades del flujo se pueden realizar de una manera correcta con el instrumento ADV, pero solo para una fracción de la altura del flujo. Si se desea

realizar esta caracterización sobre la totalidad de la altura del flujo es necesario emplear técnicas como PIV, a costa de perder una de las componentes del eje cartesiano.

6.2. Análisis del arrastre sólido de fondo

- La relación propuesta para predecir el gasto sólido de fondo logra un ajuste bastante satisfactorio, mejorando la exactitud de las predicciones en comparación a las relaciones tradicionales para predecir el gasto sólido de fondo en granulometría uniforme (Frank and Jørgen, 1976), (Meyer-Peter and Müller, 1948). Es importante recordar que esta relación preserva, en gran parte la forma de las relaciones clásicas, pero la ajusta por el parámetro de escondimiento de la arena e/Dg .
- La utilización en conjunto de los datos obtenidos en este estudio y los de estudios con características similares, como los de Kuhnle et al. (2012), permiten decir que la relación para el gasto sólido de fondo propuesta avanza en buen camino a ser unificadora. Sin embargo, es importante recordar que el ajuste propuesto no es tan bueno para los valores bajos del parámetro q^* . La dispersión del ajuste puede ser compensada a través el análisis de errores, ya que para los valores bajos de q^* la fuente de error es más significativa. Lamentablemente no se posee el detalle sobre los errores de Kuhnle et al. (2012), que permitirían profundizar en este punto.
- Si bien el ajuste propuesto funciona de buena manera, es necesario expandir los rangos de los datos experimentales sobre los cuales fue ajustado. Para esto es necesario realizar una mayor cantidad de experimentos buscando obtener otros órdenes del valor del gasto sólido de fondo como del esfuerzo de corte y que a la vez estos cubran un amplio rango del parámetro e/Dg . Modificaciones necesarias para llevar esto a cabo son: ampliar el rango de operación de la tolva y trabajar con otras pendientes. Estas observaciones se están llevando a cabo en estudios que actualmente se encuentran en desarrollo.

6.3. Parámetros derivados de la velocidad del flujo

- Se observa que los perfiles del esfuerzo de Reynolds son sensibles al parámetro e/Dg . Incrementos en el valor de éste produce una disminución del valor de los esfuerzos de corte. Este fenómeno también es observado por Wren et al. (2011). Realizar estudios en donde se disponga una gran variedad de valores de e/Dg , podría dar a entender si la disminución del esfuerzo de corte observada sigue algún comportamiento definido en función de la exposición de la arena.
- El esfuerzo de corte total se compone principalmente del esfuerzo de Reynolds promediado, ya que el esfuerzo de corte viscoso varía desde menos del 5% en la zona cercana al fondo y se vuelve prácticamente nulo al alejarse de este.
- Los valores de la intensidad de la turbulencia se ajustan a las curvas semi-teóricas propuestas por Nezu and Nakagawa (1993) para valores ubicados en $y/H > 0,15$. Para valores ubicados bajo este rango las mediciones se encuentran por debajo de las curvas, comportamiento que también fue observado por Nezu and Nakagawa (1993), en el caso de lechos de alta rugosidad como lo son los de este estudio.

- La comparación de esfuerzos refleja que los valores derivados de las mediciones de la velocidad en el flujo, no coinciden con los valores del τ_{VB} , pero si presentan órdenes de magnitud similares, como observó en lechos de grava Bagherimiyab and Lemmin (2013). Por otro lado los valores de τ_{VB} si presenta tendencias similares a τ_{Re} , lo que concuerda de cierta manera con Nezu and Nakagawa (1993) quien sugiere que de los métodos derivados de mediciones de la velocidad, el que mejor representa el esfuerzo de corte de fondo es el esfuerzo de corte turbulento. Al ajustar estas mediciones sobre una curva teórica, se observa que estas representan alrededor de un 35 % del esfuerzo total.
- La frecuencia adimensional propuesta por García et al. (2005) indica que las mediciones realizadas con el sensor ADV no son realizadas de una forma optima. Es importante recordar que el valor sugerido es sobrestimado al considerado por otro autores (Nezu and Nakagawa, 1993) y que las mediciones tampoco se alejen en demasía del valor propuesto (no hay un cambio del orden del valor). Además, como se observó en los resultados, las mediciones permiten observar tendencias de los parámetros derivados de estas.
- Hasta que no se disponga de mayor cantidad de mediciones de la velocidad del flujo, el esfuerzo que se considerará como valido para conducir los estudios es el τ_{medio} corregido, ya que es el que posee mayor cantidad de datos y estos no presentan sesgos en sus registros como es el caso de τ_{Re} y τ_{log} .

Bibliografía

- Aberle, J. (2007). Measurements of armour layer roughness geometry function and porosity. *Acta Geophysica*, 55(1):23–32.
- Ashida, K. (1972). Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams. *Journal of Civil Engineering, Jpn Soc Civil Engineers*, 206:59–69.
- Bagherimiyab, F. and Lemmin, U. (2013). Shear velocity estimates in rough-bed open-channel flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(14):1714–1724.
- Bendat, J. S. and Piersol, A. G. (2000). *Random data: analysis and measurement procedures*, volume 729. John Wiley & Sons.
- Czernuszenko, W. (2011). Spatially averaged log-law for flows over rough bed in zero-and non-zero-pressure gradient boundary layers. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 58(1-4):65–86.
- Diplas, P. and Parker, G. (1992). Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. *Dynamics of gravel-bed rivers*, pages 313–329.
- Frank, E. and Jørgen, F. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7(5):293–306.
- García, C. M., Cantero, M. I., Niño, Y., and García, M. H. (2005). Turbulence measurements with acoustic doppler velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Giménez-Curto, L. A. and Lera, M. A. C. (1996). Oscillating turbulent flow over very rough surfaces. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 101(C9):20745–20758.
- Goring, D. G. and Nikora, V. I. (2002). Despiking acoustic doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1):117–126.
- Heskestad, G. (1965). A generalized taylor hypothesis with application for high reynolds number turbulent shear flows. *Journal of Applied Mechanics*, 32(4):735–739.
- Jobson, H. E. and Carey, W. P. (1989). Interaction of fine sediment with alluvial streambeds. *Water Resources Research*, 25(1):135–140.
- Kuhnle, R., Wren, D., Langendoen, E., and Rigby, J. (2012). Sand transport over an immobile gravel substrate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2):167–176.

- Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. IAHR.
- Mori, N., Suzuki, T., and Kakuno, S. (2007). Noise of acoustic doppler velocimeter data in bubbly flows. *Journal of engineering mechanics*.
- Nezu and Nakagawa (1993). *Turbulence in open-channel flows*, volume 4 of *IAHR Monographs*. CRC Press, 3 edition. An optional note.
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., and Griffiths, G. (2001). Spatially averaged open-channel flow over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Nikora, V., Koll, K., McEwan, I., McLean, S., and Dittrich, A. (2004). Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10):1036–1042.
- Nikuradse, J. (1950). *Laws of flow in rough pipes*. National Advisory Committee for Aeronautics Washington.
- Niño, Y. and García, M. (1998). Using lagrangian particle saltation observations for bedload sediment transport modelling. *Hydrological Processes*, 12(8):1197–1218.
- Niño, Y., García, M., and Ayala, L. (1994). Gravel saltation: 1. experiments. *Water resources research*, 30(6):1907–1914.
- Pedocchi, F., Martin, J. E., and García, M. H. (2008). Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 45(1):183–186.
- Pope, N., Widdows, J., and Brinsley, M. (2006). Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach—a comparison of annular flume and field data. *Continental Shelf Research*, 26(8):959–970.
- Sontek (1996). Pulse coherent doppler processing and the adv correlation coefficient. Technical Report 1, Sontek, 6837 Nancy Ridge Drive, Suite A • San Diego, CA.
- Soulsby, R. (1981). Measurements of the reynolds stress components close to a marine sand bank. *Developments in Sedimentology*, 32:35–47.
- Struiksma, N. (1999). Mathematical modelling of bedload transport over non-erodible layers. In *Proceedings IAHR Symp. River Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova*, volume 1, pages 89–98.
- Tuijnder, A. P. (2010). *Sand in short supply: modelling of bedforms, roughness and sediment transport in rivers under supply-limited conditions*. PhD thesis, Universiteit Twente.
- Vanoni, V. A. and Brooks, N. H. (1957). *Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams*. California Institute of Technology Sedimentation Laboratory.
- Wahl, T. (2003). Discussion of “despiking acoustic doppler velocimeter data by derek g. goring

and vladimir i. nikora. january 2002, vol. 128, no 1. *Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, June*, 1:484–488.

Waters, T. F. (1995). *Sediment in streams: sources, biological effects, and control*. American Fisheries Society.

Welch, P. D. (1967). The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 15(2):70–73.

Wilcock, P. R. and Crowe, J. C. (2003). Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2):120–128.

Wren, D., Langendoen, E., and Kuhnle, R. (2011). Effects of sand addition on turbulent flow over an immobile gravel bed. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003–2012)*, 116(F1).

Wu, W. and Wang, S. S. (2006). Formulas for sediment porosity and settling velocity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(8):858–862.

Anexos

Anexo A

Estimación porosidad de la grava

En orden de caracterizar más profundamente la grava, se estima de manera directa la porosidad ϕ en función de la altura. Para calcularla se emplea un recipiente de acrílico de 38 cm de ancho 39 de largo y 45 de alto. Sobre este se dispone el lecho de la misma forma en que se hace en el montaje experimental, conformando una capa de aproximadamente 7 cm de alto. Sobre el recipiente se agregan volúmenes de agua cuantificados con una probeta y se miden los cambios de volumen a través de las reglas dispuestas en el recipiente. Con la razón entre el volumen de agua agregado y el cambio de volumen, se puede estimar la variable deseada que se presenta en la Figura A.1.

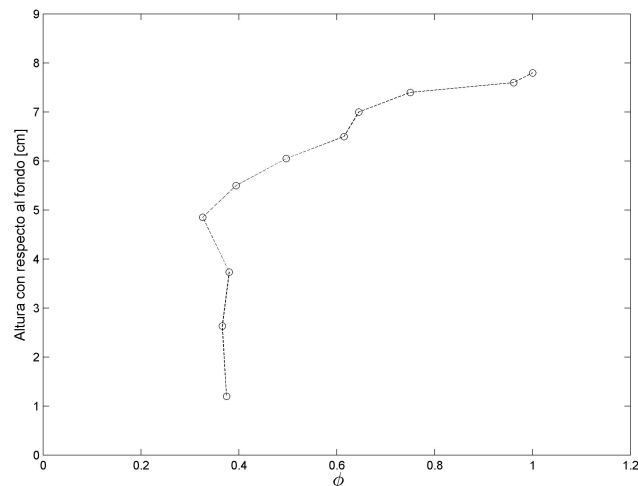


Figura A.1. Porosidad grava.

Anexo B

Cálculo densidad partículas de rodamina

Para realizar la estimación de la densidad de las partículas de rodamina, se utiliza el método de volumen desplazado. Este método se realiza sobre los cilindros de plástico de rodamina creados. Es importante mencionar que la densidad obtenida de este cilindro no será exactamente igual a haberla estimado a partir de las partículas como tal, pero nos da una buena primera aproximación a este valor. Los pasos realizados para calcular la densidad son los siguientes:

1. **Obtener la masa del objeto** Se pesan los cilindros de rodamina en una balanza digital, cuya precisión es del centigramo, obteniendo $M_{rodamina}$.
2. **Estimar el volumen del objeto** Esto se realiza con una probeta, la cual se llena hasta un volumen inicial V_0 . Este tiene que ser suficiente, tal que permita contener al objeto del cual se desea obtener el volumen. Posterior a esto se introduce el objeto y se calcula el volumen final V_f . La resta de estos valores corresponde al $V_{rodamina}$.
3. **Realizar el calculo** Una vez calculado la masa y el volumen, se realiza el cálculo de densidad.

En la Tabla B.1 se presentan los cálculos realizados.

Tabla B.1. Calculo densidad de rodamina.

Calculo	$M_{rodamina}$ [Kg]	V_o [m^3]	V_f [m^3]	$V_{rodamina}$ [m^3]	$\rho_{rodamina}$ [Kg/ m^3]
1	0,1681	0,000600	0,0007400	0,000140	1200,71
2	0,2102	0,000500	0,0006700	0,000170	1236,47
3	0,1523	0,000520	0,0006450	0,000125	1218,40

Anexo C

Datos estudio experimental Kuhnle et al. (2012)

En la siguiente sección se presentan los datos del estudio experimental de Kuhnle et al. (2012). Estos se utilizan para ampliar la cantidad de información y con esto mejorar la calidad del ajuste que permite predecir el arrastre sólido de fondo.

El parámetro e/Dg no existe en este estudio y solo se presenta el parámetro Z_i , el cual simboliza el nivel de la arena, donde Z_{100} significa que la arena esta hasta el tope de la grava y en Z_0 se encuentra 5 cm por debajo de esta. Dividiendo este parámetro por el diámetro característico de la grava (3.5 cm) se obtienen los valores limites de nuestro parámetro propuesto. Se propone la siguiente relación lineal para el valor de e/Dg , donde el valor i corresponde al subíndice Z_i .

$$e/Dg = \frac{i - 100}{100 - i} \cdot 1,43 - 1,43 \quad (C.1)$$

Tabla C.1. Datos experimentales de Kuhnle et al. (2012).

Experimento	τ^*	q^*	e/Dg
1	2,472	0,03000	-1,286
4	2,490	0,60000	-1,416
3	1,441	0,00070	-1,416
2	0,474	0,00003	-1,416
7	2,581	0,15000	-1,358
6	1,354	0,00500	-1,358
5	0,433	0,00010	-1,358
8	2,525	0,02000	-1,213
10	2,185	1,50000	-0,982
9	1,255	0,15000	-0,982
13	2,099	2,00000	-0,708
12	1,064	0,40000	-0,708
11	0,396	0,00700	-0,708
16	1,626	4,00000	-0,477
15	1,070	1,00000	-0,477
14	0,408	0,01200	-0,477
19	1,954	5,00000	-0,303
18	1,169	1,40000	-0,303
17	0,412	0,01500	-0,303
23	1,668	6,00000	-0,173
22	1,276	1,80000	-0,173
21	0,412	0,06000	-0,173
26	1,800	8,00000	-0,087
25	0,876	1,90000	-0,087
24	0,328	0,07000	-0,087
30	1,925	9,00000	-0,029
29	0,800	2,10000	-0,029
28	0,307	0,10000	-0,029

Anexo D

Estimación del número de Rouse para el montaje experimental

Para que predomine el transporte sólido de fondo en las experiencias, se requiere que el número de Rouse sea mayor a uno. Para estimarlo, el valor de w_s se calcula a partir de Wu and Wang (2006) y el valor de u^* se desprende del esfuerzo de corte medio.

En las Figuras D.1 y D.2 se presenta el calculo de éste para el caso crítico que es el diámetro inferior de la arena y el diámetro característico. En las ordenadas se presentan las posibles alturas de escurrimiento a utilizar y en las abscisas se presentan los números de Rouse asociados.

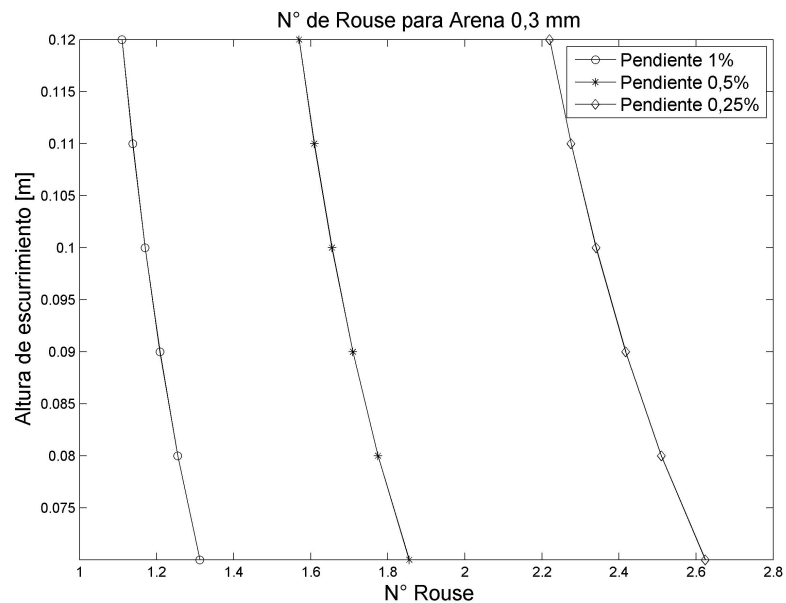


Figura D.1. N° de Rouse para arena de diámetro 0,3 mm.

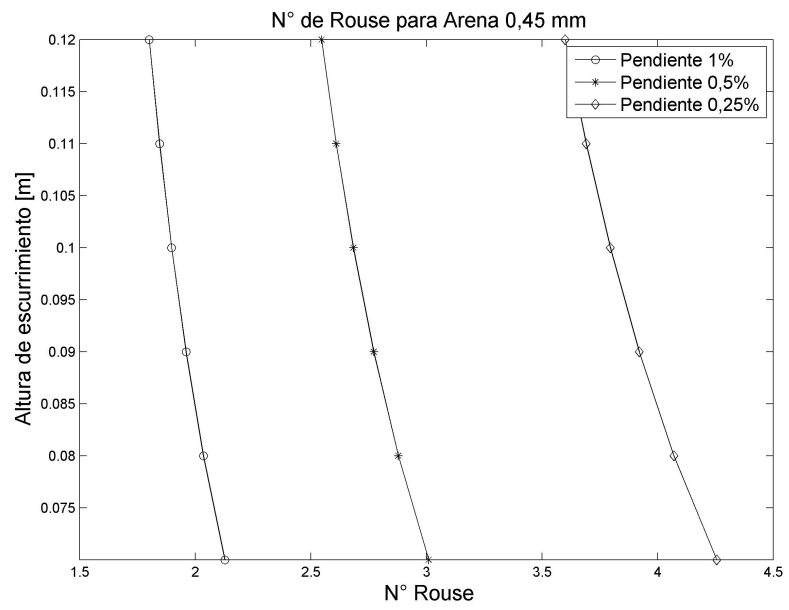
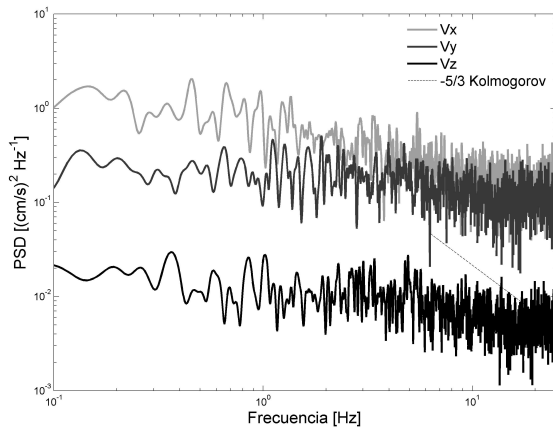


Figura D.2. N de Rouse para arena de diámetro 0,45 mm.

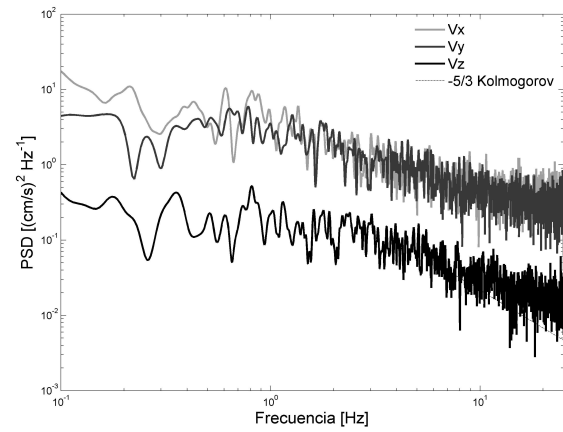
Anexo E

Espectros de frecuencia de las fluctuaciones de velocidad medidos con ADV

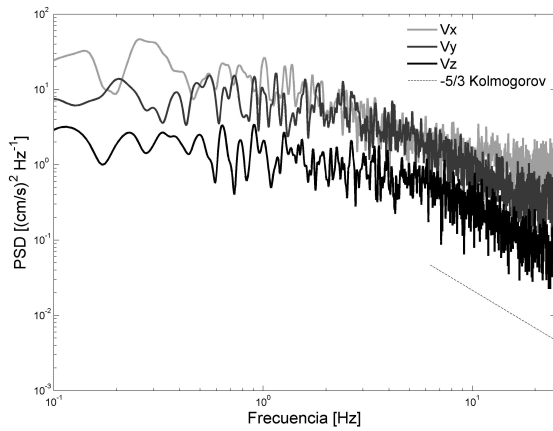
En la siguiente sección se presentan los espectros de las fluctuaciones de velocidad para los seis primeros puntos de uno de los cuatro perfiles realizado para cada experiencia (donde el primer punto simboliza aproximadamente $y/H = 0$ y se aumenta en intervalos de aproximadamente $\Delta y/h = 0,5$). Como se menciona en el Capítulo 4, para conformar estos espectro se utilizo el método de Welch (1967), donde cada espectro se compone del promedio de unos seis espectros los cuales están conformados por una cantidad aproximada de 1500 puntos, los cuales se obtienen al subdivir las mediciones de tres minutos por punto.



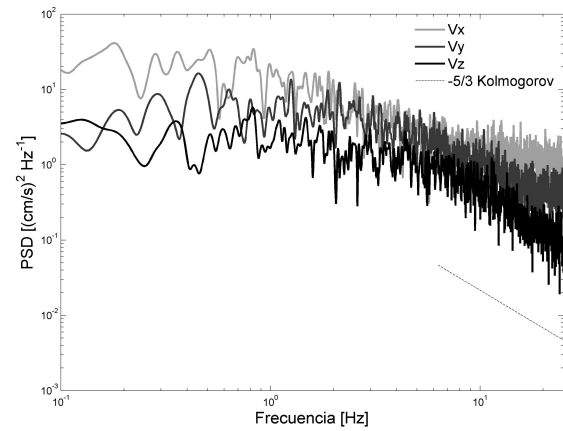
(a) Punto 1



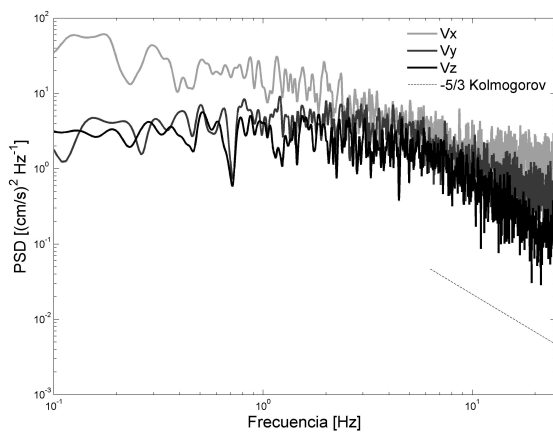
(b) Punto 2



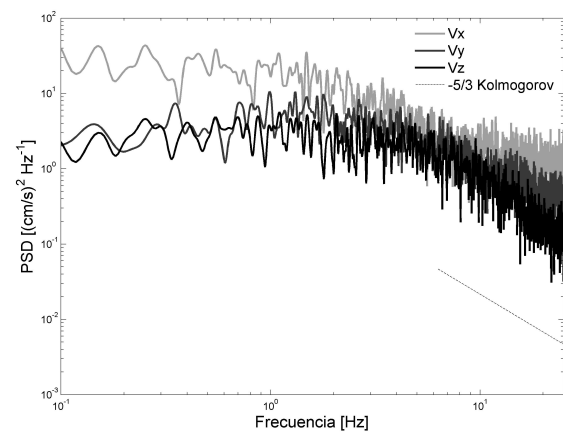
(c) Punto 3



(d) Punto 4

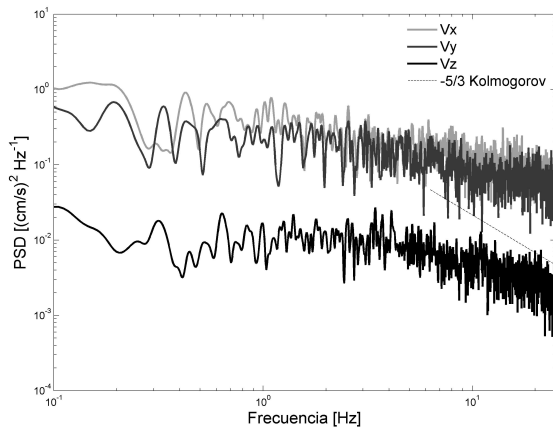


(e) Punto 5

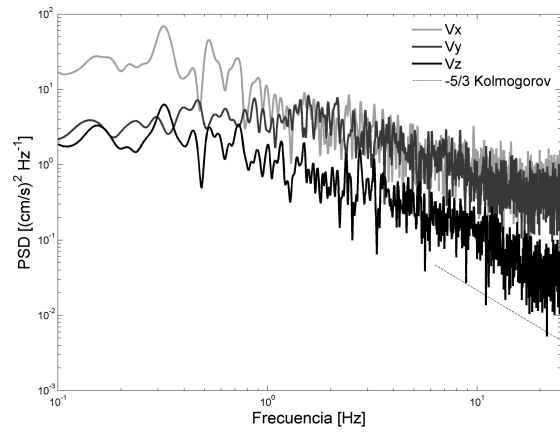


(f) Punto 6

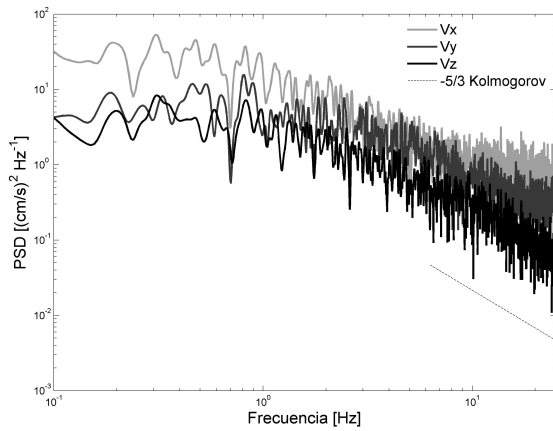
Figura E.1. Espectros del perfil 1 de 3, del experimento 1.



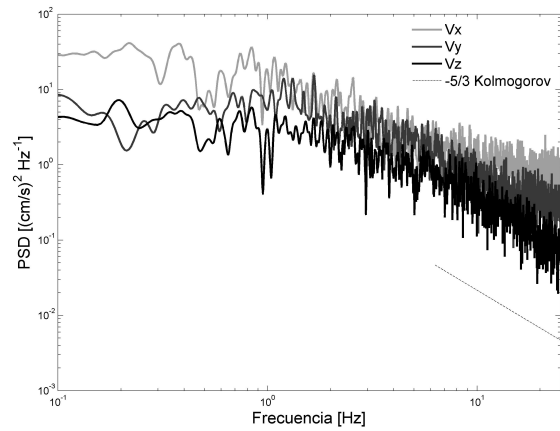
(a) Punto 1



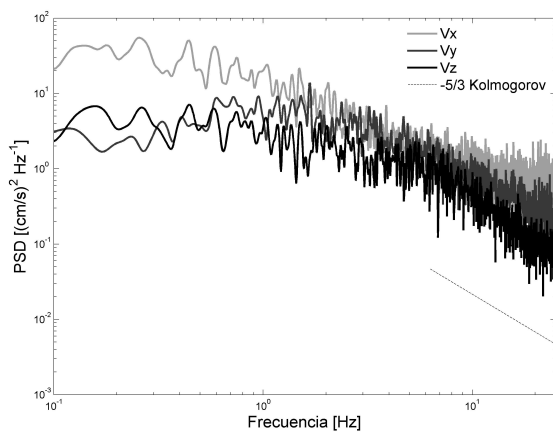
(b) Punto 2



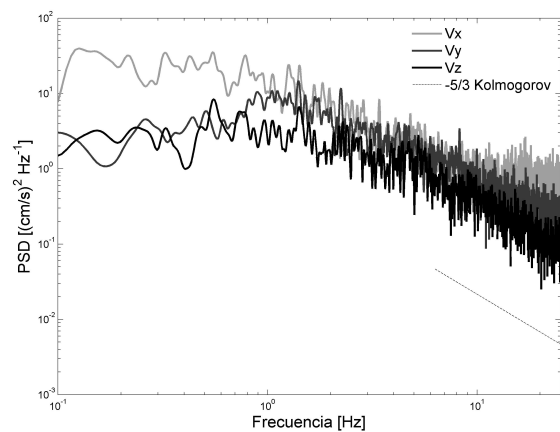
(c) Punto 3



(d) Punto 4

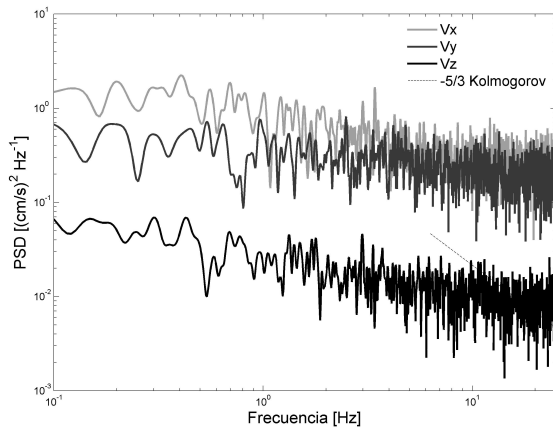


(e) Punto 5

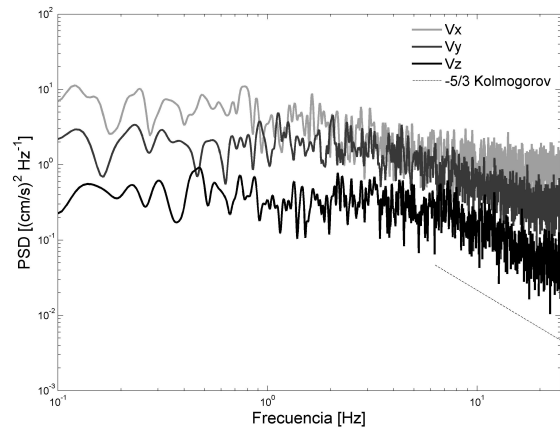


(f) Punto 6

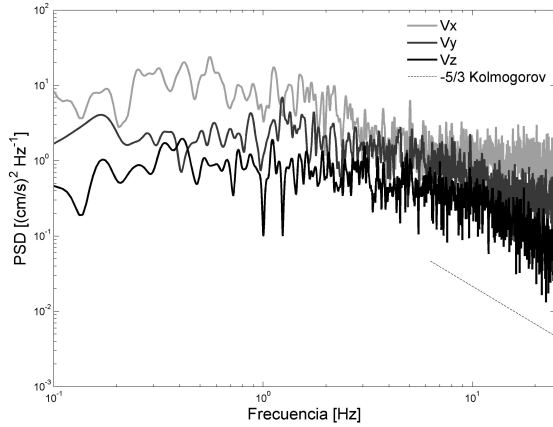
Figura E.2. Espectros del perfil 1 de 4, del experimento 2.



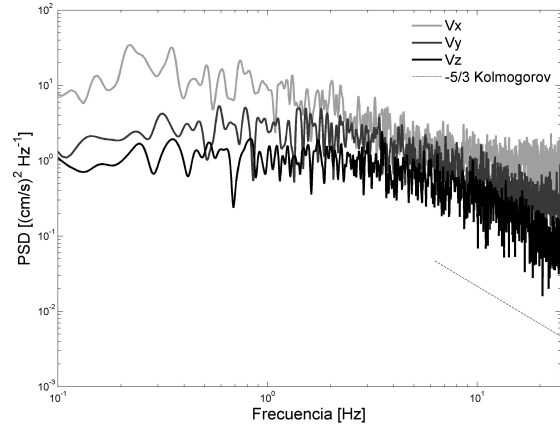
(a) Punto 1



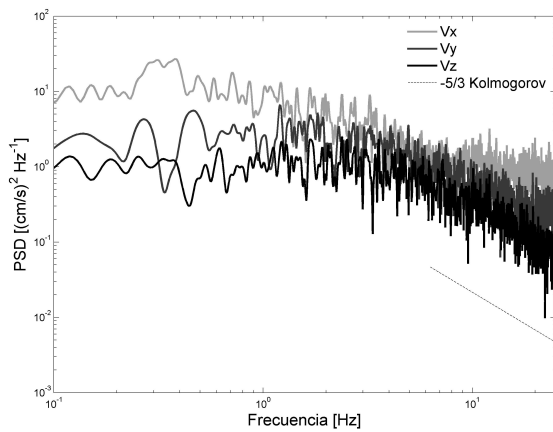
(b) Punto 2



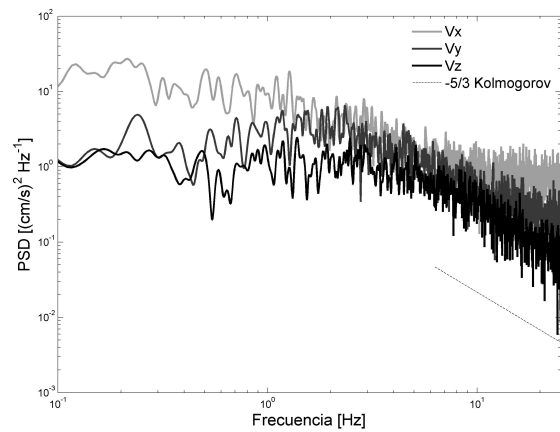
(c) Punto 3



(d) Punto 4

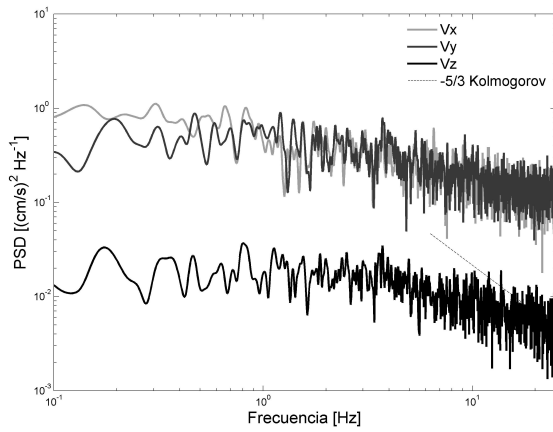


(e) Punto 5

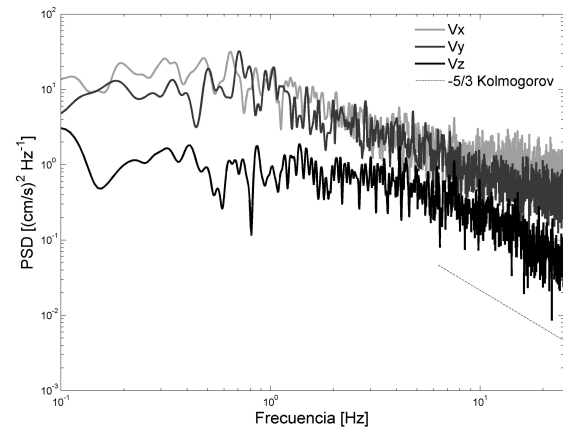


(f) Punto 6

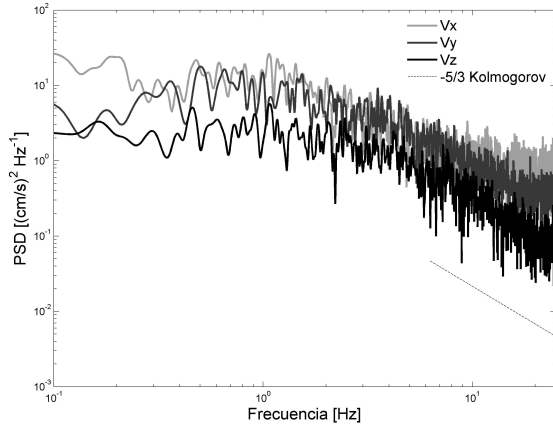
Figura E.3. Espectros del perfil 1 de 4, del experimento 3.



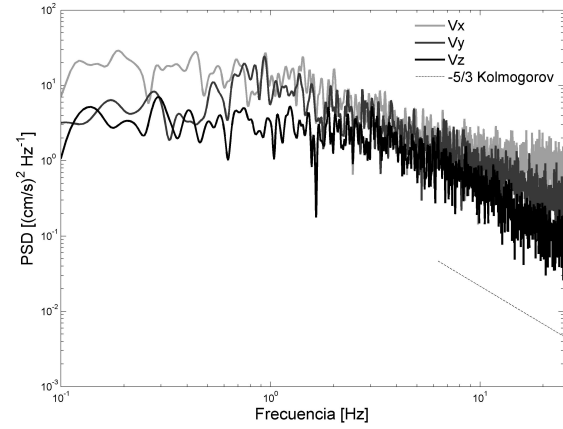
(a) Punto 1



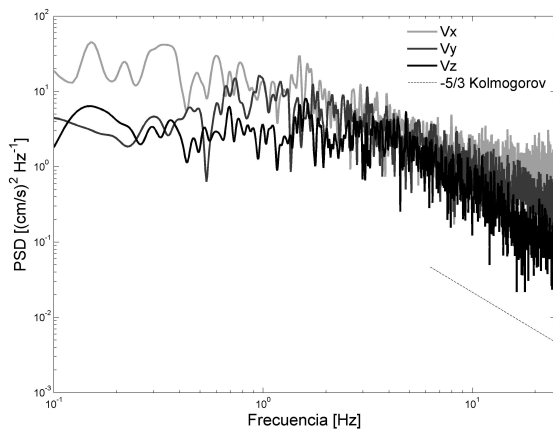
(b) Punto 2



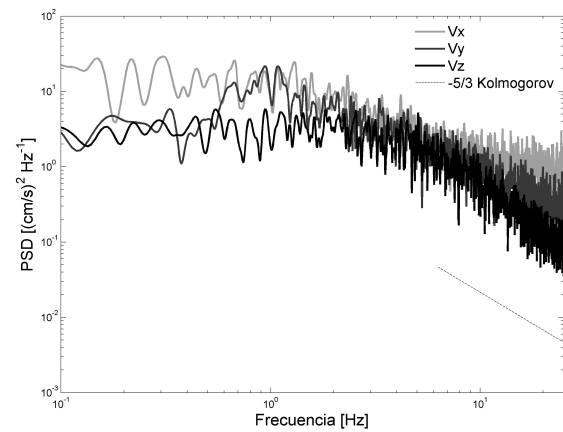
(c) Punto 3



(d) Punto 4

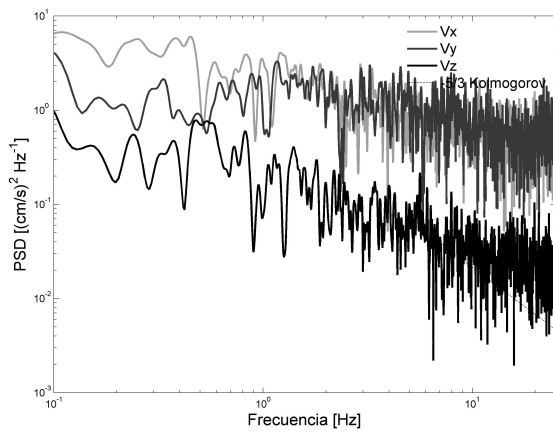


(e) Punto 5

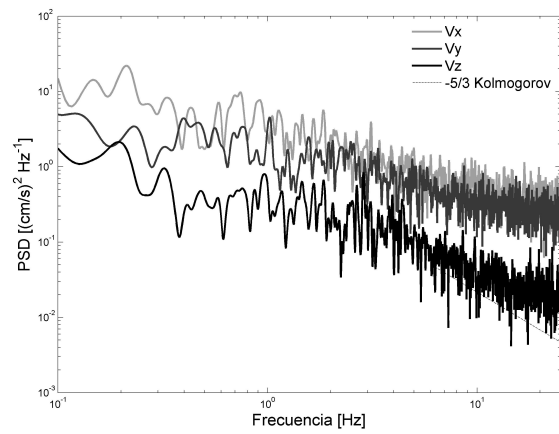


(f) Punto 6

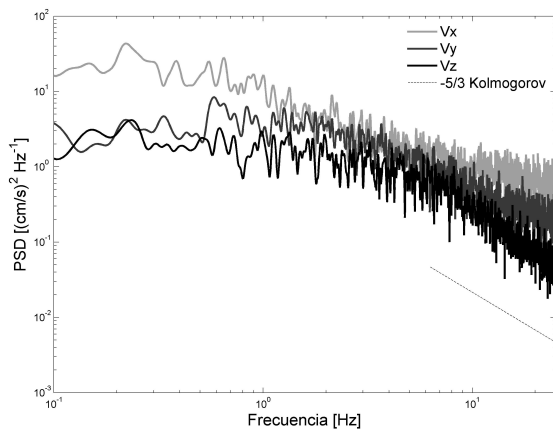
Figura E.4. Espectros del perfil 2 de 4, del experimento 4.



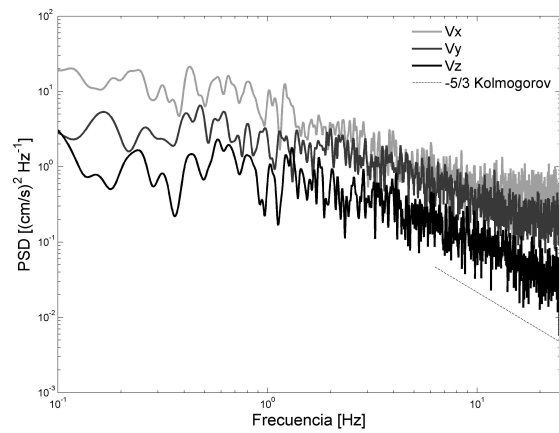
(a) Punto 1



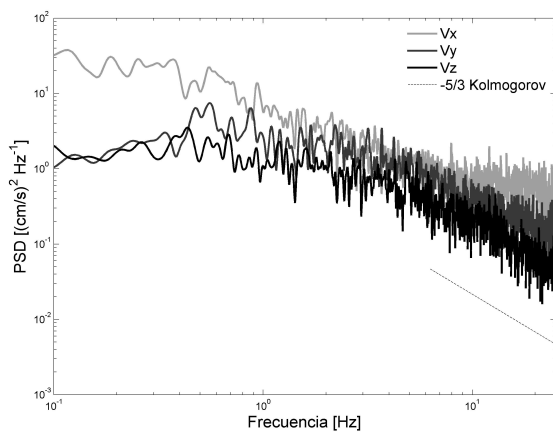
(b) Punto 2



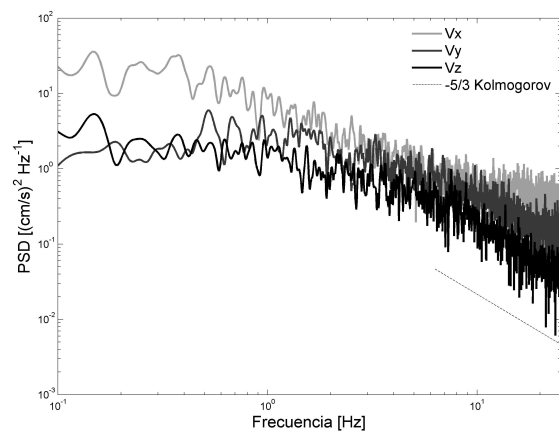
(c) Punto 3



(d) Punto 4

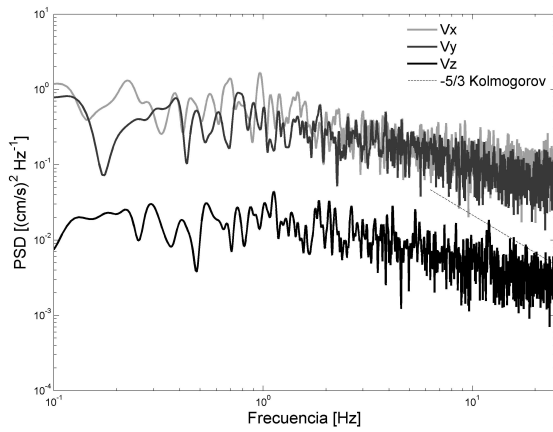


(e) Punto 5

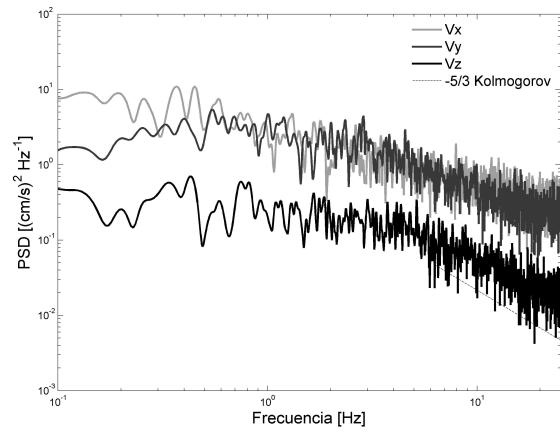


(f) Punto 6

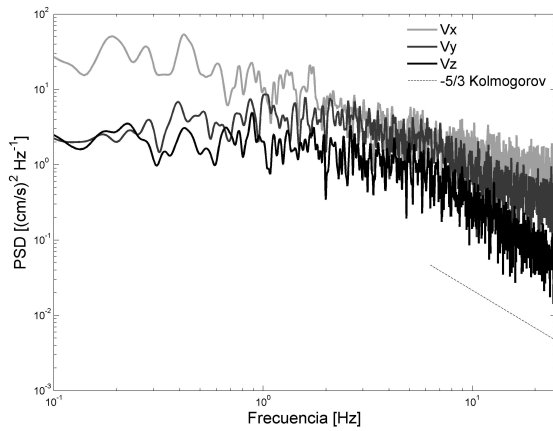
Figura E.5. Espectros del perfil 1 de 4, del experimento 5.



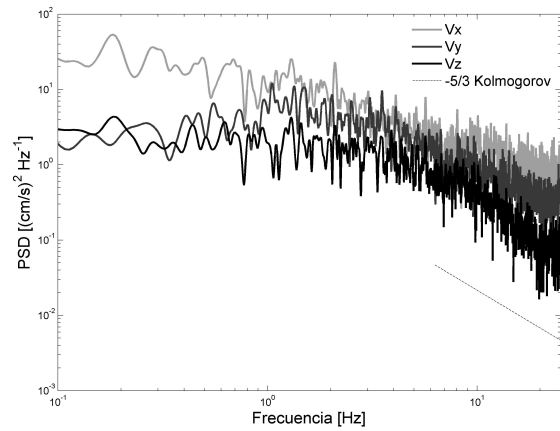
(a) Punto 1



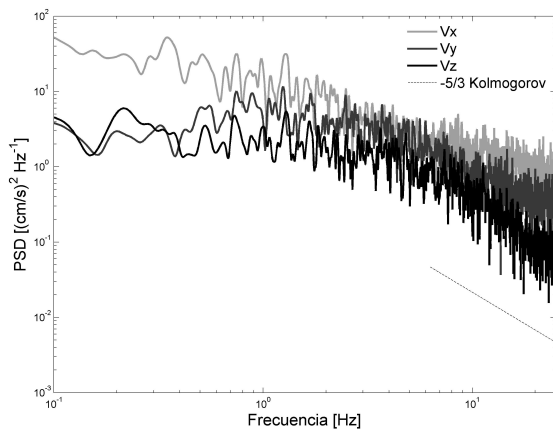
(b) Punto 2



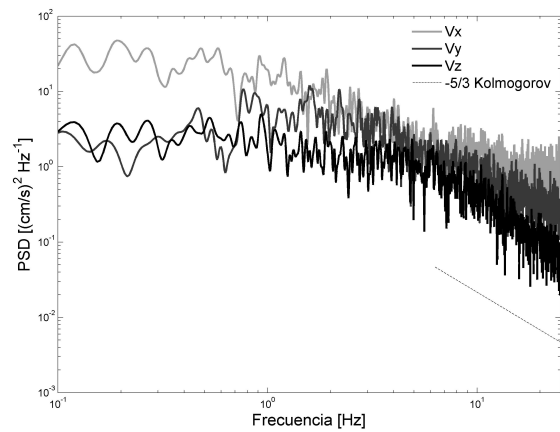
(c) Punto 3



(d) Punto 4



(e) Punto 5



(f) Punto 6

Figura E.6. Espectros del perfil 1 de 4, del experimento 6.