



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE Y
TRANSFERENCIA DE MASA EN LA CAPA LIMITE BENTICA DE ESTUARIO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JORGE ANDRES MUÑOZ QUIÑONES

**PROFESOR GUÍA:
YARKO NIÑO CAMPOS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS
INGRID HILLMER KIEKEBUSCH**

**SANTIAGO DE CHILE
MAYO 2007**

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	7
1.1 OBJETIVOS	8
1.2 METODOLOGÍA.....	9
CAPITULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES	11
2.1 DEFINICIONES BÁSICAS DE MAGNITUDES ESTADÍSTICAS	12
CAPITULO 3 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL	16
3.1 INTRODUCCIÓN	16
3.2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL E INSTRUMENTACIÓN.....	16
3.2.1 <i>Descripción de la instalación experimental</i>	16
3.2.2 <i>Descripción de la instrumentación</i>	23
3.2.3 <i>Calibración de instrumentos</i>	29
3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	37
3.3.1 <i>Preparativos para la realización de las experiencias</i>	37
3.3.2 <i>Experiencias en el modelo</i>	39
3.3.3 <i>Procedimientos de adquisición de datos.</i>	40
CAPITULO 4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
4.1 INTRODUCCIÓN	42
4.2 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS Y DISPOSITIVOS	42
4.3 ESTACIONALIDAD DE LAS VARIABLES	42
4.4 ANÁLISIS REGISTRO DE OLEAJE.....	46
4.5 ANÁLISIS REGISTRO DE VELOCIDAD.....	47
4.5.1 <i>Perfil de Velocidad Media, Máxima y Mínima</i>	49
4.5.2 <i>Perfil de Energía Cinética Turbulenta</i>	57
4.5.3 <i>Análisis del Espectro de Energía</i>	62
4.5.4 <i>Correlación de Variables</i>	66
4.6 ANÁLISIS REGISTRO DE CONDUCTIVIDAD.....	71
4.6.1 <i>Perfiles de Concentración</i>	71
4.6.2 <i>Masa total incorporada a la columna de agua y flujo másico</i>	72
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE EXPERIENCIAS	74
5.1 INTRODUCCIÓN.....	74
5.2 PERFILES DE VELOCIDAD MEDIA.....	74
5.3 PERFILES DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA.....	76
5.4 PERFILES DE CONCENTRACIÓN	78
5.5 PERFILES DE FLUJO MÁSIKO	80

5.6 COEFICIENTE DE INTERCAMBIO MASA, k_L	84
CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
6.1 CONCLUSIONES.....	89
6.2 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS POSTERIORES	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92
ANEXO 1	94
ANEXO 2.....	101
ANEXO 3.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

TABLAS CAPITULO 3

Tabla 3.1: Concentración de muestras para la calibración del conductivímetro.....	30
Tabla 3.2: Distribución espacial de las mediciones.....	38
Tabla 3.3: Tabla de experimentaciones a realizar.....	39

TABLAS CAPITULO 4

Tabla 4.1: Determinación de la velocidad de corte	50
Tabla 4.2: Valores de parámetros hidrodinámicos	51
Tabla 4.3: Valores de parámetros hidrodinámicos	53
Tabla 4.4: Experiencias a realizar para el análisis del Espectro de Energía.	62
Tabla 4.5: Experiencias a realizar, análisis de Autocorrelación de las Velocidades.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURAS CAPITULO 3

Figura 3.1: Perfil Longitudinal del modelo físico.....	19
Figura 3.2: Plano en planta modelo físico	20
Figura 3.3: (Izquierda) Vista Frontal del Generador de oleaje. (Derecha) Vista Lateral del Generador de oleaje y controlador.....	21
Figura 3.4: Vista en planta de la distribución de orificios para la incorporación de solución salina.	22
Figura 3.5: Estanque de solución salina	23
Figura 3.6: Detalle del Volumen de Control del ADV	24
Figura 3.7: Sensor de Temperatura y Conductividad	25

Figura 3.8: (Izquierda) Vista frontal del panel de control, (Derecha) Vista posterior del panel de control de los sensores de Temperatura y Conductividad.	25
Figura 3.9: Sensor Dinámico de altura y Amplificador de voltaje	26
Figura 3.10: Interfaz Labview 7 adquisición y visualización de datos.	27
Figura 3.11: Interfaz Labview 7 controlador generador oleaje.....	28
Figura 3.12: Interfaz Labview 7 controlador soporte vertical.	28
Figura 3.13: Calibración Sensor Conductividad, rango [0 – 5%].....	31
Figura 3.14: Calibración Sensor Conductividad, rango [0 – 1%].....	31
Figura 3.15: Calibración Sensor de Temperatura	32
Figura 3.16: Calibración Sensor de Presión.	33
Figura 3.17: Calibración de Vertedero Triangular.....	35
Figura 3.18: Calibración Generador de Oleaje.	36
Figura 3.19: Límite de operación del generador de oleaje.....	37
Figura 3.20: Vista lateral de la ubicación de los perfiles.....	40

FIGURAS CAPITULO 4

Figura 4.1: Estacionalidad del promedio de las velocidades, Experiencia 2.	43
Figura 4.2: Estacionalidad de la desviación estándar de la Velocidad, Experiencia 2	44
Figura 4.3: Estacionalidad de la desviación estándar de la señal de conductividad, Experiencia 4.	45
Figura 4.4: Espectro de energía de altura de oleaje, Experiencia 3	47
Figura 4.5: Señal de Velocidad en los 3 ejes, Experiencia 2.	48
Figura 4.6: Ajuste al perfil de velocidades.	50
Figura 4.7: Coeficiente x para estimar la resistencia hidráulica en lechos hidrodinámicamente en transición lisa- rugosa. (Apunte curso Hidráulica Fluvial y Transporte de sedimentos).	52
Figura 4.8: Perfil de Velocidad, Experiencia 6.....	54
Figura 4.9: Perfil de Velocidad Media Máxima y Mínima, Experiencia 2.....	55
Figura 4.10: Perfil de Velocidad, Experiencia 6.....	56
Figura 4.11: Esquema de la ola analizada. (Guzmán 2006).	56
Figura 4.12: Perfil de Energía Cinética Turbulenta, experiencia sin oleaje.....	58
Figura 4.13: Fluctuación de la señal de velocidad, Experiencia 2.....	59
Figura 4.14: Perfil de Energía Cinética Turbulenta, Experiencia 3.	60
Figura 4.15: Perfil de Energía Cinética del Oleaje, Experiencia 3.	61
Figura 4.16: Espectro de Energía de Velocidades, Experiencia 5 con oleaje.....	62
Figura 4.17: Espectro de Energía de Velocidades, Experiencia 6 con oleaje.....	64
Figura 4.18: Espectro de Energía de Velocidades, Experiencia 4 en h = 0.5 cm.	65
Figura 4.19: Autocorrelación de las Velocidades, Experiencia 4 sin oleaje.....	67
Figura 4.20: Autocorrelación de las Velocidades, Experiencia 3 con oleaje.....	68
Figura 4. 21: Correlación cruzada de las variables, Experiencia 1.....	69
Figura 4.22: Correlación cruzada de las variables, Experiencia 3 con oleaje.....	70

Figura 4.23: Perfiles de Concentración, Experiencia 2.	72
Figura 4.24: Perfil de masa incorporada, Experiencia 2.	73

FIGURAS CAPITULO 5

Figura 5.1: Perfiles de Velocidad Media.....	75
Figura 5.2: Perfiles de Velocidad Media Adimensionalizado.....	75
Figura 5.3: Energía Cinética Turbulenta adimensionalizada, Experiencias 1,2 y 3.	76
Figura 5.4: Energía Cinética Turbulenta adimensionalizada. Experiencias 4,5 y 6.	77
Figura 5.5: Perfiles de concentración Experiencia 1.	78
Figura 5.6: Perfiles de concentración Experiencia 2, con oleaje.	79
Figura 5.7: Perfiles de concentración Experiencia 3, con oleaje.	80
Figura 5.8: Perfiles de Flujo Másico, Experiencias con caudal 1 l/s.....	81
Figura 5.9: Perfiles de Flujo Másico, Experiencias con caudal 2.5 l/s.....	82
Figura 5.10: Distribución de velocidades en oleaje.....	83
Figura 5.11: Señal de altura de ola y concentración de sal.....	84
Figura 5.12: Número de Sherwood y Número de Reynolds.....	88

FIGURAS ANEXOS

Figura A.1: Perfil de Velocidad Experiencia 1.....	95
Figura A.2: Perfil de Velocidad Experiencia 2.....	96
Figura A.3: Perfil de Velocidad Experiencia 3.....	97
Figura A.4: Perfil de Velocidad Experiencia 4.....	98
Figura A.5: Perfil de Velocidad Experiencia 5.....	99
Figura A.6: Perfil de Velocidad Experiencia 5.....	100
Figura A.7: Perfiles de Concentración Experiencia 1.....	102
Figura A.8: Perfiles de Concentración Experiencia 2.....	103
Figura A.9: Perfiles de Concentración Experiencia 3.....	104
Figura A.10: Perfiles de Concentración Experiencia 4.....	105
Figura A.11: Perfiles de Concentración Experiencia 5.....	106
Figura A.12: Perfiles de Concentración Experiencia 6.....	107
Figura A.13 Circuito Electrónico descriptivo del controlador.....	111
Figura A.14 circuito electrónico controlador soporte vertical.....	112
Figura A.15: Interfaz controlador soporte vertical en Labview 7.....	113
Figura A.16: Diagrama de bloques interfaz en Labview 7.....	113

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE Y TRANSFERENCIA DE MASA EN LA CAPA LIMITE BÉNTICA DE ESTUARIO

Se realizó una investigación en el tema de la Hidrodinámica de sistemas acuáticos ambientales, específicamente, acerca de los procesos de flujo y transporte en la capa límite béntica de estuarios afectados por oleaje. Este estudio se enmarca dentro del proyecto FONDECYT “*Turbulencia y Transporte en la capa límite béntica de Lagos y Estuarios, Estudio de Terreno y Modelación*”. Los experimentos fueron realizados en un canal abierto de 12 m de largo y 0.3 m de ancho, con un lecho de sedimentos de arena uniforme de 0.5 mm. Se instaló un generador de oleaje en el extremo de aguas abajo. Sus frecuencias de oscilación fueron controladas mediante una computadora. En un tramo central del canal, de 0.5 m de largo, el lecho fue aislado y saturado con un trazador, el cual fue inyectado a través de agujeros ubicados en el fondo. Además se utilizó una esponja como difusor, la cual permite obtener una concentración uniforme y homogénea del trazador en el lecho de sedimentos. Se utilizó una solución salina de concentración baja como trazador, para poder detectarlo en el flujo con la ayuda de un sensor de conductividad. La cota del estanque principal que contiene la solución salina se mantuvo constante e igual al nivel medio de la superficie libre del canal, para así no crear un flujo artificial del trazador hacia la columna del agua. Se utilizó un sensor eléctrico para registrar la altura del flujo y el período de onda. Un sensor de velocidad tipo ADV y un sensor de conductividad, fueron utilizados para medir la estructura de la turbulencia en el flujo y la concentración de sal en la columna del agua, a lo largo de varios perfiles situados en la línea central del canal, en la región donde el trazador fue inyectado al lecho de sedimentos.

Se realizaron 3 tipos de experiencias para 2 caudales distintos: una experiencia solo con flujo gravitacional y otras 2 con oleaje de períodos distintos. Se integraron los perfiles de concentración del trazador a lo largo del volumen de control, para determinar el intercambio de masa entre la columna de agua y los sedimentos.

Se utilizó un modelo lineal de intercambio de masa, considerando la diferencia entre las concentraciones de sal en los sedimentos y la columna del agua, para así determinar un valor del coeficiente total del intercambio. Se adimensionalizó el coeficiente de intercambio mediante el número de Sherwood y se graficó en función del número de Reynolds del flujo. Los resultados obtenidos demuestran que existe un aumento del número de Sherwood a medida que aumenta el número de Reynolds, es decir, la turbulencia generada por el flujo provoca aumento en la transferencia de masa. Esto último es consecuente con los resultados obtenidos en experiencias similares de transferencia de oxígeno disuelto. Además, se concluyó que el efecto de agitación por oleaje aumenta el valor del coeficiente total de intercambio y por ende del número de Sherwood, para un mismo número de Reynolds. El efecto de las olas modifica la estructura del flujo y la turbulencia, aumentando los gradientes de velocidades, la energía cinética turbulenta y la componente vertical de la velocidad, lo que provoca el aumento del intercambio de masa entre la columna de agua y los sedimentos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi profesor guía, Yarko Niño, por su buena voluntad y disposición a ayudarme cada vez que lo necesité. A los profesores Aldo Tamburrino e Ingrid Hillmer por su ayuda y comentarios, sin los cuales el resultado final de este estudio no hubiese sido el mismo.

A Manuel, Don Juan, Boris, Robin y Arturo quiero agradecerles el afecto y amistad que me brindaron durante todo el tiempo que pasé en el laboratorio, por su gran compañía en los días de trabajo, por su indudable apoyo técnico. A toda la gente del laboratorio de Calidad de Aguas en especial a Viviana Lorca y a Jorge Castillo, del laboratorio de Fluidos, por su buena voluntad.

Quiero aprovechar de agradecer a Jessica y Mónica por mantener siempre un buen ambiente en el departamento con su alegría y entusiasmo.

A los que hicieron que esta etapa de mi vida fuese el recuerdo más inolvidable, a todos mis amigos. Un agradecimiento especial a mis compañeros de trabajo, Cristián, César y Niko por su gran compañía y amistad, y a todos los memoristas con los cuales pude compartir muy buenos momentos.

A Jorge y Sonia, mis padres, por su constante motivación y preocupación en mis estudios.

Y finalmente quiero agradecer a la persona que me entregó su apoyo constante, su comprensión, su amor y cariño, y lo más importante, su enorme paciencia, Johanna.

Muchas Gracias a todos

Jorge M. ,Mayo 2007

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

Debido al intenso crecimiento económico que ha presentado nuestro país en las últimas décadas, sus sistemas acuáticos han mostrado un aumento en los niveles de contaminación. Por tal razón se hacen necesarios estudios e investigaciones para poder cuantificar los impactos sobre el medio ambiente acuático que provocan actividades humanas y así poder desarrollar métodos de protección ambiental.

En la actualidad hemos aceptado que los cuerpos y cursos de agua son receptores naturales de desechos generados por la actividad humana, y gracias a la aplicación de normas de calidad de aguas, podemos asegurar una dilución eficiente y así reducir los niveles de contaminación.

Sin embargo, existen cuerpos de agua que son capaces de acumular ciertos contaminantes, los cuales tienden a concentrarse en los sedimentos que constituyen el lecho. Estos pueden transferirse a la columna de agua mediante mecanismos que no son del todo conocidos, particularmente cuando en un sistema interactúan corrientes y oleaje. El conocimiento y comprensión de los procesos de transferencia, mezcla o dilución y transporte en sistemas acuáticos, es imprescindible para lograr un adecuado modelamiento del sistema y así progresar en la predicción y reducción de los impactos de la actividad humana sobre el medio ambiente.

La hidrodinámica de la desembocadura de ríos y estuarios posee ciertas características que la diferencian notablemente de la existente en otros cuerpos de agua. La interacción que se produce entre el caudal proveniente del río y el oleaje, el efecto de las mareas y las corrientes marinas en la zona de la desembocadura, además de la estratificación de la columna de agua generada por la intrusión salina, son factores relevantes a la hora de describir el comportamiento de estos sistemas, entregándole un grado de complejidad mayor a su hidrodinámica que la que se observa en los ríos.

La calidad del agua de los sistemas acuáticos está condicionada por los procesos de transporte y transferencia de contaminantes, la estructura vertical de la turbulencia y por el transporte de sedimento en suspensión. La primera, por ser la principal responsable de la transferencia hacia la columna de agua de materias tóxicas contenidas en los sedimentos del lecho y de la mezcla de

sustancias disueltas y en suspensión en la columna de agua, tales como salinidad, concentración de sedimento, materia orgánica, tema que será analizado en profundidad en el presente estudio

La capa límite béntica constituye aquella región de la columna de agua y el sedimento del lecho que es afectada directamente en la distribución de sus propiedades y procesos, por la presencia de la interfaz agua-sedimento. Esta zona es de suma importancia para la biogeoquímica y física de océanos, zonas costeras, estuarios, lagos e incluso ríos. Además es en esta zona donde ocurre la mayor disipación de energía generada por olas, vientos y turbulencia. También existe un intenso intercambio de masa (solutos y materias orgánicas) entre la columna de agua y el lecho provocado por transportes difusivos o turbulentos.

Este estudio se enmarca dentro del proyecto FONDECYT “*Turbulencia y Transporte en la capa límite béntica de Lagos y Estuarios, Estudio de Terreno y Modelación*”, y por ende esta investigación, en particular, estudiará en forma experimental el proceso de transporte y transferencia de masa en la capa límite béntica en estuarios afectados por oleaje. Esta investigación se llevará a cabo en un modelo diseñado para estos motivos, el cual presenta las condiciones necesarias para reproducir en forma cualitativa los efectos hidrodinámicos de los sistemas antes mencionados.

1.1 OBJETIVOS

General:

Realizar una investigación en el tema de los procesos de transporte y transferencia de solutos en la capa límite béntica de estuarios afectados por el oleaje, y de este modo hacer un aporte a estudios ambientales que requieran de herramientas más sofisticadas para entender la hidrodinámica de estuarios y la dinámica de la capa límite béntica en estos sistemas.

Específicos:

Realizar un estudio experimental acerca de la transferencia de solutos desde el lecho hacia la columna de agua en un canal experimental en el cual pueden interactuar corrientes y oleajes.

Habilitar la instalación experimental y calibrar los instrumentos que se utilizarán para la realización de las experiencias definidas en la metodología.

Implementar una interfaz computacional que permita la adquisición de los datos entregados por los sensores, además de regular las frecuencias del oleaje e inducir un espectro unidireccional al cuerpo de agua.

Diseñar y construir un controlador de posicionamiento vertical electrónico, como una forma de optimizar el trabajo e incorporar nuevas metodologías.

Realizar mediciones de concentración de solución salina transportada a una columna de agua, además de medición de velocidad, turbulencia y variación de la superficie libre por efecto del oleaje

Determinar un coeficiente de transporte de masa y realizar una comparación cualitativa y cuantitativa entre estudios previos.

1.2 METODOLOGÍA

Se realizó un estudio experimental en un canal con lecho móvil de sedimentos, en el que el flujo es influenciado por oleaje, simulando las condiciones imperantes en sistemas costeros y estuarios. Dada la cantidad y complejidad de los fenómenos hidrodinámicos que se manifiestan en los estuarios, es imposible dar cuenta de todos ellos en el modelo físico. Por ejemplo, estos sistemas presentan salinidad variable o cuñas salinas, lo que no será considerado en este estudio. Sin embargo, el tema de flujo con presencia de cuña salina está actualmente siendo estudiado en otras memorias en ejecución (Godoy, 2006, Muñoz, 2005). Además se pueden mencionar otros fenómenos que no fueron incorporados en el modelo experimental como es el efecto de Coriolis, mareas, batimetría o corrientes locales.

Para simular un flujo con oleaje, se dispuso de un canal provisto de un generador de oleaje. El lecho fue cubierto con una arena fina de tamaño uniforme de 0.5 milímetros. En una zona de observación, aislada el resto del lecho, los sedimentos fueron saturados con una solución salina al 3.5%. En condiciones de flujo permanente, se midió la concentración del trazador en la columna

de agua, de donde se determinó la transferencia de masa desde el lecho. La medición de la concentración del trazador se hizo utilizando un sensor de conductividad el cual permite determinar la cantidad de sales presentes en la columna. Simultáneamente se midieron las características de la turbulencia del flujo al interior del canal, de modo de correlacionar ambas variables. Para la medición de la velocidad del flujo se utilizó un sensor micro ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) el cual toma registros de las tres componentes de la velocidad local instantánea del flujo, para luego poder calcular la intensidad de la turbulencia mediante la determinación de las fluctuaciones de dicha señal.

CAPITULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

La capa límite béntica (CLB) es aquella región de los sistemas acuáticos superficiales que es directamente influenciada por la presencia de la interfaz entre el lecho y la columna de agua sobre él. Su estructura resulta fundamentalmente de la interacción entre el flujo medio asociado a corrientes, el flujo oscilatorio asociado a mareas, ondas superficiales e internas y la condición de no resbalamiento (o fricción) que induce una velocidad nula en el lecho y altos gradientes de velocidad en su vecindad. Dichos gradientes inducen inestabilidad del flujo y la producción de energía cinética turbulenta. Del mismo modo en que la presencia del lecho induce la transferencia y transporte vertical de momentum en la CLB, las condiciones de borde impuestas por la interfaz agua-sedimento inducen el intercambio y transporte de calor, sedimento, solutos entre el lecho y la columna de agua.

La transferencia de solutos a través de la CLB influye sobre un número de procesos biogeoquímicos de importancia en sistemas acuáticos naturales, como por ejemplo, consumo de oxígeno, transporte de nutrientes, descarga de contaminantes desde los sedimentos (Boudreau and Jørgensen, 2001).

Dependiendo del medio acuático, la CLB puede quedar restringida a una región cercana al lecho (océano, zonas costeras, lagos) o extenderse prácticamente a toda la columna de agua (ríos y estuarios de baja profundidad) (Boudreau and Jørgensen, 2001).

La turbulencia es la principal responsable del transporte vertical en la CLB, siendo en general, mucho más eficiente que los procesos de transporte por difusión molecular (Dade et al., 2001). Adyacente al lecho, la región donde el transporte vertical de momentum es dominado por efectos viscosos sobre los turbulentos, es denominada subcapa viscosa.

La teoría clásica del transporte de solutos sobre una Interfaz Agua Sedimento hidrodinámicamente lisa se basa en la presencia de una capa límite difusiva (CLD) adyacente al lecho y de pequeño espesor, donde el transporte de masa es dominado por procesos de difusión molecular. Dentro de la CLD ocurre una variación lineal de la concentración de solutos, de modo que es posible deducir modelos de transferencia basados simplemente en la diferencia de concentraciones entre el lecho y la zona turbulenta inmediatamente sobre la CLD y un coeficiente de transferencia de masa, el que depende del coeficiente de difusión molecular de masa y el

espesor de la CLD (Dade, 1993; Boudreau, 2001). La razón entre el espesor de subcapa viscosa δ_v y la capa límite de difusión δ_d es proporcional al número de Schmidt, $Sc = \nu/D$

$$\frac{\delta_v}{\delta_d} \propto Sc^{1/3} \quad (2.1)$$

Existe una gran variedad de modelos empíricos para el coeficiente de transferencia de masa en la literatura ingenieril, siendo probablemente, los más recientes los propuestos por Hondzo (1998) y Steinberger and Hondzo (1999) para la transferencia de oxígeno, y que expresan dicho coeficiente en función del número de Schmidt y la velocidad de corte del flujo. Un análisis alternativo, relacionando la demanda de oxígeno de los sedimentos con la velocidad media de la corriente en la CLB ha sido propuesto por Mackenthun and Stefan (1998). No obstante, la estructura de la turbulencia en la CLB y particularmente dentro de la subcapa viscosa es bastante más compleja que lo que supone el modelo clásico descrito en el párrafo anterior.

2.1 DEFINICIONES BÁSICAS DE MAGNITUDES ESTADÍSTICAS

Definir y cuantificar la turbulencia no resulta sencillo, aunque existen varias definiciones acerca de la turbulencia, todas coinciden en varios rasgos fundamentales. Heinze (1975), define el movimiento turbulento de un fluido como “condición irregular del flujo en la cual las magnitudes muestran una variación aleatoria en el tiempo y el espacio, de forma que los distintos valores medios estadísticos pueden ser discernidos”. Es por este motivo que se hace necesario realizar cálculos estadísticos como herramienta para el análisis de la información contenida en los fenómenos turbulentos. A continuación se presentan las magnitudes estadísticas más utilizadas en este estudio.

2.1.1 Promedio

Este estadístico corresponde al momento de primer orden. Cabe señalar que este análisis corresponde al caso en que se disponen resultados discretos de la variable, puesto que, en términos prácticos, todo instrumento de laboratorio solo ofrece este tipo de información.

Considerando que una serie de datos de la variable V puede contener N valores V_i , $i = 1, \dots, N$ se define el promedio de V como:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (2.2)$$

Suponiendo que este conjunto de valores corresponde a una serie temporal de la variable V , es conveniente también definir, para el estudio de la turbulencia, el promedio acumulado:

$$\overline{V(t)} = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} V_i \quad (2.3)$$

Si el proceso que genera las mediciones de V es estacionario, entonces $\bar{V} = \overline{V(t)}$ a partir de cierto valor de t suficientemente grande.

Evidentemente, el tiempo durante el cual se realicen las mediciones de la variable V debe asegurar esta condición para el análisis que se desarrolla en el presente trabajo.

2.1.2 Fluctuación

Se define la fluctuación de la variable V en un cierto intervalo de tiempo $[t_1, t_2]$ como:

$$V'(t) = V(t) - \overline{V(t)} \quad (2.4)$$

Y por lo tanto, el promedio de las fluctuaciones es igual a cero.

2.1.3 Desviación Estándar

La desviación estándar o también llamado valor RMS (root mean square) indica la escala de variación de $V(t)$ con respecto al promedio.

$$V_{RMS}(t) = \sqrt{\overline{V'(t)^2}} \quad (2.5)$$

Si el proceso es estacionario, V_{RMS} converge para intervalos de tiempo suficientemente grande.

2.1.4 Energía cinética turbulenta

Se define la Energía cinética turbulenta por unidad de masa, K , como una medida de la energía asociada a las fluctuaciones:

$$K = \frac{1}{2} (u_{RMS}^2 + v_{RMS}^2 + w_{RMS}^2) \quad (2.6)$$

Donde:

$$u_{RMS} = \sqrt{\overline{(u')^2}}, v_{RMS} = \sqrt{\overline{(v')^2}}, w_{RMS} = \sqrt{\overline{(w')^2}} \quad (2.7)$$

2.1.5 Densidad espectral de energía

La densidad espectral de energía, es un concepto muy importante en el tratamiento estadístico de cualquier señal y en concreto, en el estudio de la turbulencia, ya que permite determinar que frecuencias son las que más aportan a la energía cinética turbulenta total.

Un parámetro útil de una señal $f(t)$ es la energía normalizada. Esta se define análogamente como la energía disipada por un voltaje $f(t)$ aplicado a través de una resistencia de 1 Ohm (B.P Lathi 1974).

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \quad (2.8)$$

El concepto de energía de una señal tiene significado solo si la integral es finita. Luego, si $F(\omega)$ es la transformada de Fourier de $f(t)$, se define la transformada inversa como.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \quad (2.9)$$

Reemplazando en 2.8:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \right] dt \quad (2.10)$$

Intercambiando el orden de integración

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{i\omega t} dt \right] d\omega \quad (2.11)$$

Luego el término entre paréntesis corresponde a la transformada de Fourier, es decir $F(-\omega)$

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot F(-\omega) d\omega \quad (2.12)$$

Finalmente, tomando la transformada inversa de Fourier, la expresión obtenida corresponde a la densidad espectral de energía, la cual puede ser graficada en función de la frecuencia de la señal.

$$E(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} |f(t) \cdot e^{-i\omega t}|^2 dt \quad (2.13)$$

Para facilitar los cálculos de los espectros de energía para cada serie de velocidades, se utilizará la función “períodogram” disponible e incorporada a la rutina de Matlab, la cual permite determinar la función de densidad espectral de energía en función de la frecuencia.

2.1.6 Correlación cruzada y auto correlación

En procesamiento de señales, la correlación cruzada (o a veces denominada "covarianza cruzada") es una medida de la similitud entre dos señales, frecuentemente usada para encontrar características relevantes en una señal desconocida por medio de la comparación con otra que sí se conoce. Otra herramienta matemática utilizada frecuentemente en el procesado de señales es la función de autocorrelación, la cual se define como la correlación cruzada de la señal consigo misma. La función de autocorrelación resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal como por ejemplo encontrar la periodicidad de una señal oculta bajo el ruido.

$$\text{Autocorrelacion } R(k) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}) \cdot (x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.14)$$

$$\text{Correlacion Cruzada } R(d) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}) \cdot (y_{i-d} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_{i-d} - \bar{y})^2}} \quad (2.15)$$

CAPITULO 3 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

El estudio experimental se realizó en un canal con lecho móvil de sedimentos de tamaño uniforme de 0.5 mm, en el que el flujo está influenciado por oleaje, simulando las condiciones imperantes de sistemas costeros y estuarios. Se analizó la variación de concentración desde los sedimentos hacia la columna de agua, transferencia producida por la turbulencia local. Esta instalación experimental está ubicada en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

Los experimentos fueron realizados en una instalación que consiste principalmente en un canal rectangular provisto de un generador de oleaje; un estanque con solución salina; 3 bombas, una para alimentar el canal con agua potable desde una sentina, otra para la recirculación de los sedimentos del lecho y una última para la recirculación de la solución salina. Se utilizaron sensores de presión, conductividad, temperatura, y velocidad para la obtención de las variables de interés. La implementación y puesta en marcha de esta instalación correspondió al Trabajo de Título de César Guzmán para optar al título de Ingeniero Civil (2006), por ende la explicación detallada de la instalación experimental, se basará en dicha referencia.

A continuación se presenta una descripción detallada de la instalación experimental e instrumentación.

3.2 Instalación experimental e Instrumentación

3.2.1 Descripción de la instalación experimental

La instalación experimental consiste en un canal de sección rectangular de 30 cm de ancho, 30 cm de alto y 11 m de longitud, de paredes de acrílico transparente. En el extremo de aguas arriba se encuentra una cámara de entrada que recibe el caudal entregado por una bomba la cual extrae agua desde una sentina de 34 m³.

A continuación se describe con mayor detalle algunos componentes de interés del sistema:

- **Bomba de Alimentación de Caudal**

La bomba que alimenta el canal es una ASEA mot 3, tiene una alimentación eléctrica trifásica (380V y 12A) y un consumo de 6KW. El caudal es regulado a través de una válvula que se encuentra en la salida de la bomba. El rango de caudales queda definido por la capacidad del canal entre 0 l/s (válvula completamente cerrada) y 5 l/s. El caudal es medido mediante un vertedero triangular que se ubica aguas abajo del canal.

- **Estanque de carga**

El estanque esta ubicado aguas arriba del canal. Recibe el agua proveniente de la sentina a través de la Tubería de Alimentación y la entrega al sistema. Su volumen permite regular el flujo que entra al canal, de manera que las variaciones de carga ocasionadas por la bomba no afecten el desempeño del modelo experimental.

A continuación, en las Figura 3.1 y Figura 3.2 se esquematiza el perfil longitudinal y la planta del modelo respectivamente

- **Soporte de Sensor de Velocidad y Conductivímetro Motorizado y controlador**

Debido al tipo de estudio se debió modificar los acostumbrados soportes de ADV manuales a uno de tipo electrónico. Este soporte posee un motor al cual se conectó el tornillo sin fin del soporte, encargado del movimiento vertical de éste. Este motor está comunicado a un controlador electrónico el cual permite manejar el movimiento vertical del ADV y del conductivímetro, con una precisión de 0.5 mm, a través de un computador, mediante una interfaz de Labview creada para este estudio. Para facilitar la visualización de la posición se instaló una cámara la cual permite el monitoreo desde el computador. En el Anexo 3 se encuentran los planos electrónicos de dicho controlador y los diagramas utilizados en Labview. El funcionamiento de este dispositivo electrónico es descrito con detalle en el mismo anexo antes mencionado. Básicamente el sistema corresponde a un control en lazo abierto el cual envía una señal análoga entre 0 y 5V, generada por la tarjeta de adquisición de datos.

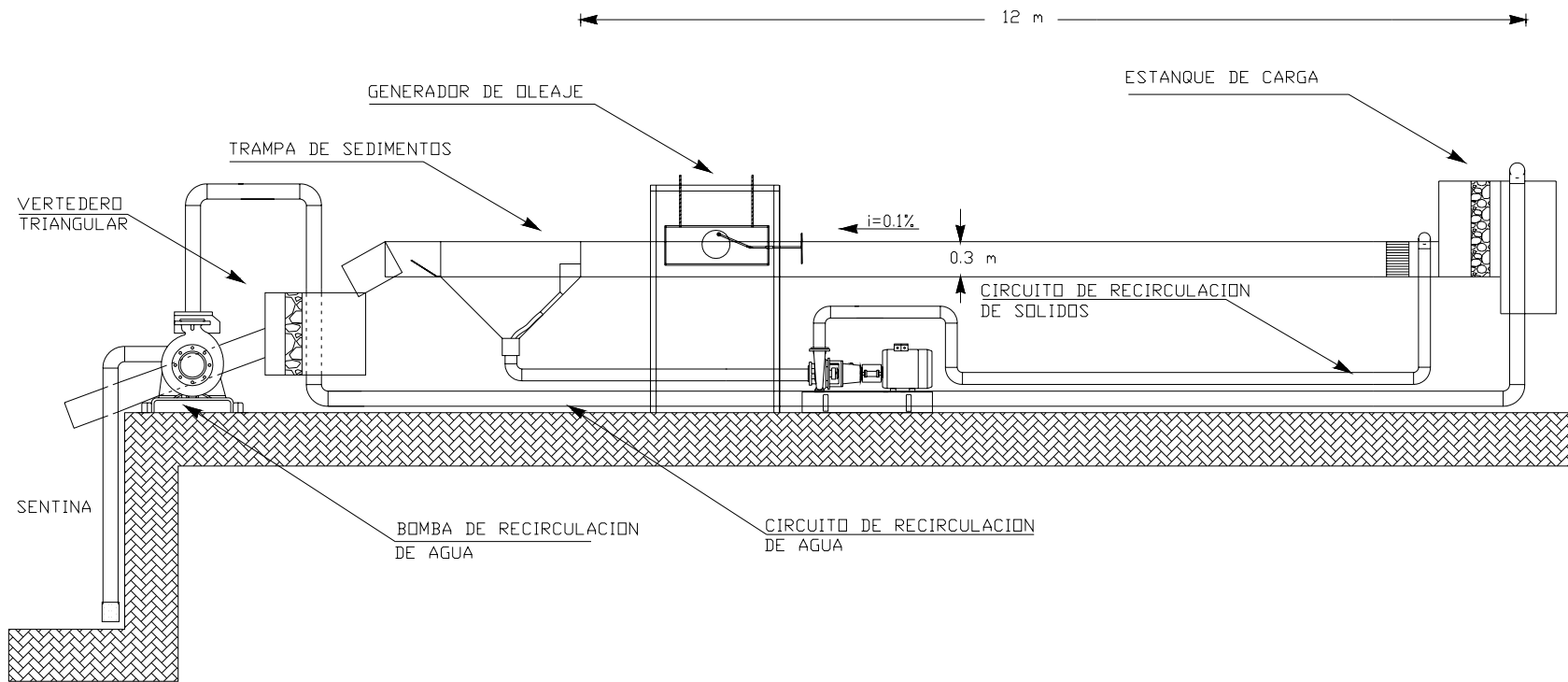


Figura 3.1: Perfil Longitudinal del modelo físico.

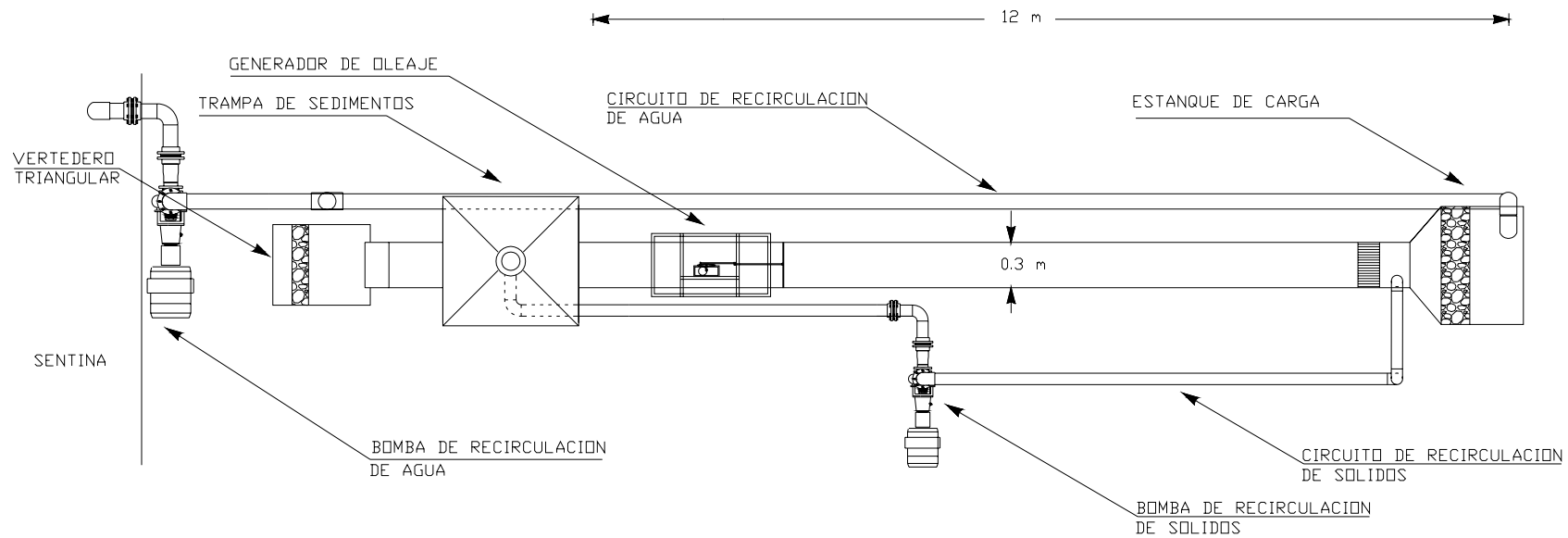


Figura 3.2: Plano en planta modelo físico

- Generador de Oleaje y controlador

Este equipo está compuesto de 2 sistemas, el primero correspondiente a un motor mecánico al que se conecta en su eje un disco que posee un pivote en donde se conectó una paleta cuadrada de acrílico. Esta paleta es el dispositivo que genera el oleaje mediante el movimiento de un volumen de agua hacia aguas arriba. La segunda componente es el controlador electrónico, diseñado para este estudio, el cual permite controlar el motor del generador de oleaje desde el computador mediante una interfaz de Labview o manualmente con un potenciómetro instalado en dicho dispositivo. A continuación en la Figura 3.3 se presentan imágenes del generador de oleaje.



Figura 3.3: (Izquierda) Vista Frontal del Generador de oleaje. (Derecha) Vista Lateral del Generador de oleaje y controlador

- Sistema de inyección de solución salina

A una distancia 4.5 m aguas abajo de la cámara de entrada se instaló un difusor el cual permite la incorporación de un trazador a los sedimentos del lecho, para medir la transferencia de masa hacia la columna de agua. Con este fin se utilizó una solución de agua salina con una concentración de 3.5% la que se inyectó en forma uniforme al lecho del canal mediante orificios ubicados en el fondo de éste. La distribución de estos orificios se puede apreciar en la Figura 3.4.

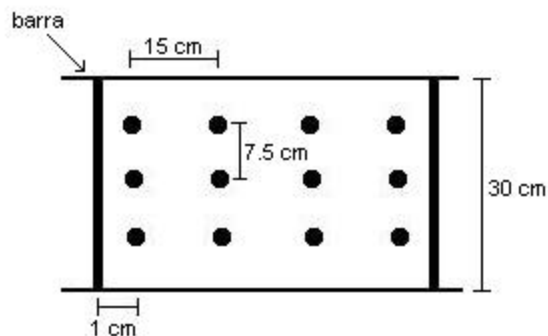


Figura 3.4: Vista en planta de la distribución de orificios para la incorporación de solución salina.

En la zona del lecho donde se incorporó el trazador se instalaron barreras aguas arriba y abajo de los orificios antes mencionados. Estas barreras impiden que exista flujo del trazador fuera de la zona de inyección y que la concentración de la solución salina en el lecho sea constante durante toda la experiencia, evitando así efectos impermanentes de la concentración en la columna de agua.

En la zona donde se inyectó el trazador se instaló una esponja de 20 mm de espesor, en el fondo del canal inmediatamente debajo del lecho de arena, la cual produce un aumento de la difusión horizontal y una disminución de la vertical, mejorando así las condiciones de homogeneidad de la concentración de la solución salina dentro de los sedimentos que componen el lecho.

Como se desea obtener valores de la concentración media de agua salina dentro del lecho, se instalaron 7 piezómetros a 2 cm del fondo los cuales permiten obtener una muestra de la concentración en cada perfil a medir.

- Estanque de solución Salina

En este estanque se acumula la mezcla de agua potable y sal que fue utilizada en todos los experimentos, la concentración de sal fue de 3.5% en todos los casos. Este estanque posee una bomba de recirculación que tiene como fin mantener la cota de la superficie libre dentro del estanque igual a la cota media dentro del canal, para esto se dispone de 2 válvulas las cuales permiten regular la entrada y salida de solución en recirculación, y además se tienen 2 piezómetros los cuales permiten comparar dichas alturas y corroborar que ambas cotas sean iguales. El principio que se busca mediante este sistema de recirculación es imponer

externamente un flujo vertical nulo en la zona de inyección, es decir, toda la solución incorporada al sistema es demandada por la difusión tanto turbulenta como molecular del flujo. Finalmente, el estanque posee una salida en la parte inferior, la que está conectada mediante una manguera hacia un difusor ubicado en la parte inferior del canal, el cual se conecta a los orificios antes mencionados (Figura 3.4).



Figura 3.5: Estanque de solución salina

3.2.2 Descripción de la instrumentación

3.2.2.1 Sensor de Velocidad, ADV

El sensor de velocidad es un MicroADV marca Sontek de frecuencia acústica de 16 Mhz. Además de obtener la velocidad en los tres ejes, permite conocer en tiempo real las relaciones entre las variables como la correlación entre las series de velocidades y el porcentaje de ruido existente en la señal. El funcionamiento del equipo, como su nombre lo indica (ADV significa Acoustic Doppler Velocimeter), está basado en el efecto Doppler. El transductor emisor (ver Figura 3.6) envía una señal de sonido de una frecuencia conocida a un volumen de control cilíndrico de fluido ubicada a 5 cm bajo el mismo transductor, esta señal es reflejada por

partículas sólidas suspendidas en el flujo y captada por los tres transductores receptores que están equiespaciados a 120° uno del otro. Luego, el cambio de frecuencia entre la señal emitida y la recibida es analizado, determinándose así la velocidad en el volumen de muestreo. Una de las ventajas del ADV es que no requiere de calibración previa.

Se observa en la Figura 3.6 un detalle del funcionamiento del ADV y del volumen de control que utiliza el dispositivo para realizar las mediciones correspondientes.

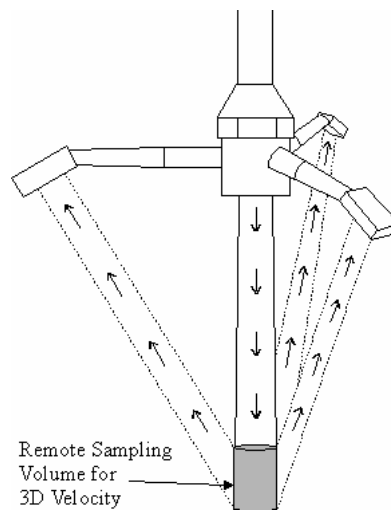
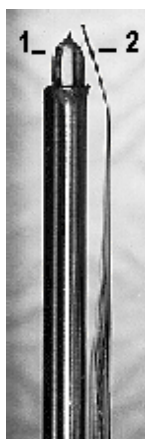


Figura 3.6: Detalle del Volumen de Control del ADV

3.2.2.2 Sensor de conductividad eléctrica y temperatura

Este equipo corresponde a un sensor de conductividad eléctrica y un sensor de temperatura de alta frecuencia Modelo 125, fabricado por Precision Measurement Engineering. Ambos sensores se encuentran conectados al panel de control el cual entrega datos de voltaje mediante una señal análoga en función de la conductividad eléctrica y temperatura entregada por los sensores. Dicho panel de control se conecta a la tarjeta de adquisición de datos la cual procesa las señales análogas convirtiéndolas en señales digitales las que son guardadas y posteriormente analizadas en un computador. Las señales generadas por el panel de control corresponden a voltajes entre 5 y -5 volts por cada canal (Conductividad y Temperatura).



(1) Sensor de Temperatura, (2) Sensor de Conductividad

Figura 3.7: Sensor de Temperatura y Conductividad

Este equipo fue accidentalmente dañado por lo que se tuvo que usar otro tipo de sensor de conductividad. Este nuevo equipo consta de un sensor que tiene una menor resolución y un volumen de control mayor al mencionado anteriormente. Debido a este cambio de instrumento se debió aumentar la concentración de sal en el estanque para así poder registrar las bajas concentraciones de la columna de agua.

3.2.2.3 Panel de Control del sensor de conductividad eléctrica y temperatura

Este panel contiene el control de encendido, y los controles de ganancia, G. Esta constante permite calibrar el rango en que el sensor podrá medir. Además, consta de 2 leds, los cuales indican posibles problemas en los sensores. En la parte posterior de este panel se encuentran 3 conectores, 2 de estos son de tipo BNC, los que corresponden a las salidas de las señales análogas de voltaje de conductividad y temperatura, que están conectadas a la tarjeta de adquisición de datos, y el otro conector de tipo serial, que corresponde a la conexión con los sensores (INPUT)



Figura 3.8: (Izquierda) Vista frontal del panel de control, (Derecha) Vista posterior del panel de control de los sensores de Temperatura y Conductividad.

3.2.2.4 Sensor de Presión

El sistema consiste en un circuito que consta de dos alambres, los cuales se sumergen en el agua. Se mide la conductividad eléctrica que hay entre ellas y se relaciona linealmente con la profundidad a la cual está sumergida y por ende, la altura del agua. Si bien este instrumento mide conductividad eléctrica como procedimiento para la determinación de la altura, la transformación lineal para esta conversión la realiza internamente el sistema de amplificación de señales incorporado, el cual entrega un voltaje de $\pm 10V$ hacia la tarjeta de adquisición de datos, relacionado con la altura de la ola, y no propiamente con la conductividad eléctrica. A continuación en la Figura 3.9 se presenta el sensor de presión y el amplificador de señal.



Figura 3.9: Sensor Dinámico de altura y Amplificador de voltaje

3.2.2.5 Tarjeta de adquisición de datos e Interfaz en Labview 7

Este dispositivo fue fabricado por Measurement Computing modelo 1208LS, el cual recibe señales análogas de voltajes y las transforma en digitales para ser registradas por un computador mediante un software creado para este estudio utilizando Labview 7. Este dispositivo fue utilizado para la adquisición y registro de los datos entregados por los siguientes dispositivos: sensor de conductividad, sensor de temperatura y sensor de altura (presión). Esta tarjeta permite

además enviar señales análogas de voltajes para así controlar los dispositivos de oleaje y posicionamiento de sensores desde el computador mediante un software creado en Labview 7. El ADV no puede ser conectado a esta tarjeta ya que este tiene otro protocolo de señales y posee su propia tarjeta y software de adquisición.

- Interfaz de Adquisición y Visualización de datos

Se ha diseñado para este estudio una interfaz con el software Labview 7 la cual permite la adquisición de los datos entregados por los sensores y permitir su visualización en tiempo. Este software permite además realizar mediciones automáticas de todas las variables antes mencionadas solo definiendo el tiempo de medición y la posición en la cual se desea medir un perfil. En la Figura 3.10 se presenta, a modo de ejemplo, una imagen de pantalla de la interfaz utilizada en este estudio.

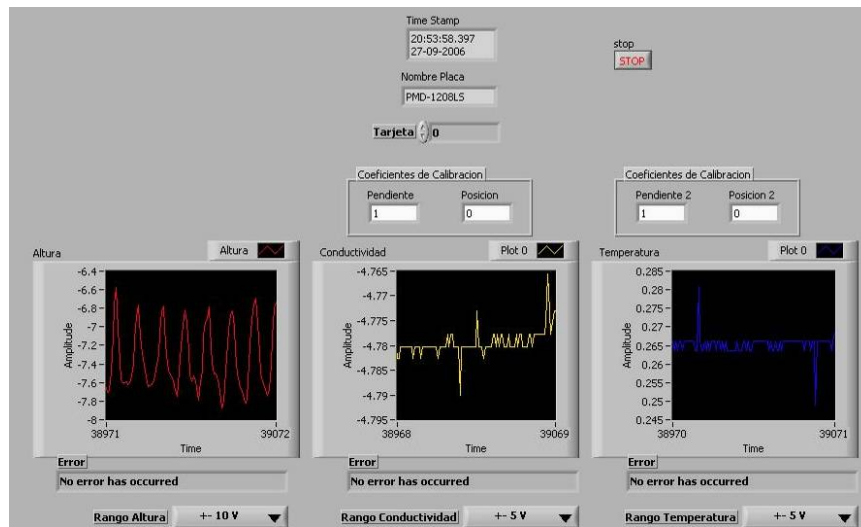


Figura 3.10: Interfaz Labview 7 adquisición y visualización de datos.

- Interfaz del Controlador de Oleaje

Debido a que se desea realizar mediciones para distintos períodos de oleaje, se ha diseñado una interfaz la cual permite controlar el generador de oleaje por medio del controlador electrónico. Esta interfaz permite ingresar el voltaje previamente calibrado para obtener el período de oleaje determinado. La Figura 3.11 muestra una imagen de pantalla de esta interfaz.

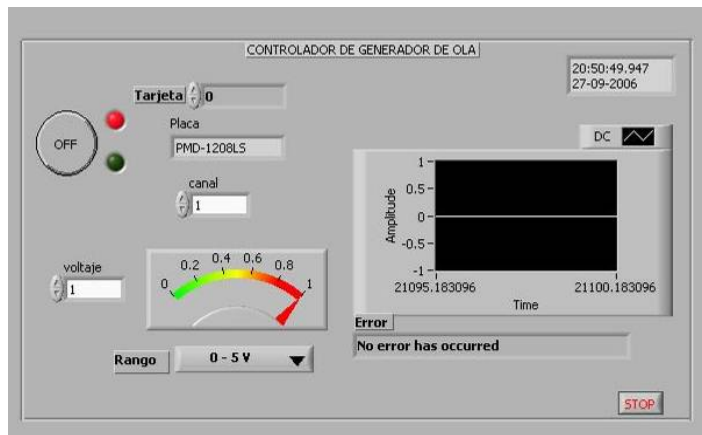


Figura 3.11: Interfaz Labview 7 controlador generador oleaje.

- **Interfaz del Controlador del Soporte del ADV y Conductivímetro**

Se ha creado una interfaz la cual permite controlar la posición vertical del ADV y conductivímetro. Este dispositivo fue diseñado para facilitar la toma de datos, disminuir el tiempo de las experiencias y aumentar la precisión de los datos adquiridos.

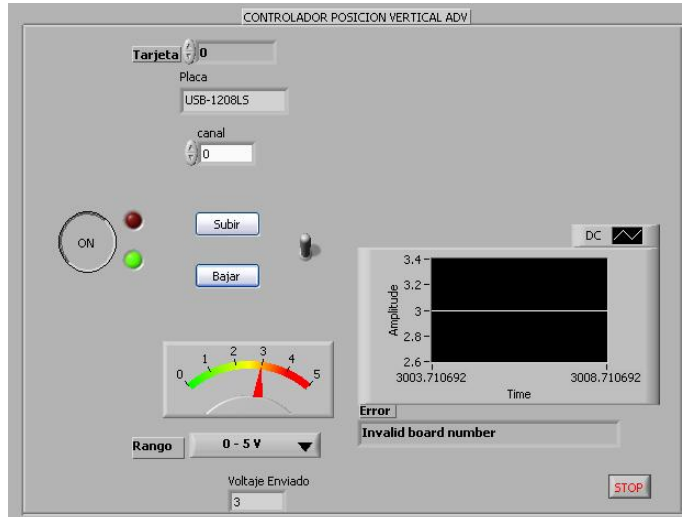


Figura 3.12: Interfaz Labview 7 controlador soporte vertical.

3.2.2.6 Aforador de Gasto Líquido.

El caudal de circulación de agua entre el canal y la sentina fue medido con un vertedero de pared triangular, que se ubica aguas abajo de la trampa de sedimentos. La calibración de este instrumento se encuentra en el punto 3.2.3.4 del presente capítulo.

3.2.3 Calibración de instrumentos

3.2.3.1 Calibración Sensor de Conductividad

Definición de Unidades

La cantidad de sal en un volumen de agua se puede definir de 2 formas, la primera de ella corresponde a una concentración porcentual (peso/peso o peso/volumen), y la segunda definición es “practical salinity scale” (PPS). Las unidades de concentración que se utilizó en este estudio son de mg/l o porcentaje de Salinidad (peso/volumen), las cuales se definen como:

$$\% \text{ Salinidad} = \frac{\text{gr Sal}}{100 \text{ ml de Solucion}} \quad (3.1)$$

Se utilizó esta unidad de concentración, ya que permite determinar de forma directa la cantidad de masa transportada en un volumen de control determinado.

Es importante mencionar que la temperatura modifica la resistencia eléctrica del agua y por lo tanto, indirectamente modifica la concentración de sales medidas por el conductivímetro, instrumento que será utilizado para la medición de la concentración de sal. Es por esto último que se hace necesario tomar registros simultáneos de temperatura y concentración.

Metodología de calibración

Para calibrar este instrumento se prepararon muestras con concentraciones conocidas, para esto se pesó una cantidad de sal previamente secada y se mezcló en un volumen de agua determinado. El

proceso de secado de la sal es fundamental para obtener una calibración con buena precisión, ya que el contenido de agua presente en la sal aumenta el peso de esta y por ende se obtiene una concentración errada.

En la Tabla 3.1 se presentan las concentraciones de las muestras utilizadas para la calibración del sensor de conductividad.

Dado que se quiere relacionar la salinidad de la mezcla con el voltaje entregado por el equipo (sensor-panel de control) se procederá a registrar los voltajes de mezclas conocidas. Es importante mencionar que las muestras fueron preparadas con agua potable y no con agua destilada, debido a que el canal y el estanque en condiciones normales funcionarán con este tipo de agua.

En la Figura 3.13 se presenta en forma gráfica los voltajes obtenidos para cada porcentaje de salinidad, en el rango 0 a 5%.

Tabla 3.1: Concentración de muestras para la calibración del conductímetro

Muestra	Salinidad	Concentración de Sal	Peso Sal
N°	[%]	[mg/l]	[g]
1	0.01	100	0.02
2	0.05	500	0.1
3	0.1	1000	0.2
4	0.2	2000	0.4
5	0.5	5000	1
6	0.8	8000	1.6
7	1	10000	2
8	1.5	15000	3
9	1.7	17000	3.4
10	2	20000	4
11	2.2	22000	4.4
12	2.5	25000	5
13	3	30000	6
14	5	50000	10

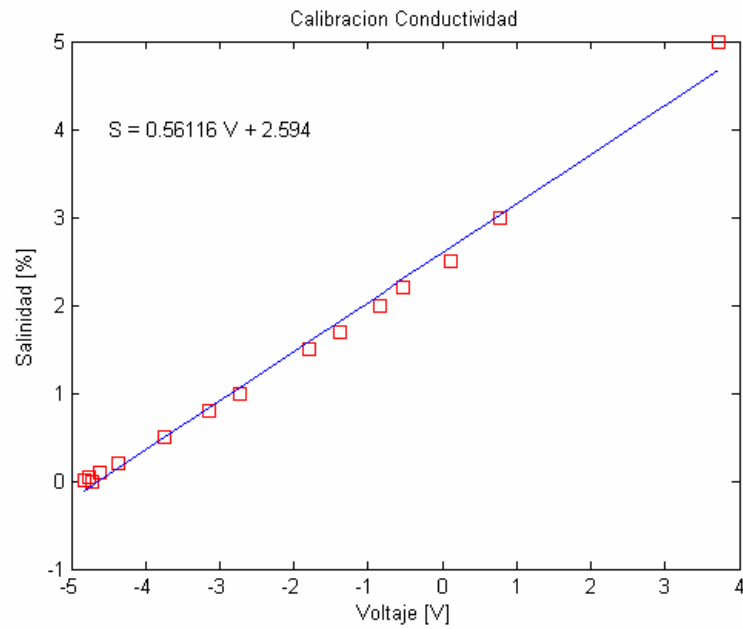


Figura 3.13: Calibración Sensor Conductividad, rango [0 – 5%]

En la Figura 3.14 se presentan los voltajes obtenidos para cada concentración de sal, pero esta vez, en el rango 0 – 1%, los cuales son representativos de la concentración que se tendrá dentro del canal.

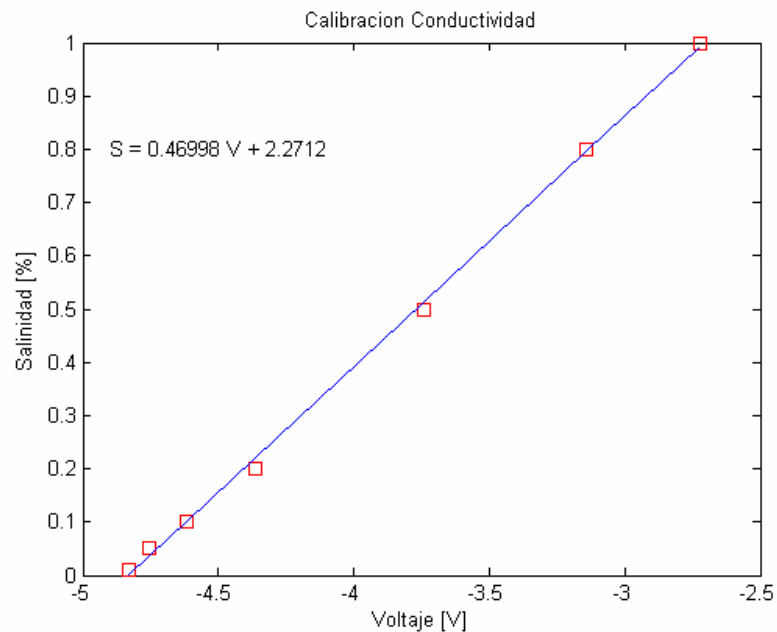


Figura 3.14: Calibración Sensor Conductividad, rango [0 – 1%]

Finalmente, la calibración adoptada para este sensor es:

$$S = 0.46998 \cdot V + 2.2712 \quad (3.2)$$

Con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.999$

Esta ecuación relaciona de forma directa el voltaje entregado por el panel del sensor de conductividad con el porcentaje de salinidad.

3.2.3.2 Calibración Sensor de Temperatura

Para la calibración de este sensor, se calentó un volumen de agua sin sal de 3 litros hasta una temperatura de 50°C, luego se fue incorporando muestras de agua fría (15°C aprox.) y registrando la temperatura de la mezcla entregada por un termómetro de laboratorio y el voltaje entregado por el sensor. La relación entre estas variables se encuentra graficado en la Figura 3.15.

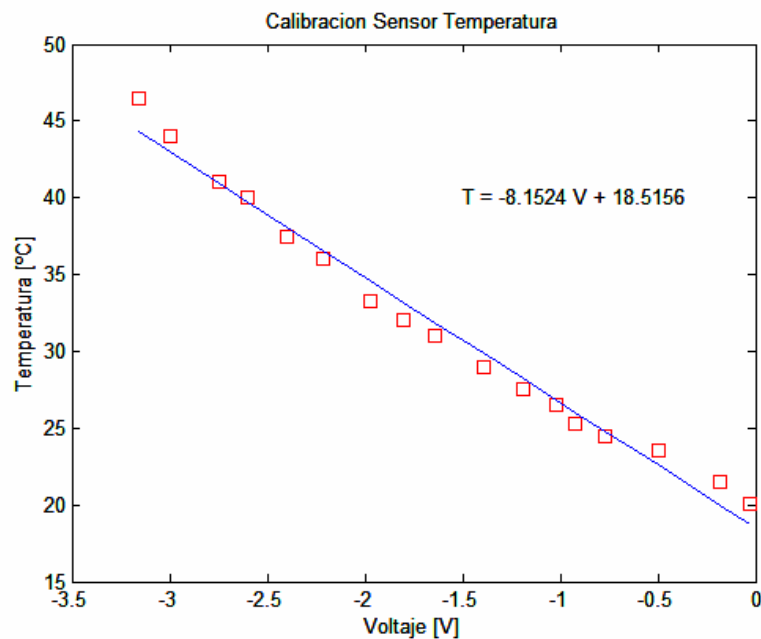


Figura 3.15: Calibración Sensor de Temperatura

La calibración adoptada para el sensor de temperatura es:

$$T = -8.1524 \cdot V + 18.5156 \quad (3.3)$$

Con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.983$

Esta ecuación relaciona en forma lineal el voltaje entregado por el sensor con la temperatura del agua (se recuerda que el voltaje entregado por el sensor es $\pm 5V$).

3.2.3.3 Calibración Sensor de presión

Según los antecedentes relacionados con el uso de este equipo (Guzmán 2006) y las experiencias previas, se ha demostrado que este equipo presenta variaciones en las mediciones (voltajes) dependiendo de la temperatura y la salinidad del medio. Es decir, para una misma altura de la columna de agua, el voltaje registrado por este equipo para una temperatura dada, es mayor cuando la temperatura del agua aumenta. Además se pudo demostrar que las variaciones son mayores con presencia de sal en el agua. Estas variaciones tienen una explicación técnica la cual se basa simplemente en que el agua es un material conductor y su conductividad eléctrica aumenta con la presencia de sales. En la Figura 3.16 se presenta de modo gráfico los resultados obtenidos de esta experiencia.

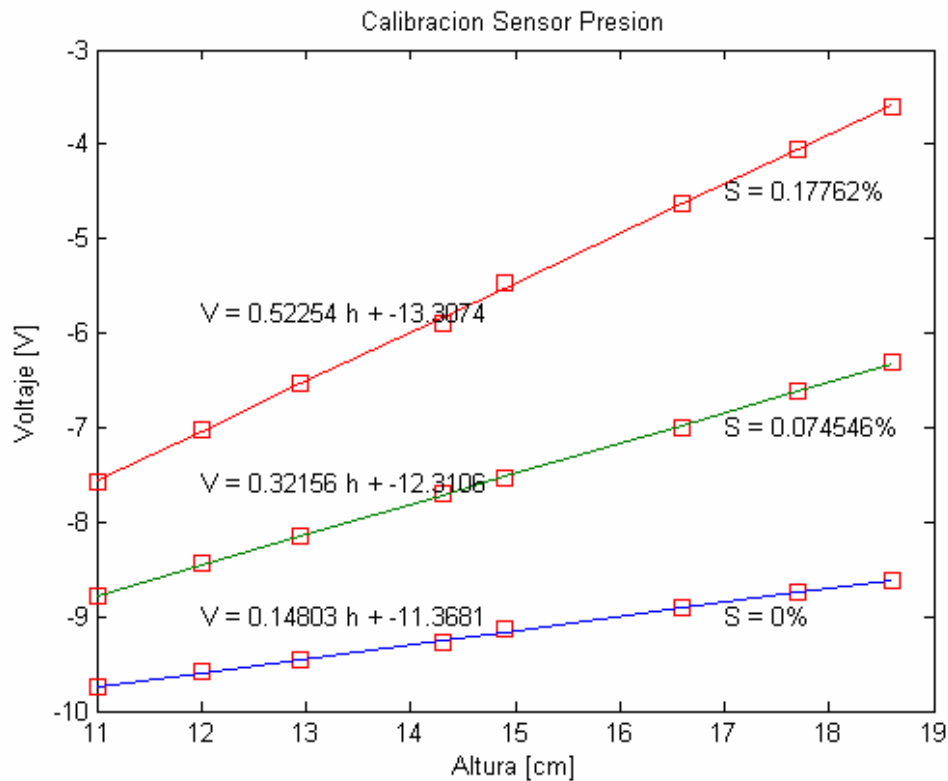


Figura 3.16: Calibración Sensor de Presión.

Como se puede apreciar en el gráfico anterior, a medida que la salinidad del agua aumenta, el voltaje entregado por este instrumento es mayor para una misma altura de agua. Esta alza de voltaje se debe simplemente a que la conductividad del agua aumenta con la presencia de sal. Es

por esta razón que la señal de altura de ola será corregida en función de la conductividad y temperatura.

3.2.3.4 Calibración Vertedero Triangular

De acuerdo con Francisco J. Domínguez [1950], la presión que hay dentro de la vena de líquido que vierte sobre la hoja de un vertedero triangular es la atmosférica exterior, luego aplicando el teorema de Bernoulli entre la sección donde se mide la carga y la sección de máximo peralte del filete inferior (posterior al vertedero) se determina (considerando que en el plano de carga $z = 0$) la velocidad, como $u = \sqrt{2 \cdot g \cdot z}$. Esta velocidad es común a todos los elementos a una altura z , de esta manera, el área elemental es $\mu_1 \cdot b \cdot dz$, donde b es el ancho de la sección que depende del ángulo (α) del vertedero, $b = 2 \cdot (h - z) \cdot \operatorname{tg} \alpha$, y μ_1 es un factor de contracción del flujo. El diferencial de caudal es entonces: $dq = 2 \cdot \mu_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot z} \cdot (h - z)$. Luego integrando y ordenando términos se obtiene:

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot h^2 \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.4)$$

Que se puede escribir como:

$$Q = C \cdot h^{5/2} \quad (3.5)$$

Donde C es un coeficiente que para el ángulo del vertedero del modelo, $\alpha = 40^\circ$, corresponde a 0.58.

Sin embargo para efectos de este estudio, y por mayor simplicidad, se consideró una ley potencial de caudal que tiene la siguiente forma:

$$Q = a \cdot H^b \quad (3.6)$$

. Donde H es la carga sobre el vertedero, que se registró con limnómetro. Los coeficientes a y b se calibraron ajustando una curva a mediciones de caudal hechas registrando la altura crítica sobre una grada. Los resultados obtenidos se presentan en escala LogLog en la Figura 3.17:

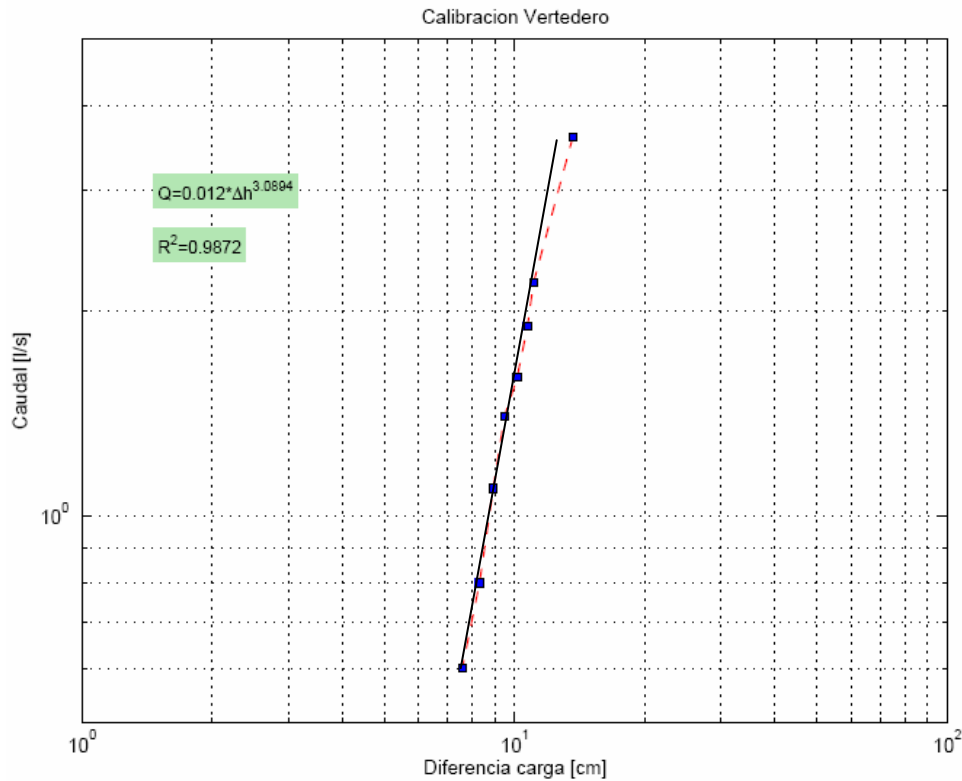


Figura 3.17: Calibración de Vertedero Triangular.

De esta manera la relación que liga el caudal (l/s) con la carga sobre el vertedero, H (cm), es (Guzmán 2006):

$$Q = 0.012 \cdot H^{3.0894} \quad (3.7)$$

Con un coeficiente de correlación R^2 de 0.9872.

3.2.3.5 Calibración del Generador de Oleaje

El funcionamiento de este equipo consiste en ingresar un valor de voltaje entre 0V (apagado) y 1V, en la interfaz en Labview 7 antes descrita. Este valor condiciona la velocidad de giro del motor y por ende la frecuencia de la paleta. Se debe considerar, además, que el período de la paleta presenta variaciones para condiciones de flujo en contra y para diferentes alturas de agua. Estos efectos se deben a que se generan fuerzas contrarias al movimiento de la paleta con magnitudes distintas para cada caso, y por ende la frecuencia de funcionamiento se ve afectada.

En la Figura 3.18 se presenta la calibración obtenida de Guzmán (2006), en la cual se puede apreciar la ecuación que define el período para un voltaje dado.

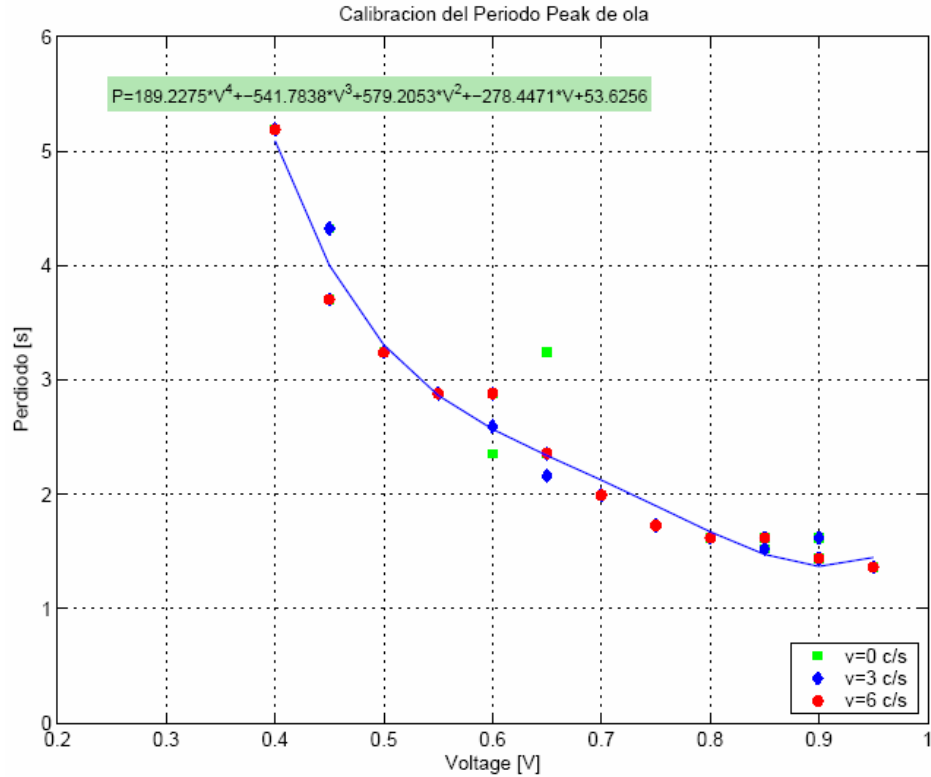


Figura 3.18: Calibración Generador de Oleaje.

La ecuación que define el período ajustado por Guzmán (2006) es:

$$P = 189.2275 \cdot V^4 - 541.7838 \cdot V^3 + 579.2053 \cdot V^2 - 278.4471 \cdot V + 53.6256 \quad (3.8)$$

En la Figura 3.19 se muestra un gráfico propuesto por Guzmán (2006) en el cual se define la zona y límite de operación del generador de oleaje. Esta zona se definió para determinar y limitar las experiencias realizadas en el canal.

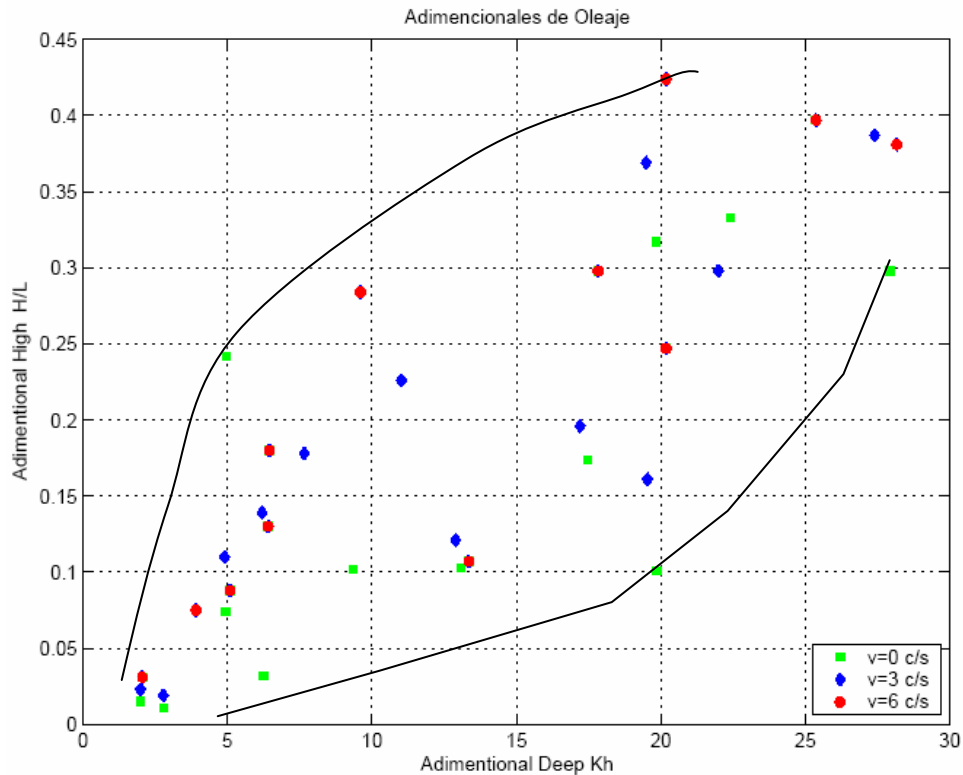


Figura 3.19: Límite de operación del generador de oleaje.

3.3 Procedimiento Experimental

3.3.1 Preparativos para la realización de las experiencias

Debido a la gran cantidad de instrumentos y elementos utilizados en esta estación de trabajo se debió preparar un procedimiento en el cual se detalló los pasos a seguir para la obtención de la información requerida.

Como medida de seguridad se debió verificar el buen estado de los instrumentos tanto mecánicos como electrónicos. Los sensores debieron ser verificados si están midiendo con coherencia, los equipos mecánicos como el generador de oleaje y el motor del soporte del ADV debieron ser probados con anterioridad utilizando las interfaces antes mencionadas.

En cada experiencia se obtuvieron 7 perfiles ubicados uno después de otro equiespaciados a 7.5 cm (ver Figura 3.20). Cada perfil fue construido por mediciones realizadas en 11 puntos en la vertical, los cuales se encuentran espaciados a 2.5 mm para los puntos cercanos al lecho (< 1cm) ,

5 mm para puntos ubicados en el primer centímetro y 1cm para los puntos ubicados sobre los 4 cm. En la Tabla 3.2 se presentan la ubicación de los puntos de cada perfil.

Tabla 3.2: Distribución espacial de las mediciones.

Puntos del Perfil N°	Altura desde el fondo [cm]
1	0.5
2	0.75
3	1.0
4	1.25
5	1.5
6	2.0
7	2.5
8	3.5
9	4.5
10	5.5
11	6.5

Las experiencias tienen una duración promedio de 4 horas, por ende se debe asegurar el suministro de agua potable y para esto las bombas correspondientes deben estar operativas y la sentina con el agua suficiente. Además se debe asegurar el suministro de agua salina durante la experiencia, para esto se debe verificar que exista mezcla salada suficiente en el estanque, de no ser así, se debe preparar una mezcla al 3.5% de sal. Con el fin de suministrar una mezcla salina homogénea es necesario revolver el contenido del estanque y mantener la recirculación mediante la bomba instantes previos a la experiencia.

Uno de los requerimientos de este estudio es lograr la incorporación de solución salina a la columna de agua por efectos de la difusión turbulenta y molecular y no por efectos de diferencia de cota. Es decir, una de las condiciones de estacionalidad del sistema corresponde a que la superficie libre del estanque con solución salina debe estar a la misma cota que el nivel medio del canal. Para esto se debieron manipular las válvulas presentes en el sistema hasta obtener la condición de igual cota. Se instalaron 2 piezómetros, uno en el estanque y el otro en el canal, los cuales permiten la visualización de la condición antes mencionada.

Otro elemento que fue definido previo a la toma de datos fue la playa de absorción de oleaje, con el fin de reducir los efectos de borde. Según recomendación de Guzmán (2006) este sistema de disipación no es óptimo, y por ende siempre se tendrá un oleaje reflejado no deseado. Luego para no introducir más variables en el análisis, la configuración de la playa no fue modificada en ninguna de las experiencias.

Finalmente se debió habilitar el sistema de adquisición de datos, lo que consiste en la conexión física de los sensores a la tarjeta de adquisición, y la ejecución de los softwares correspondientes.

Una vez que la instalación se encuentra en operación, se procedió a medir después de 20 minutos de estabilización del sistema, para así permitir la formación de la capa límite béntica y generar un estado permanente.

3.3.2 Experiencias en el modelo

Las experiencias que se realizaron en el modelo se pueden dividir en dos tipos: a) Experiencias con corriente sin oleaje y b) Experiencias con corriente y oleaje. Además se realizaron experiencias previas las cuales permitieron determinar el tiempo de estacionalidad y la verificación del buen estado de los instrumentos.

Para el caso de las experiencias sin oleaje se definieron 2 caudales de experimentación: 2.5 l/s y 1 l/s. Estos caudales fueron los mismos que se utilizaron en las experiencias con oleaje a los que se les adicionaron 2 períodos de oleajes y por ende 2 alturas de ola distintas. A continuación se presenta la matriz de experimentación la cual consta de 6 experiencias a analizar.

Tabla 3.3: Tabla de experimentaciones a realizar.

	Experiencia 1	Experiencia 2	Experiencia 3	Experiencia 4	Experiencia 5	Experiencia 6
Caudal [l/s]	1.00	1.00	1.00	2.50	2.50	2.50
Período [s]	N/A	3.00	2.10	N/A	3.00	2.10

Para todas las experiencias se determinaron los perfiles de conductividad y velocidad en la columna de agua, además se determinaron los perfiles de energía turbulenta y los esfuerzos de Reynolds entre otros. Dichos cálculos y análisis se realizaron mediante el uso de rutinas creadas en Matlab para este estudio.

Los perfiles medidos se encuentran en la zona de inyección de solución salina, y fueron enumerados de 1 a 7, siendo el primer perfil el que se encuentra ubicado aguas arriba del volumen de control. En la Figura 3.20 se presenta la ubicación de los perfiles medidos.

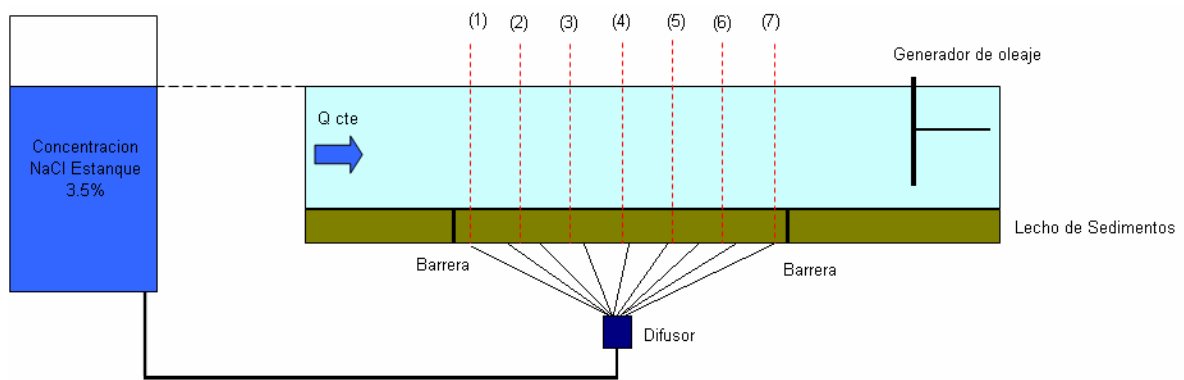


Figura 3.20: Vista lateral de la ubicación de los perfiles

3.3.3 Procedimientos de adquisición de datos.

Como se mencionó anteriormente debido a la cantidad de variables que se deben controlar, se diseñó un software en Labview 7 que permite la adquisición sincronizada de 3 variables de interés; Altura (Presión), Conductividad, Temperatura.

Es importante señalar que por motivos de operabilidad y funcionamiento de ciertos instrumentos, no se pudieron realizar mediciones de algunas variables en el mismo instante. Una de las condiciones importantes para el uso del sensor de velocidad (ADV) es que en el flujo existan sólidos suspendidos los cuales permiten que las señales emitidas por el transductor reboten en estas partículas y sean captadas por los receptores. Si bien el instrumento puede medir con concentraciones baja de sólidos, se recomienda que la razón de señal y ruido SNR (Signal to Noise Ratio), sea mayor de 20%. Para esto se construyó un difusor, el que se ubica aguas arriba del volumen de control y por el cual es posible inyectar una mezcla de agua con sedimentos y así

obtener una mayor precisión de los valores de velocidad. Si bien la inyección de agua con sedimentos no aumenta la concentración de sales, sí afecta en la porosidad de los sedimentos y por ende en la tasa de incorporación de agua salina. Mediante experiencias previas se pudo visualizar que mientras se inyectan sedimentos, estos se depositan en el lecho generando una capa muy fina de dicho material, el cual aumenta su espesor a medida que transcurre la medición y por ende genera efectos impermanentes en el transporte de masa desde el lecho hacia la columna de agua. Para evitar estos conflictos, se debió realizar un procedimiento el cual consiste en la medición ordenada de las variables de interés, es decir, se tomaron registros de conductividad para luego inyectar los sólidos y poder registrar la velocidad del flujo con el ADV.

Una vez que las variables de interés se encuentran en estado permanente, se procedió a medir la conductividad, temperatura y altura de ola en los puntos definidos para cada perfil. Mediante mediciones previas se determinó la estacionalidad de la variable conductividad y con esto se determinó que el tiempo de medición deberá ser de 60 segundos como mínimo para los puntos ubicados sobre 1 centímetro del fondo y 2 minutos (120 segundos) para los puntos más cercanos al lecho. En el Capítulo 4, se presentan algunos gráficos de la estacionalidad de dichas variables.

Una vez medidos los perfiles de conductividad y temperatura, se procedió a registrar la serie de datos de velocidad mediante el uso del ADV. Se registró solo un perfil de velocidad por cada experiencia, ubicado en el centro del volumen de control, el que contiene 11 puntos de medición. El procedimiento utilizado para este equipo fue determinar el punto más cercano al fondo en el cual el instrumento puede registrar valores, y luego se empezaron a tomar datos cada 2.5 milímetros hasta el primer centímetro, para luego tomar datos cada 5 milímetros mediante el uso del sistema de posicionamiento. En el caso de este instrumento también se determinó la estacionalidad, con la cual se decidió realizar mediciones de 90 segundos como mínimo. Se presentarán dichas experiencias en el Capítulo 4.

CAPITULO 4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

Toda la información recopilada de las experiencias fue procesada mediante el uso de rutinas construidas para este estudio en ambiente Matlab. Para esto se generaron 2 rutinas dependientes entre sí, la primera de ellas procesa los datos de altura de ola para luego entregar información de período, amplitud y longitud de ola, la cual es utilizada en la segunda rutina. Esta última, procesa la información entregada por el sensor de velocidad, la que permite determinar los perfiles de velocidad, y estadísticas de turbulencia, como la energía cinética turbulenta, entre otros. Además, procesa la información de conductividad y temperatura para así determinar los perfiles de concentración y gasto másico entre otros.

La mayoría de la información obtenida de los sensores se presenta mediante gráficos y tablas las cuales resumen en gran parte la información recopilada, para facilitar la visualización de los fenómenos.

4.2 Calibración de Instrumentos y Dispositivos

Se realizaron las calibraciones de los sensores de conductividad, temperatura y altura. Los procedimientos de calibración y resultados se presentaron en la sección 3.2.3. Además, fue necesario calibrar el sistema que genera la corriente en contra del sentido de propagación de oleaje, cuyos resultados se presentan en la sección 3.2.3.5.

4.3 Estacionalidad de las Variables

Para determinar el tiempo apropiado que debe tener cada registro tal que sean representativos de las condiciones estacionarias del sistema, se realizaron análisis de estacionalidad de una serie de tiempo de cada una de las variables involucradas (Velocidad, Conductividad, Temperatura, Altura de ola), a través del estudio de comportamiento de los momentos de primer y segundo orden (promedio y desviación estándar, respectivamente). En la Figura 4.1 se presenta la convergencia del promedio de las 3 series de velocidades.

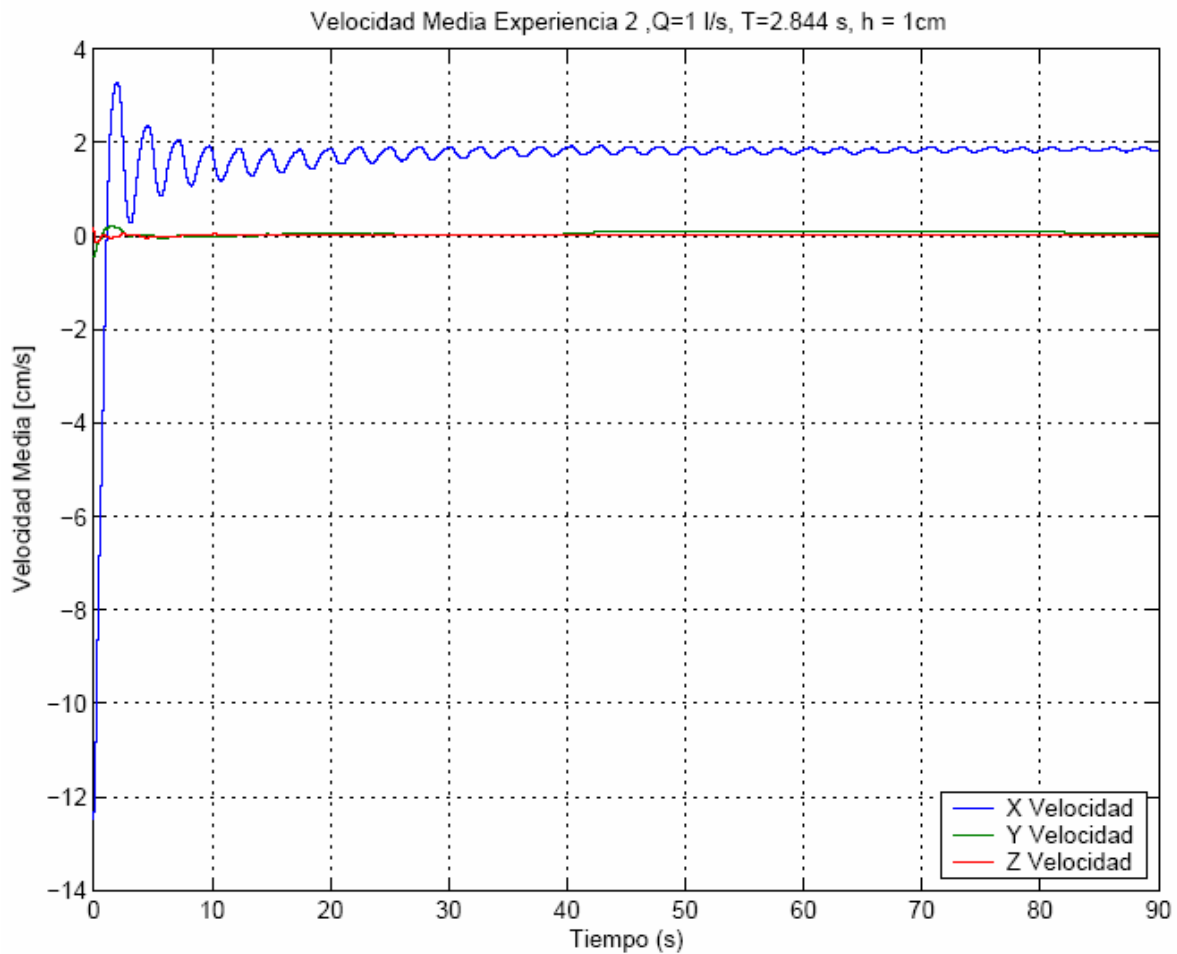


Figura 4.1: Estacionalidad del promedio de las velocidades, Experiencia 2.

Como se puede apreciar, existe una clara convergencia del primer momento estadístico para una medición de 40 segundos, por lo tanto esto indica que el sistema se encuentra en estado estacionario con respecto a la velocidad. Se define que el tiempo mínimo de medición de esta variable será de 60 segundos. Como era de esperarse la componente de la velocidad en el eje Y (transversal al canal) converge a cero rápidamente.

.En la Figura 4.2 se presentan la convergencia del momento de segundo orden de las series de velocidades para la misma experiencia anterior.

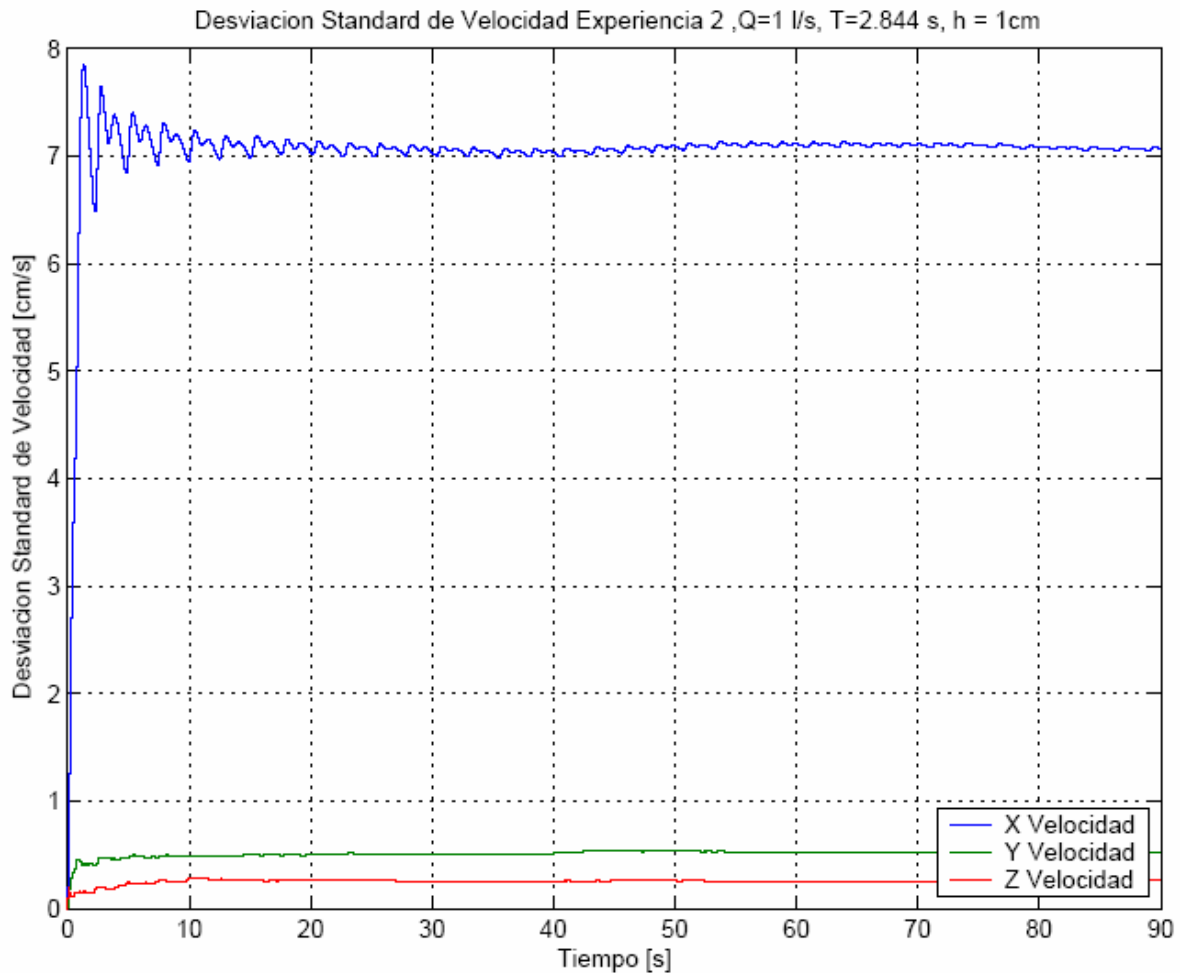


Figura 4.2: Estacionalidad de la desviación estándar de la Velocidad, Experiencia 2

El momento de segundo orden es más restrictivo que el promedio, es decir, la desviación estándar converge en tiempos mayores que el promedio. De todos modos, se puede apreciar en la Figura 4.2 que la señal de oleaje también presenta un convergencia de la desviación estándar cercano a los 60 segundos. De igual forma que en la Figura 4.1 las componentes Y y Z convergen rápidamente.

La señal de temperatura no fue analizada en este ámbito ya que la sentina al poseer un gran volumen no presenta variaciones de temperatura en tiempos cortos. Si bien la temperatura del agua a lo largo de toda la experiencia sí presenta modificaciones y por ende modifica la conductividad, ésta no presenta variaciones significativas en momento de la medición de un punto de un perfil (90 segundos).

Finalmente, en la Figura 4.3, se presentan el promedio y la desviación estándar acumulado de la señal de conductividad. Se recuerda que mediante el análisis de conductividad se podrá determinar la concentración de sal en la columna de agua según la Ecuación 4.1.

$$S[mg/l] = 10000 \cdot 0.0609 \cdot \sigma_T \cdot (1 - 0.0359 \cdot e^{-0.0218 \cdot T} \cdot (T - 20)) \quad (4.1)$$

Donde:

S : Salinidad

T : Temperatura del agua en °C

σ_T : Conductividad del agua en [mS/cm] para una temperatura T

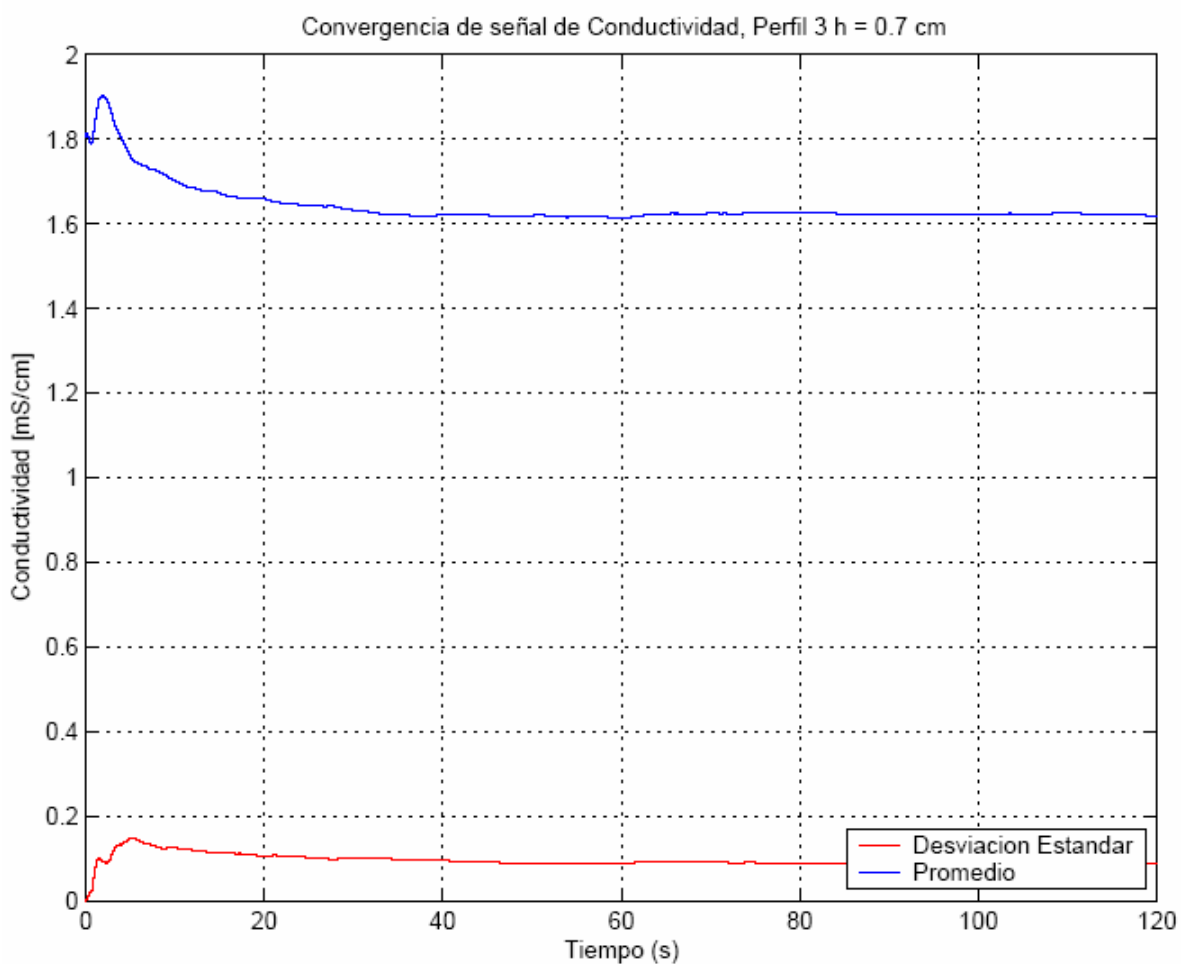


Figura 4.3: Estacionalidad de la desviación estándar de la señal de conductividad, Experiencia 4.

Del gráfico anterior se desprende la necesidad de realizar mediciones de 60 segundos como duración mínima para los puntos cercanos del fondo, en donde la turbulencia tiene una magnitud mayor a las zonas más elevadas. Por esto último se realizaron mediciones de 60 segundos para los puntos más cerca de la superficie libre y 120 segundos para los puntos más cercanos al lecho.

4.4 Análisis Registro de Oleaje

Las series de voltaje registradas a través del sensor, fueron transformadas a series de altura a través de una calibración lineal previa a la medición. En gran parte de todos los registros se puede apreciar claramente la existencia de un segundo peak, pero de menor amplitud (el primero de ellos corresponde al oleaje mismo). Este peak tiene igual período al de la ola, por lo que se supone que corresponde a la onda reflejada desde el extremo del canal.

Una vez registrada la serie de altura de ola, esta fue procesada mediante una rutina creada en Matlab, la cual permite la visualización de los parámetros de interés, como frecuencia de oleaje, espectro de energía, período y otros parámetros estadísticos. Toda esta información es utilizada por la segunda rutina como se explicó en las secciones anteriores.

Uno de los datos más relevantes entregados por la rutina corresponde al período de oleaje, el cual es determinado mediante el análisis del espectro de energía. El peak o valor máximo entregado por la función densidad espectral corresponde a la frecuencia de la ola, la que se relaciona con el período. En la Figura 4.4 se presenta el espectro de energía obtenido de la señal de oleaje, en el cual se puede apreciar un peak, el que corresponde a la frecuencia de ola.

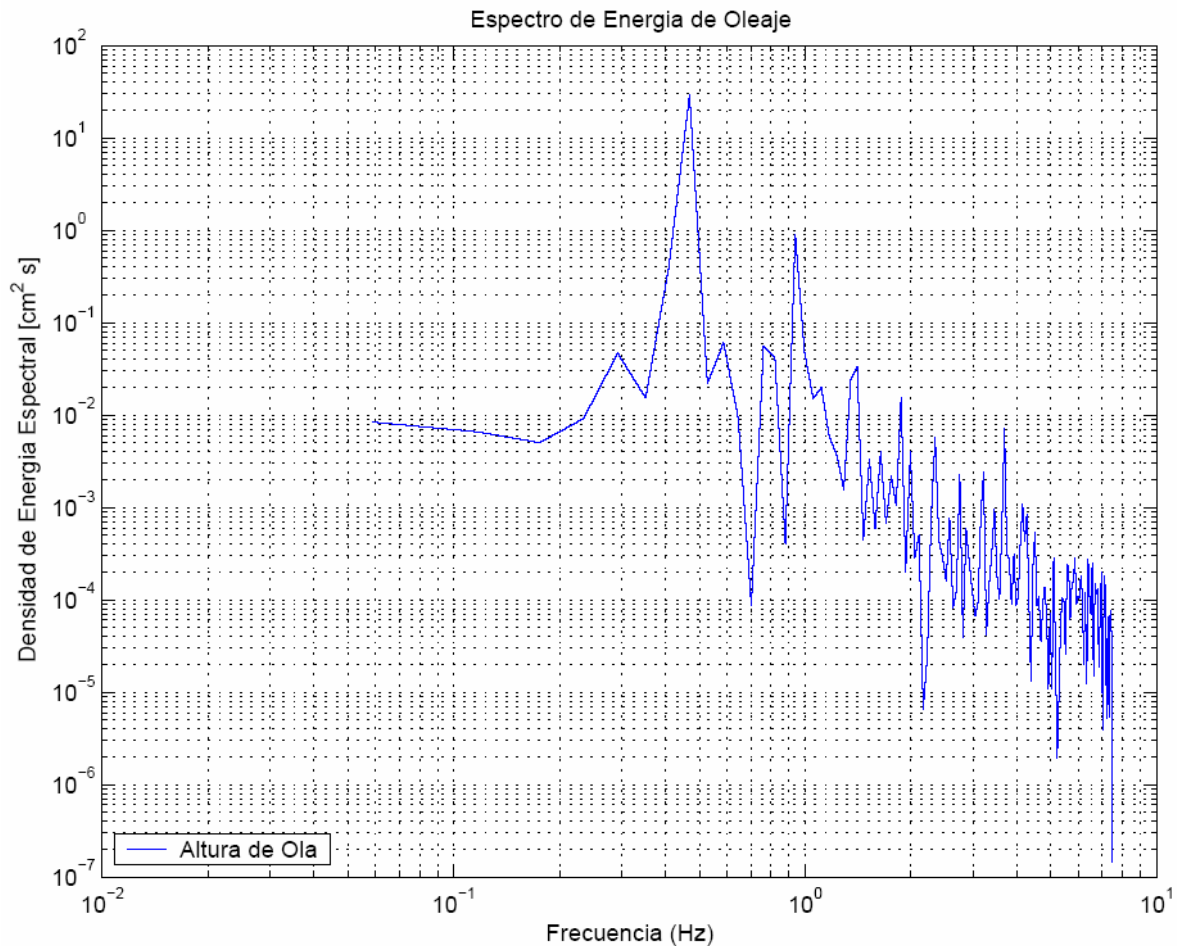


Figura 4.4: Espectro de energía de altura de oleaje, Experiencia 3

4.5 Análisis Registro de Velocidad

Debido a la gran cantidad de información recopilada durante las experiencias, y a la gran cantidad de datos por medición (50 datos por segundo por sensor), se utilizó una segunda rutina, dependiente de la desarrollada para la serie de alturas, la cual permite sistematizar el trabajo con los registros. Esta rutina permite realizar: análisis de estacionalidad, análisis espectral de energía, análisis de correlaciones y perfiles de velocidad, cálculo de la energía cinética turbulenta, entre otros.

Todos estos análisis son presentados en este informe mediante gráficos, los cuales resumen los resultados obtenidos de cada experiencia.

El primer análisis realizado por la rutina, corresponde a la estacionalidad de la velocidad, análisis que fue ya discutido en el punto 4.3, del cual se puede desprender que el tiempo de medición mínimo es de 90 segundos por punto de cada perfil.

A continuación se puede apreciar un tramo de la señal generada por el sensor de velocidad para la Experiencia 2. Es importante recordar que el eje x del ADV apunta en la dirección del flujo, mientras que el eje z apunta en el sentido vertical.

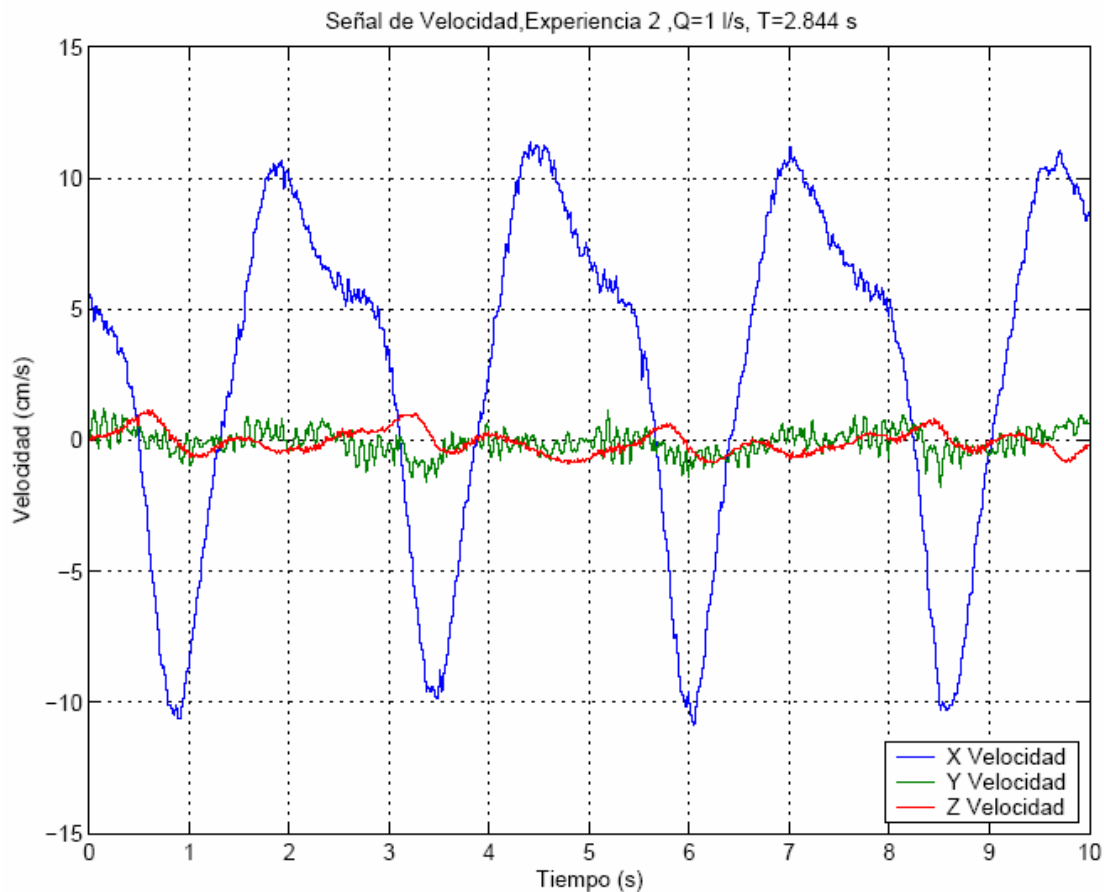


Figura 4.5: Señal de Velocidad en los 3 ejes, Experiencia 2.

De la Figura 4.5 se puede visualizar que el oleaje posee un período cercano a 3 segundos. Debido a la naturaleza del oleaje, la señal de velocidad posee valores medios, máximos y mínimos. Por esta razón se determinaron los perfiles de velocidades medias, el cual corresponde al promedio de la señal de velocidad y los perfiles de velocidades máximas y mínimas.

4.5.1 Perfil de Velocidad Media, Máxima y Mínima

Es importante recordar que cada perfil esta compuesto de 11 puntos de los cuales 3 de estos están en el primer centímetro (cada 2.5 mm) más cercano al fondo (ver Tabla 3.2).

Las posiciones que se tomaron en cuenta permitieron obtener una caracterización detallada de la hidrodinámica del sistema, ya que se ha considerado que existe una distribución logarítmica de velocidades para todas las experiencias, debido al desarrollo de la capa límite en toda la columna de agua.

Si se considera que existe una distribución logarítmica de velocidad en la zona alejada del fondo en donde los esfuerzos de corte viscosos son despreciables en comparación con los esfuerzos turbulentos, se podrá determinar el espesor de la subcapa viscosa y los esfuerzos de corte en el fondo.

La determinación de la velocidad de corte, u_* , adoptado se hará mediante un ajuste de la Ecuación 4.2 a los puntos medidos en cada experiencia, poniendo mayor atención a la zona cercana pero no adyacente al fondo en donde la Ecuación 4.2 tiene validez.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{u_* \cdot z}{\nu} \right) + 5 \quad (4.2)$$

A modo ilustrativo, se presenta en la Figura 4.6, el ajuste realizado a los puntos experimentales obtenidos de la experiencia 3. Además, se graficó un perfil lineal en la zona cercana al fondo, de ecuación 4.3:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* \cdot z}{\nu} \quad (4.3)$$

La distribución lineal de velocidades se cumple en la subcapa viscosa, y es donde la viscosidad domina sobre los efectos de la turbulencia.

$$\tau_v \gg \tau_T \quad (4.4)$$

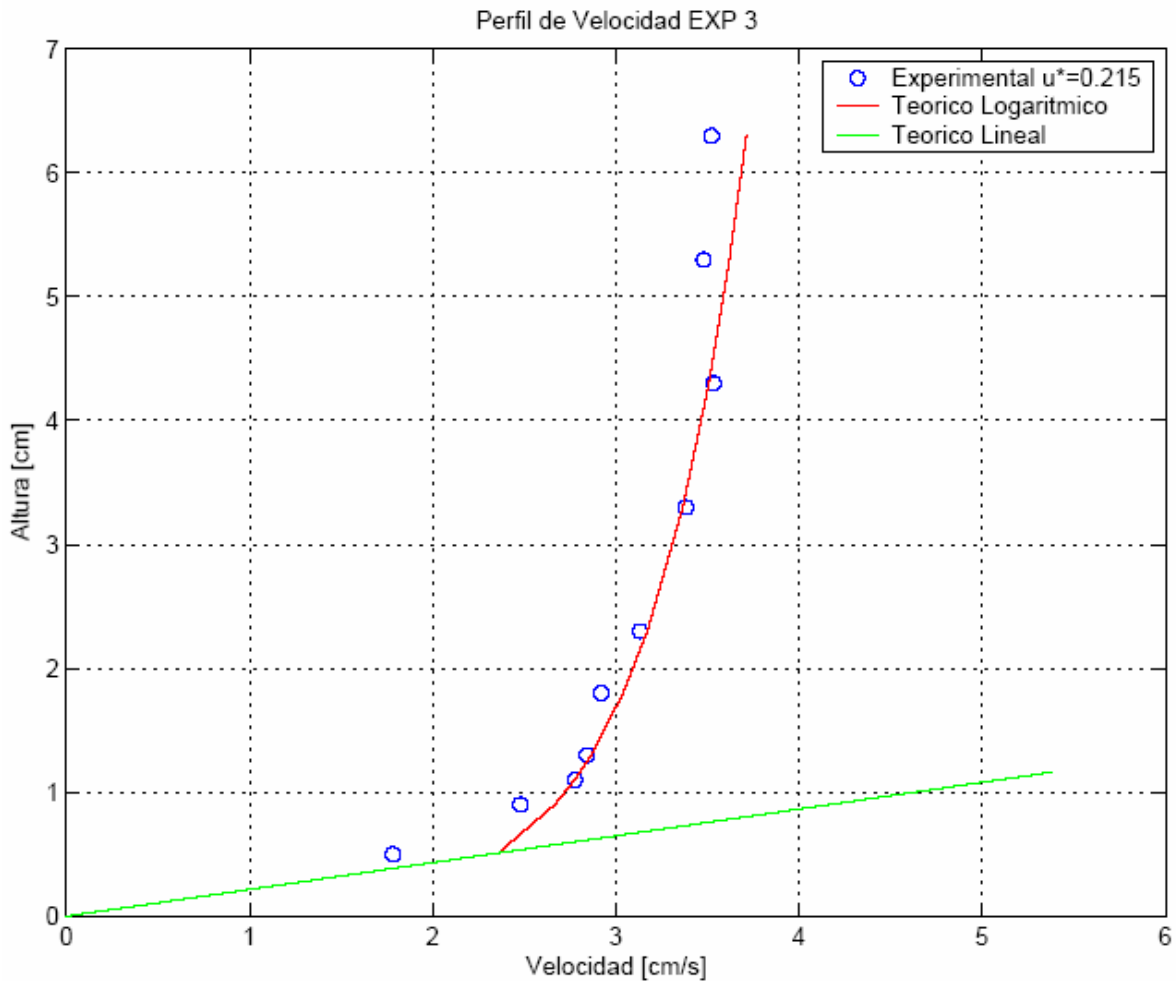


Figura 4.6: Ajuste al perfil de velocidades.

En el Anexo I, Perfiles de Velocidad, se pueden apreciar los ajustes realizados a las otras experiencias y el valor de u_* adoptado en cada caso

En la Tabla 4.1 se presentan los valores de u_* adoptado en cada caso, determinados mediante un ajuste a los puntos experimentales.

Tabla 4.1: Determinación de la velocidad de corte

	EXP 1	EXP2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6
Q [l/s]	1.0	1.0	1.0	2.5	2.5	2.5
T [s]	N/A	3.0	2.0	N/A	3.0	2.0
u_* [cm/s]	0.2	0.2	0.215	0.47	0.4	0.42

Se realizó una caracterización hidrodinámica del sistema en estudio. Para esto se determinó el número de Reynolds, $Re = U \cdot h / \nu$, el espesor de la subcapa viscosa, δ_v , y de la subcapa difusiva, δ_d , entre otros. El valor de viscosidad cinemática, ν , adoptado es $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Como era de esperarse, el flujo posee un régimen turbulento con valores del número de Reynolds mayores que 4000 para las experiencias de bajo caudal y mayores que 10000 para las experiencias que poseen un mayor caudal (Ver Tabla 4.2).

Se determinó, además, la resistencia hidráulica del lecho para cada experiencia mediante el número de Reynolds de la partícula, Re_{*p} , con el cual se concluye que el lecho es hidrodinámicamente liso (ver Figura 4.7).

Tabla 4.2: Valores de parámetros hidrodinámicos

	EXP 1	EXP2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6
Q [l/s]	1.0	1.0	1.0	2.5	2.5	2.5
T [s]	N/A	3.0	2.0	N/A	3.0	2.0
u_* [cm/s]	0.2	0.2	0.215	0.47	0.4	0.42
ν / u_* [cm]	0.05	0.05	0.047	0.021	0.025	0.024
Re	4537	4336	4776	11909	10347	10773
Re_{*p}	1	1	1.08	2.35	2	2.1
$Re_{*p}/11.6$	0.09	0.09	0.09	0.2	0.17	0.18

Se define además, la zona de la pared como aquella donde el flujo es dominado por el esfuerzo de corte de fondo, caracterizado por la velocidad de corte, u_* , y la viscosidad cinemática del fluido, ν , de modo que ella se extiende desde el lecho hasta una altura δ_w . (Niño and García, 1996) (Ver Tabla 4.3: Valores de parámetros hidrodinámicos Tabla 4.3).

$$\delta_w \approx 100 \frac{\nu}{u_*} \quad (4.5)$$

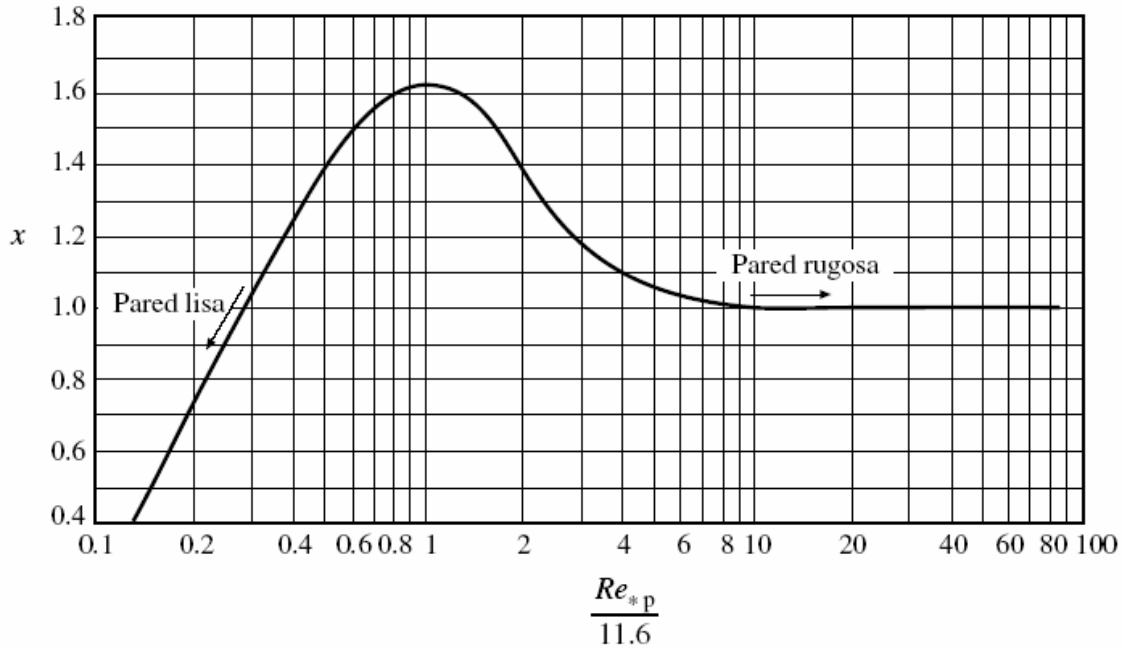


Figura 4.7: Coeficiente x para estimar la resistencia hidráulica en lechos hidrodinámicamente en transición lisa-rugosa. (Apunte curso Hidráulica Fluvial y Transporte de sedimentos).

La zona cercana al lecho, donde la turbulencia es suprimida por los esfuerzos viscosos es denominada subcapa viscosa. En esta región el transporte vertical de momentum es dominado por procesos de difusión molecular y tiene una altura desde el lecho igual a δ_v (ver Tabla 4.3).

$$\delta_v \approx 10 \frac{\nu}{u_*} \quad (4.6)$$

Al interior de la subcapa viscosa existe otra región, la capa límite difusiva, donde el transporte vertical de solutos y calor es dominado por difusión molecular y no por transporte turbulento, cuyo espesor δ_d queda definido en función del número de Schmidt, Sc , y por lo tanto, dependerá de la razón entre el coeficiente de difusión de sal en el agua, D , y la viscosidad cinemática. El valor del coeficiente de difusión, D , adoptado es $1.484 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$

$$\frac{\delta_v}{\delta_d} \approx Sc^{1/3} \approx 8.767 \quad (4.7)$$

Tabla 4.3: Valores de parámetros hidrodinámicos

	EXP 1	EXP2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6
Q [l/s]	1.0	1.0	1.0	2.5	2.5	2.5
T [s]	N/A	3.0	2.0	N/A	3.0	2.0
u* [cm/s]	0.2	0.2	0.215	0.47	0.4	0.42
v/u* [cm]	0.05	0.05	0.047	0.021	0.025	0.024
δv [cm]	0.5	0.5	0.47	0.21	0.25	0.24
δw [cm]	5	5	4.65	2.13	2.5	2.38
δd [cm]	0.057	0.057	0.053	0.024	0.029	0.027
F	282.1	295.2	268.0	107.5	123.7	118.8

En la última fila de la tabla 4.3 se ha calculado el valor de la función F, definida como:

$$F = \frac{f_s \cdot L}{U_c} \quad (4.8)$$

Donde:

f_s : Frecuencia de muestreo

L : Tamaño de los vértices

U_c : Velocidad de convección de los vértices

Se recomienda que el valor del adimensional F, sea mayor que 20, para así obtener una mayor descripción de la turbulencia con el sensor de velocidad acústico doopler (Niño, Garcia, 2004).

En la Figura 4.8 se presenta un perfil de velocidad media en la dirección x obtenido de la Experiencia 6, en la cual se utilizó un caudal de 2.5 l/s y un período cercano a los 2 segundos. Este perfil corresponde al promedio de los valores de la serie de velocidades de cada posición, por lo tanto, la velocidad el oleaje no se ve representado en dicho grafico, ya que el promedio de la velocidad de la ola es cero.

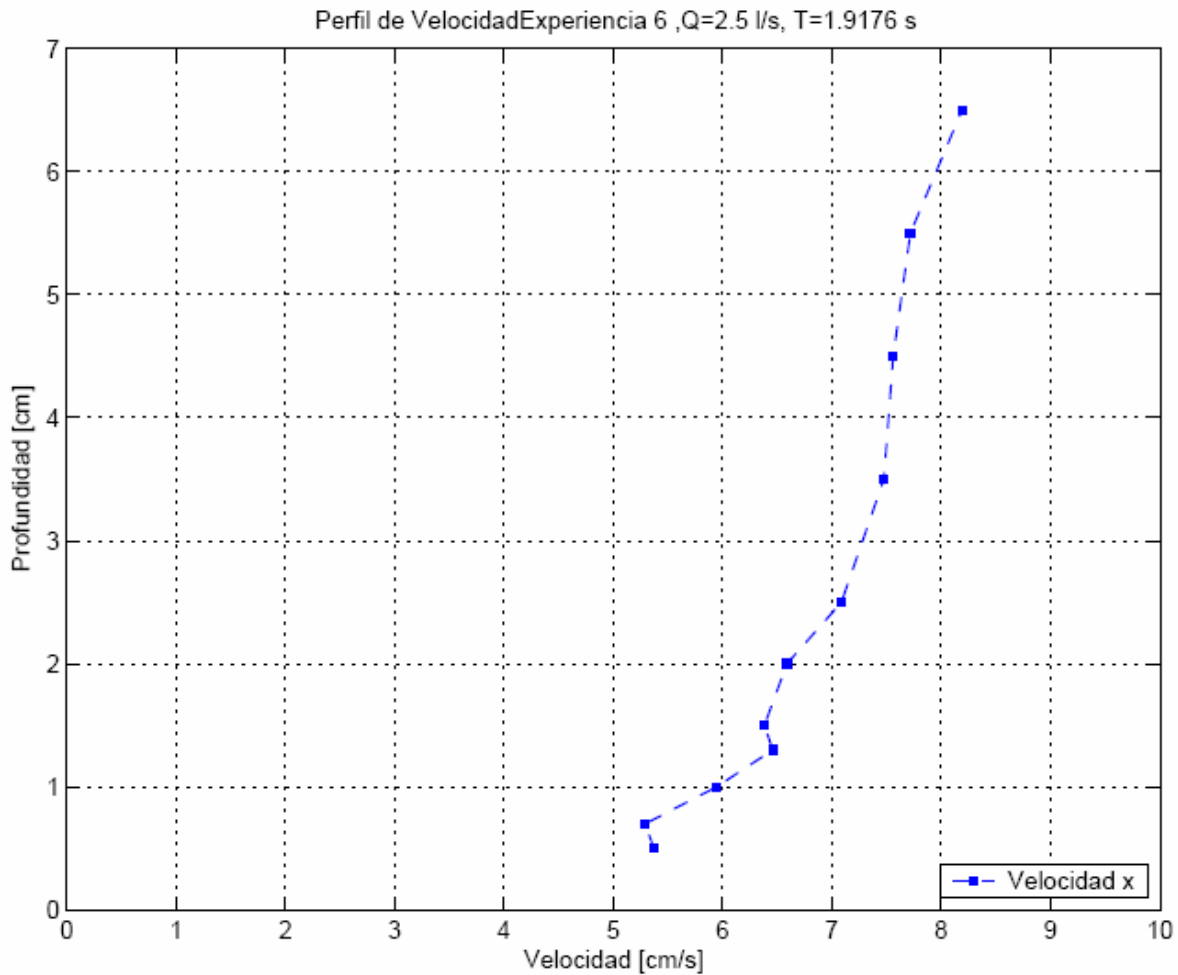


Figura 4.8: Perfil de Velocidad, Experiencia 6.

Como se esperaba, existe un gradiente de velocidades cercano al fondo y el perfil tiende a uniformarse a medida que se aumenta la altura de medición. Este efecto es provocado por la existencia de la subcapa viscosa, zona en la cual los efectos viscosos predominan sobre los turbulentos. Si bien en la Figura 4.8 no se puede apreciar la existencia de la subcapa viscosa, ya que esta posee un espesor cercano a los 2.5 mm (ver Tabla 4.3) y la medición más cerca del fondo se realizó a los 5 mm. (Esta última condición se cumple para las Experiencia 4,5 y 6). La presencia de la subcapa viscosa se hace evidente en las Experiencias 1, 2 y 3 (Ver Figura 4.6 y Anexo I) en la cual el espesor de la subcapa viscosa posee un espesor de 5 mm.

Además, se determinó el perfil de velocidades medias máximas y mínimas, debido a que el oleaje genera una señal periódica en la velocidad. El software desarrollado detecta los máximos y mínimos en esta señal y obtiene un promedio por cada una de estas fases.

En la Figura 4.9 se presentan los perfiles de velocidad media máxima y mínima para la Experiencia 2 la cual tiene un período de oleaje de 3 segundos y un caudal de 1 l/s.

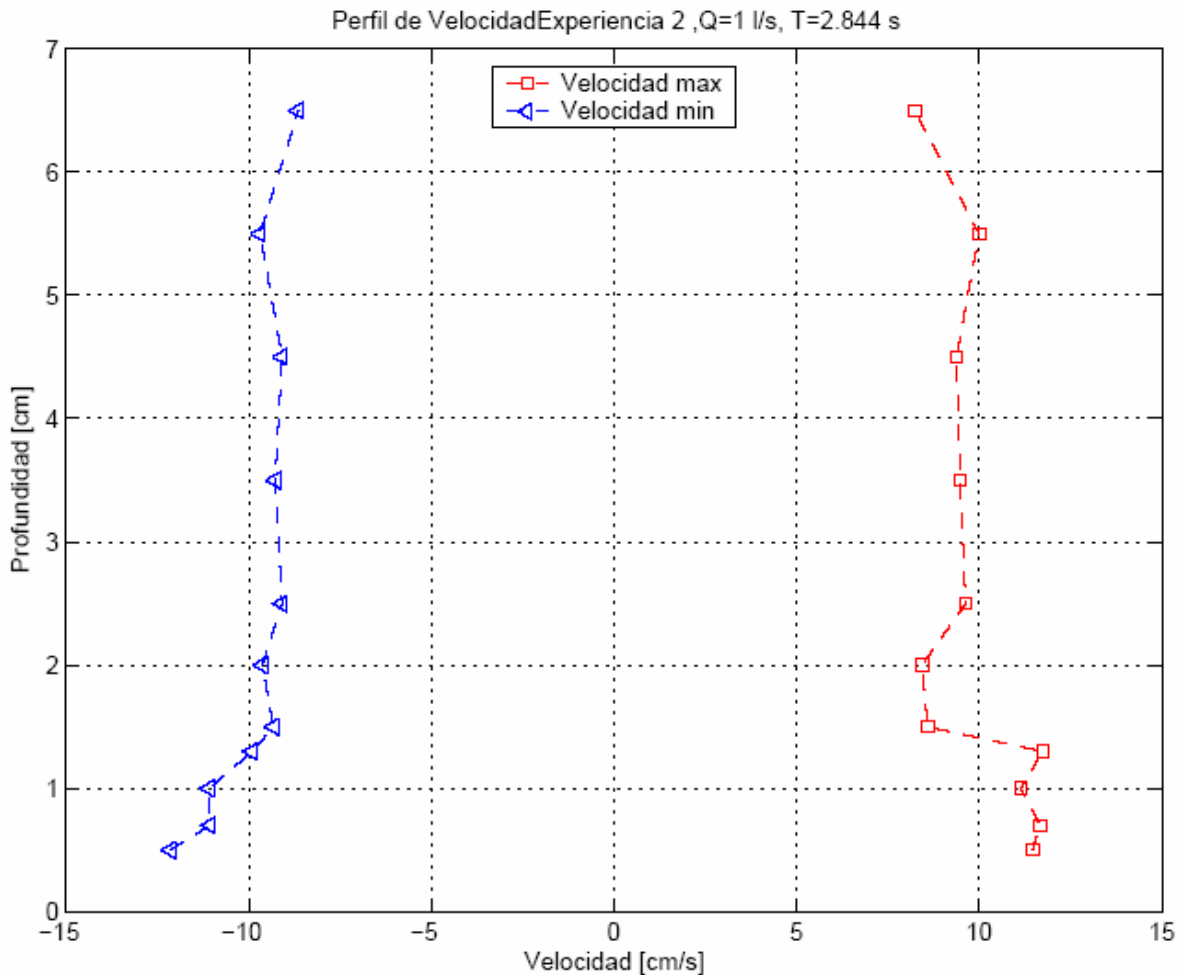


Figura 4.9: Perfil de Velocidad Media Máxima y Mínima, Experiencia 2.

Se puede visualizar que los perfiles en esta experiencia tienden a ser simétricos, debido al alto período de oleaje y la baja velocidad media del flujo 2.2 cm/s. Esto último indica que el esfuerzo de corte de fondo varía periódicamente. En la Figura 4.10 se puede ver que la simetría con respecto 0, no se cumple ya que en la Experiencia 6 se utilizó un caudal de 2.5 l/s con una velocidad media de 5.8 cm/s, el cual distorsiona el perfil y lo hace desplazarse hacia la derecha.

En el Capítulo 5 se realiza un análisis comparativo de todas las experiencias, para así determinar en forma cualitativa y cuantitativa los perfiles de velocidades asociados a cada tipo de ensayo.

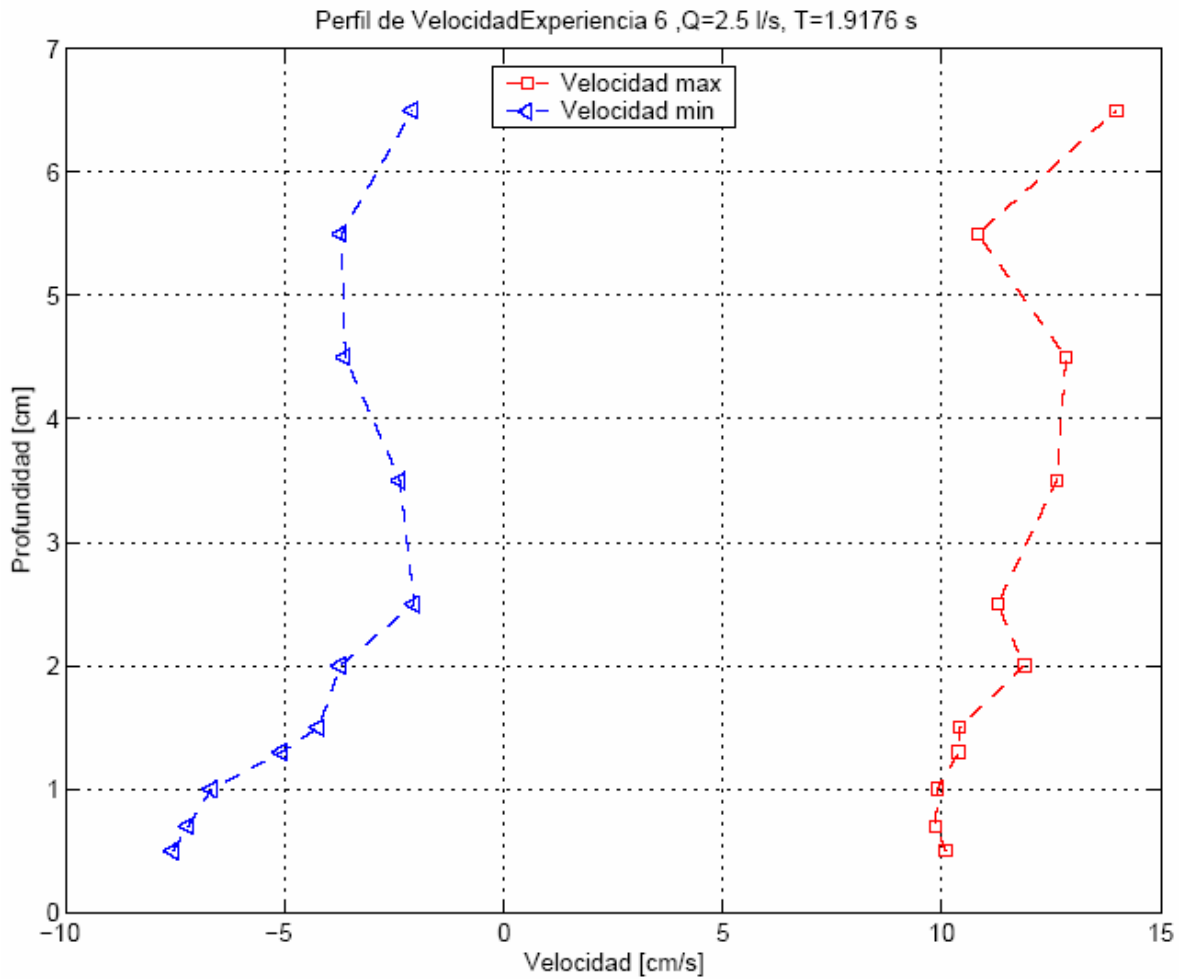


Figura 4.10: Perfil de Velocidad, Experiencia 6.

Estos perfiles medidos en el canal de experimentación fueron comparados con los perfiles de velocidad teóricos obtenidos de la Teoría Lineal de Oleaje (TLO) y la teoría no lineal o teoría de Dean. (Guzmán, 2006). De dicha comparación se concluyó que el perfil de ola corresponde a uno no lineal y por ende el tipo de ola característica en el canal es como la que se observa en la Figura 4.11.

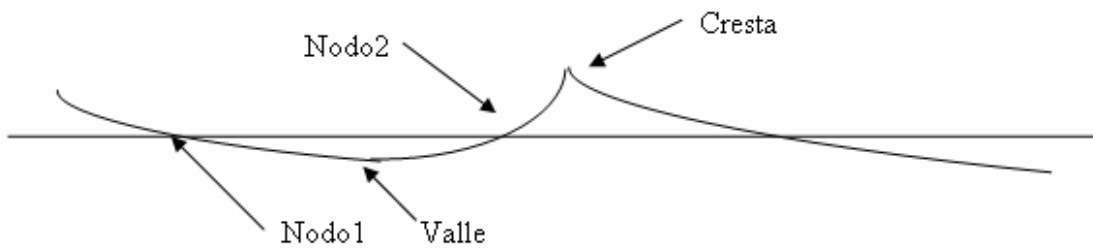


Figura 4.11: Esquema de la ola analizada. (Guzmán 2006).

A diferencia de la TLO, la teoría de Dean propone un perfil de ola que no es simétrico con respecto a la superficie media libre, sino que tiene una cresta más pronunciada, corta y alejada del nivel medio de aguas, a la vez posee un valle más largo y cercano al nivel medio de aguas. No obstante, la velocidad promedio del oleaje es cero para todo el registro en una misma profundidad.

4.5.2 Perfil de Energía Cinética Turbulenta

Además de los perfiles de velocidad, se construyeron los perfiles de energía cinética turbulenta para cada experiencia. En este capítulo solo se analizará una experiencia por separado y en el Capítulo 5, Análisis comparativo de experiencias, se verán en profundidad todos los perfiles y se realizarán análisis más profundos.

Como se sabe, la energía cinética turbulenta está asociada a las fluctuaciones en torno a la velocidad media. La fluctuación de cualquiera de las componentes de la velocidad se puede escribir como:

$$u'(t) = u(t) - \overline{u(t)} \quad (4.9)$$

Luego la Energía cinética Turbulenta, K , a una altura determinada se puede expresar como:

$$K = \frac{1}{2} (u_{RMS}^2 + v_{RMS}^2 + w_{RMS}^2) \quad (4.10)$$

Donde:

$$u_{RMS} = \sqrt{\overline{(u')^2}}, v_{RMS} = \sqrt{\overline{(v')^2}}, w_{RMS} = \sqrt{\overline{(w')^2}} \quad (4.11)$$

Estas ecuaciones solo pueden ser utilizadas en las Experiencias 1 y 4 las cuales no poseen oleaje. Si se promedia una señal de velocidad que contiene oleaje, el resultado será la velocidad media del flujo, que corresponde a la velocidad de la corriente y en ningún caso se verá reflejada la velocidad del oleaje. Esto se debe a que la velocidad promedio del oleaje monocromático unidireccional es 0.

A continuación se presenta un perfil de energía cinética turbulenta correspondiente a la Experiencia 4, la cual no posee oleaje. Se puede apreciar que la energía cinética turbulenta

aumenta hacia las zonas cercanas al fondo provocado por el aumento del gradiente de velocidad. Los altos gradientes de velocidad en las zonas cercanas al fondo son provocados por la condición de no resbalamiento en el fondo.

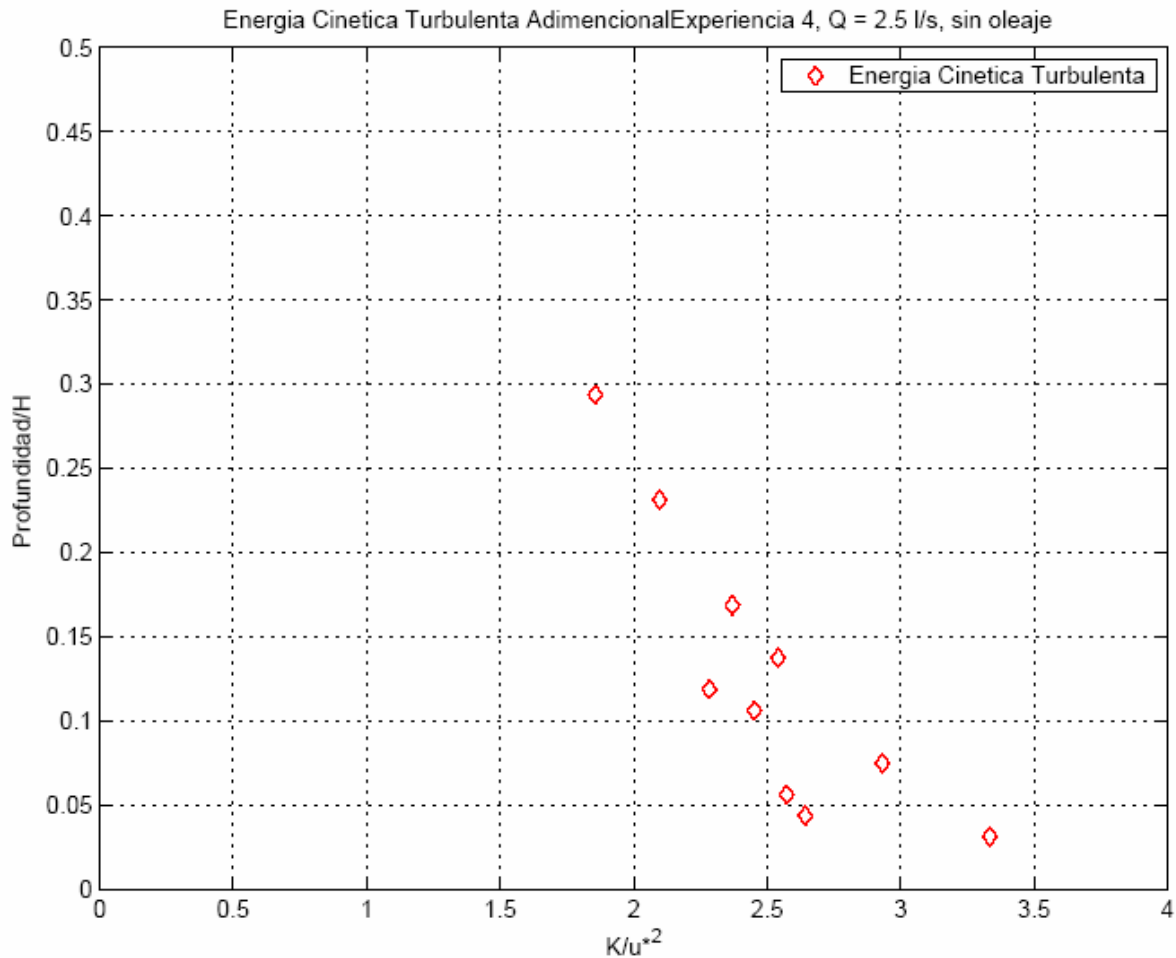


Figura 4.12: Perfil de Energía Cinética Turbulenta, experiencia sin oleaje.

Luego, para las experiencias que poseen oleaje se deberá encontrar una expresión de fluctuación que considere el efecto del oleaje:

$$u'(t) = u(t) - \overline{u(t)} - u_{ola}(t) \quad (4.12)$$

La velocidad del oleaje se determinará mediante la metodología de la media móvil, esto corresponde a que la velocidad de la ola en un tiempo i será el promedio de señal de velocidad hasta $t = i+5$. El largo del intervalo se obtuvo a través de un procedimiento de prueba y error, es decir, se ajustó el intervalo para así obtener la información deseada, en este caso, la señal de velocidad de la ola.

$$u_{ola}(i) = \frac{1}{5} \sum_i^{i+5} u(i) \quad (4.13)$$

En la Figura 4.13 se presenta en un mismo grafico, un tramo de señal obtenido de la experiencia 2, en el cual se puede apreciar la fluctuación obtenida de dicha señal. La curva de color negro corresponde a la señal de velocidad obtenida y sobre ésta, en color rojo, se encuentra la velocidad del oleaje obtenido con la ecuación anterior. Como se puede apreciar, el ajuste realizado es bastante bueno excepto en torno a los peaks, lo que provoca que la señal de turbulencia (en azul) tenga descensos periódicos. Finalmente, en color azul se puede apreciar la fluctuación de la señal de velocidad, la cual se utilizará para la determinación de los perfiles de turbulencia.

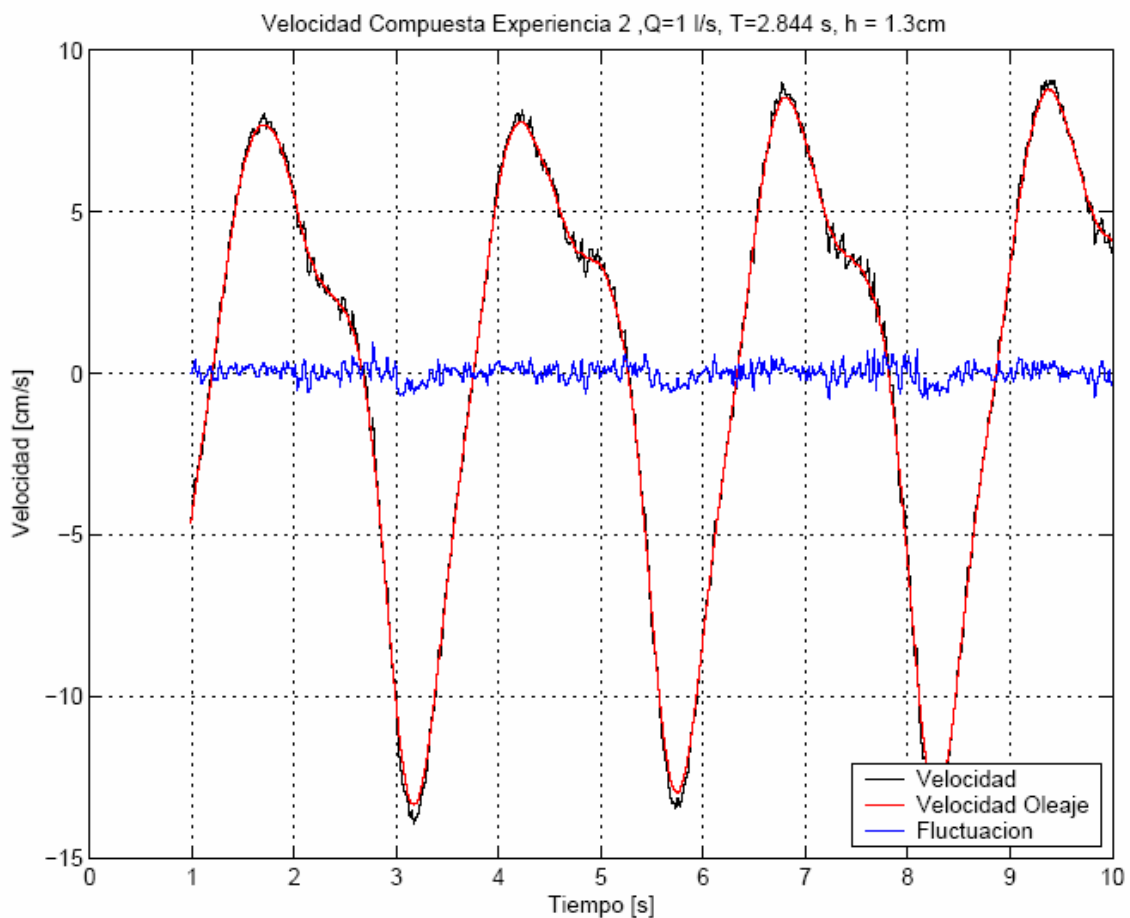


Figura 4.13: Fluctuación de la señal de velocidad, Experiencia 2.

A continuación en la Figura 4.14 se presenta el perfil de energía cinética turbulenta utilizando la metodología antes mencionada. Este perfil corresponde a la Experiencia 3, la cual tiene un oleaje de 2 segundos y un caudal de 1 l/s.

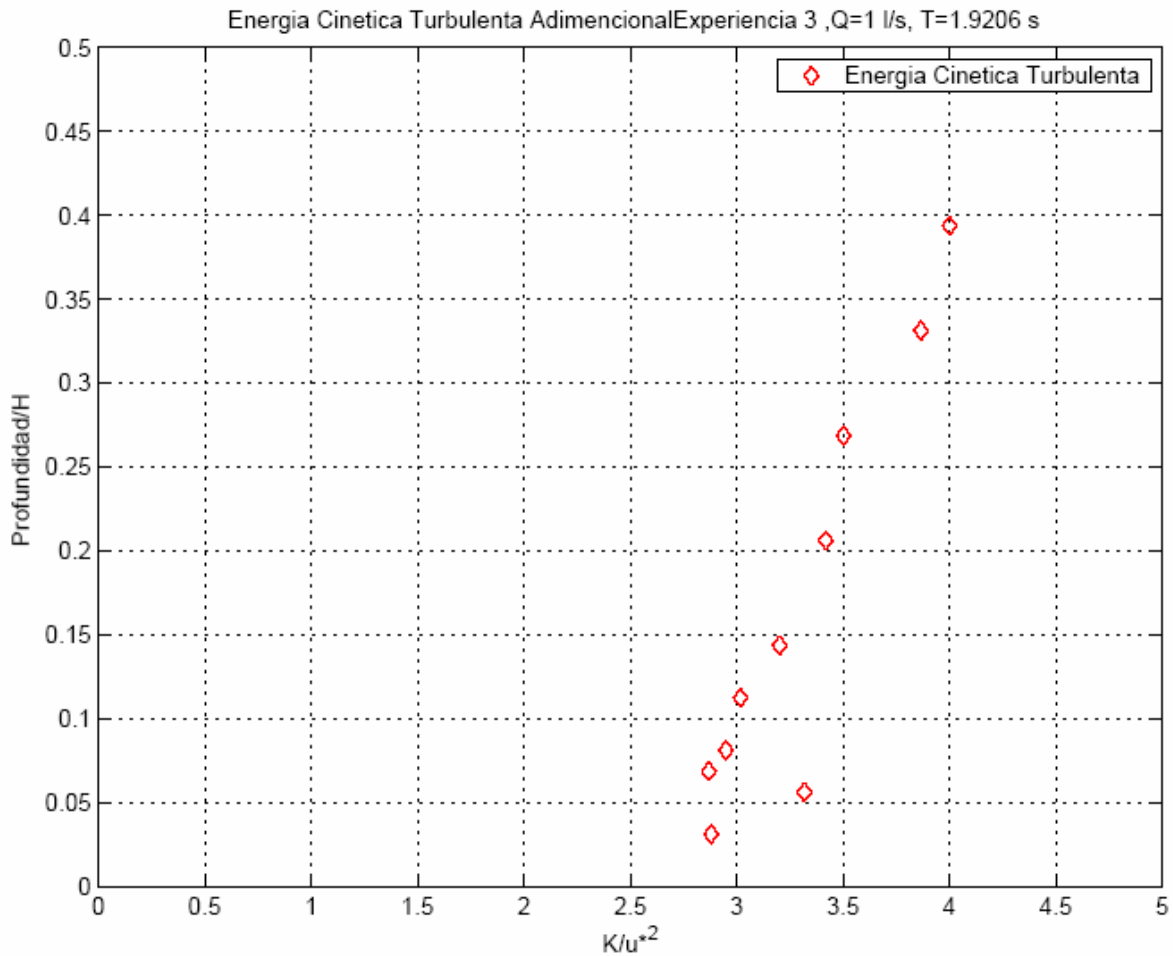


Figura 4.14: Perfil de Energía Cinética Turbulenta, Experiencia 3.

Se observa que existe una generación de energía cinética turbulenta para puntos ubicados cerca de la superficie libre. Este aumento de energía es característico de los perfiles correspondientes a las experiencias con oleaje, y esto puede ser debido a que las trayectorias de las partículas quedan caracterizadas por elipses que disminuyen sus amplitudes verticales y horizontales para zonas cercanas al fondo. Este movimiento hiperbólico es máximo en las zonas cercanas a la superficie libre y por ende, generan mayor energía cinética turbulenta.

Se puede ver además que existe un peak en la zona cercana al lecho (Figura 4.20), este valor podría indicar la presencia de la subcapa viscosa lo que provoca altos gradientes de velocidad y

generación de energía cinética turbulenta. No obstante, el espesor de la subcapa viscosa calculada para esta experiencia es de 4.7 mm aproximadamente (adimensionalmente es de 0.03), por lo tanto dicho peak no se encuentra en la inmediación de la subcapa viscosa, por lo que se concluye que dicho valor es un error asociado a la metodología con la cual se obtiene las fluctuaciones de la señal de velocidad con oleaje.

En la Figura 4.15, se presenta el perfil de energía cinética del oleaje para la experiencia 3, es decir, solo se ha graficado la energía obtenida de la componente de oleaje de la señal de velocidad, $u_{ola}(t)$, (Ecuación 4.5). Se aprecia una evidente generación de energía cinética (no turbulenta) en la cercanía de la superficie libre, debido a al movimiento elíptico ocurridos en dicha profundidad.

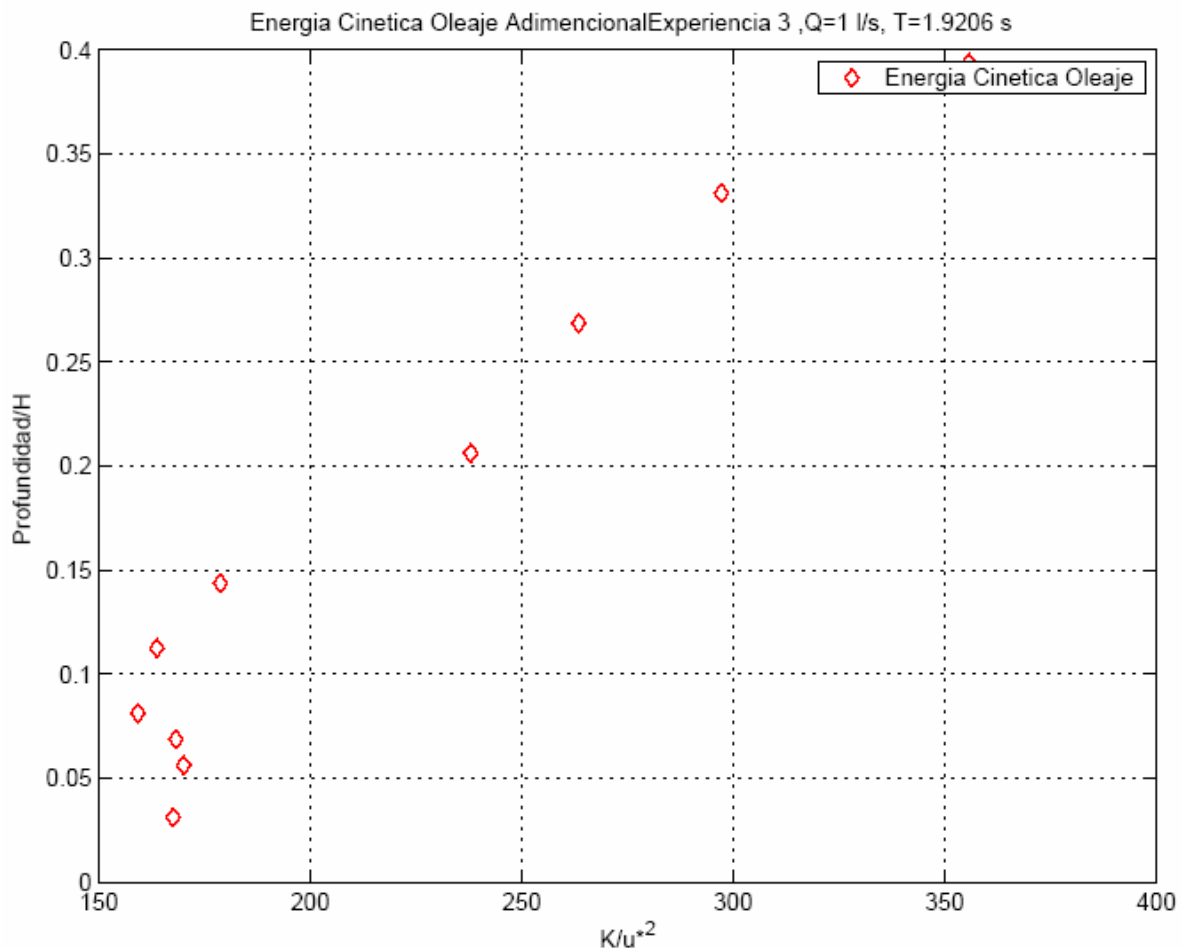


Figura 4.15: Perfil de Energía Cinética del Oleaje, Experiencia 3.

4.5.3 Análisis del Espectro de Energía

Para la determinación del espectro de energía se utilizarán las ecuaciones y metodología señalada en el Capítulo 2. A continuación se analizarán solo una serie de velocidad de las Experiencias 4, 5, y 6 ya que el comportamiento de las otras experiencias es similar. En la Tabla 4.4 se presentan las condiciones asociadas a las experiencias a analizar. Se presentaran primero las experiencias con oleaje (Experiencia 5 y 6) y luego la experiencias 4 sin oleaje

Tabla 4.4: Experiencias a realizar para el análisis del Espectro de Energía.

	Experiencia 4	Experiencia 5	Experiencia 6
Q [l/s]	2.50	2.50	2.50
T [s]	N/A	3.00	2.10

En todas las figuras que muestran espectros de velocidad se ha agregado una recta en color negro, la cual representa la pendiente de $-5/3$ correspondiente a la ley de Kolmogorov, la cual es válida en el rango inercial. La unidad de densidad de energía espectral en la ordenada es $[m^2/s]$ y la frecuencia en la abscisa es $[1/s]$.

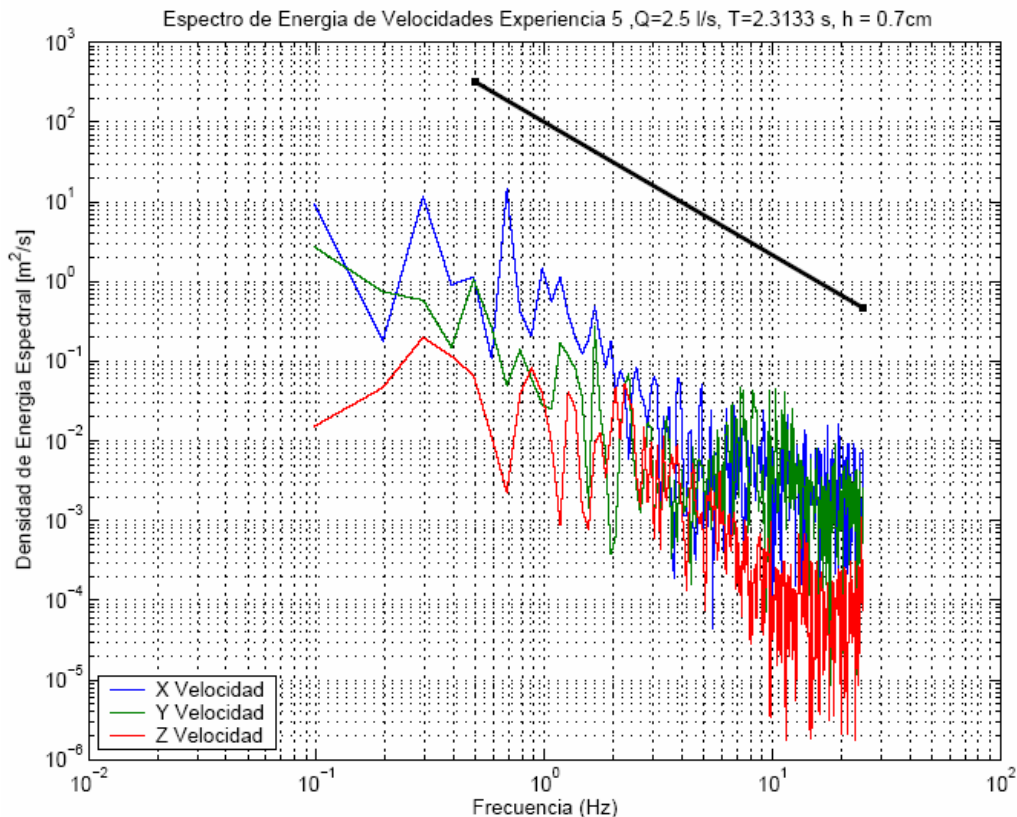


Figura 4.16: Espectro de Energía de Velocidades, Experiencia 5 con oleaje

En la Figura 4.16 se presenta el espectro de energía de la Experiencia 5, para una serie de datos de un punto ubicado a 0.7 cm del fondo.

Se aprecia un claro peak en la frecuencia 0.30 Hz la que corresponde a un período de cercano a los 3.0 segundos. El oleaje de esta experiencia posee un período de 3 segundos por lo que se puede deducir que la energía está concentrada en el oleaje y la corriente. Existe una diferencia de 2 órdenes de magnitud de energía entre el peak antes mencionado y el inicio del rango inercial (1 Hz). Esto quiere decir que la turbulencia asociada a las frecuencias mayores, posee una cantidad de energía menor a la contenida en el mismo flujo. Luego la energía decae para frecuencias más altas en los vértices de menor tamaño, hasta frecuencias de 25Hz donde es el ruido del instrumento el que se aprecia en las frecuencias sobre 10 Hz.

Además es apreciable que en el rango inercial del espectro (2 Hz a 7 Hz) la pendiente de las fluctuaciones medias cumple con la ley de Kolmogorov de flujos turbulentos, y es isotrópico en el rango señalado, es decir, los 3 espectros coinciden en las mismas energías.

En la Figura 4.17 se presenta el espectro de energía correspondiente a la experiencia 6, la cual posee oleaje de con menor período. El registro correspondiente al siguiente espectro fue tomado en la misma profundidad que en el caso anterior ($h = 0.5$ cm).

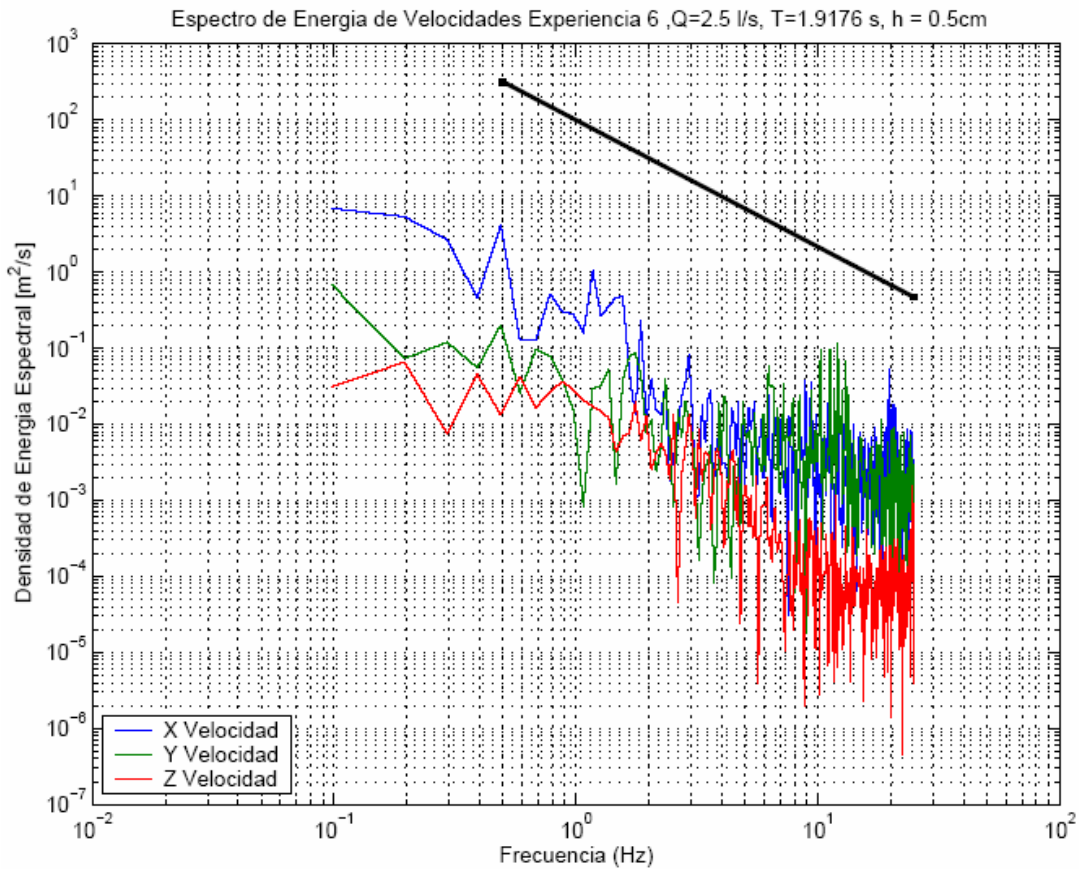


Figura 4.17: Espectro de Energía de Velocidades, Experiencia 6 con oleaje

Se puede apreciar un primer peak en los 0.5 Hz, que al igual que en el caso anterior corresponde a la energía contenida en el oleaje ($T = 2$ segundos). Ahora, si bien la diferencia entre el peak y el inicio del rango inercial es mayor que en caso anterior, la ubicación en frecuencia es la misma, es decir la turbulencia tiene una frecuencia determinada entre 1 Hz y 7Hz aprox.

Además, se puede observar que la energía correspondiente a las fluctuaciones de la componente x de la velocidad es en magnitud mayor que la componente y para frecuencias menores que 1 Hz, luego se cumple que: $\overline{u'^2} > \overline{v'^2} > \overline{w'^2}$.

Para frecuencias mayores que 1 Hz (rango inercial) el flujo es isotrópico es decir se cumple que: $\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$.

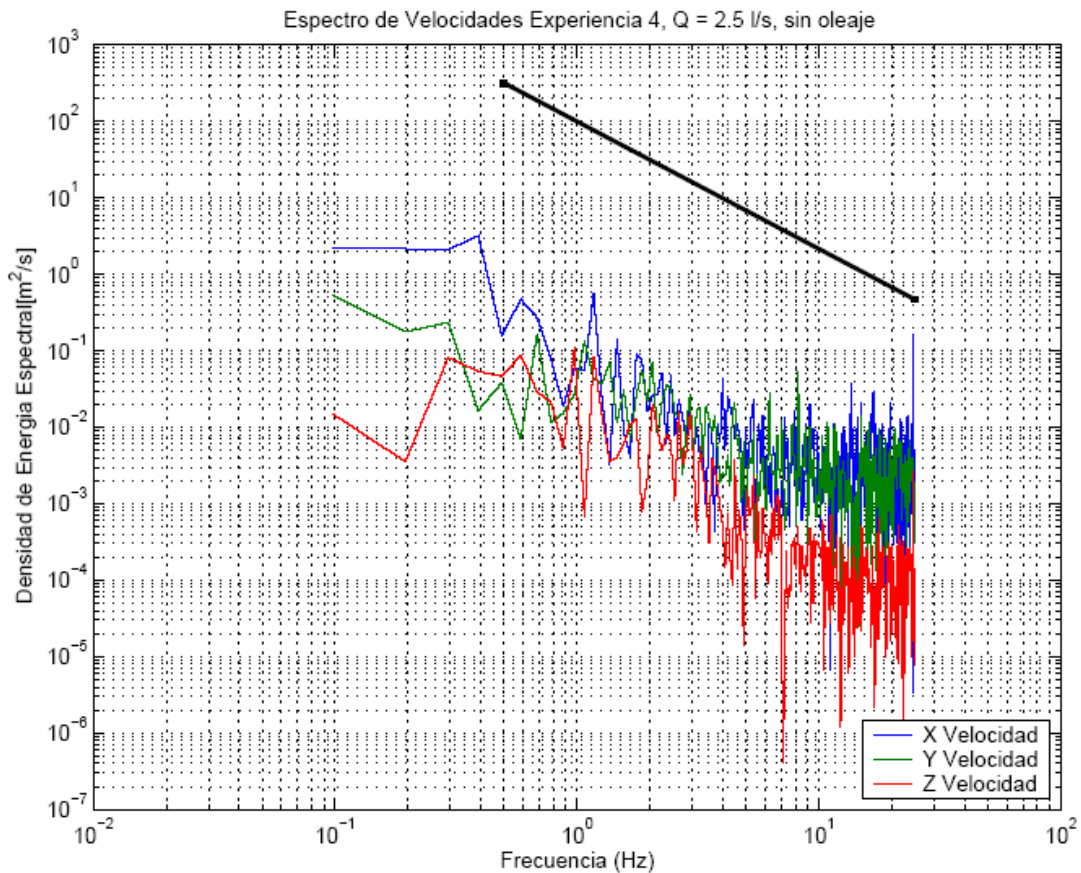


Figura 4.18: Espectro de Energía de Velocidades, Experiencia 4 en $h = 0.5$ cm.

Finalmente se analiza la Experiencia 4 la cual no posee oleaje, característica que se puede apreciar en el espectro de la Figura 4.18. La no existencia de un peak marcado en las frecuencias más altas del espectro da una clara evidencia que la energía está contenida en fenómenos distintos a los conocidos en las experiencias anteriores. La energía entonces está concentrada en los grandes vórtices que se generan en el flujo.

La existencia del rango inercial se verifica ya que el espectro presenta un tramo con pendiente $-5/3$, de acuerdo a la ley de Kolmogorov, en el rango de frecuencias antes mencionadas.

Finalmente, la energía contenida en las frecuencias sobre los 10 Hz, corresponde al ruido del sensor de velocidad. En particular, se puede apreciar que el ruido contenido en el espectro de velocidad de la componente z, es siempre menor que las otras dos componente.

4.5.4 Correlación de Variables

4.5.4.1 Autocorrelación de las velocidades

La función de autocorrelación queda definida por la ecuación (2.14) revisada en la sección 2.2. Esta indica cuanto tiempo toma una variable del sistema para independizarse de si misma y de sus condiciones de borde originales. Es decir, durante cuanto tiempo un estado del sistema influencia los estados futuros en un instante dado de tiempo.

Se analizan solo 2 experiencias, la primera de ella será con corriente pero sin oleaje (Experiencia 4), mientras que la segunda tendrá corriente y un oleaje de período 3segundos (Experiencia 3), cuyas características se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Experiencias a realizar, análisis de Autocorrelación de las Velocidades.

	Experiencia	Experiencia
	4	3
Q [l/s]	2.50	1.00
T [s]	N/A	2.00

En la Figura 4.19, correspondiente a la Experiencia 4 sin oleaje, se puede apreciar que la autocorrelación pasa por cero a los pocos segundos de iniciada la medición. Esto último se puede interpretar como la escala de tiempo integral, lo que corresponde a la integral bajo la curva de la función de autocorrelación.

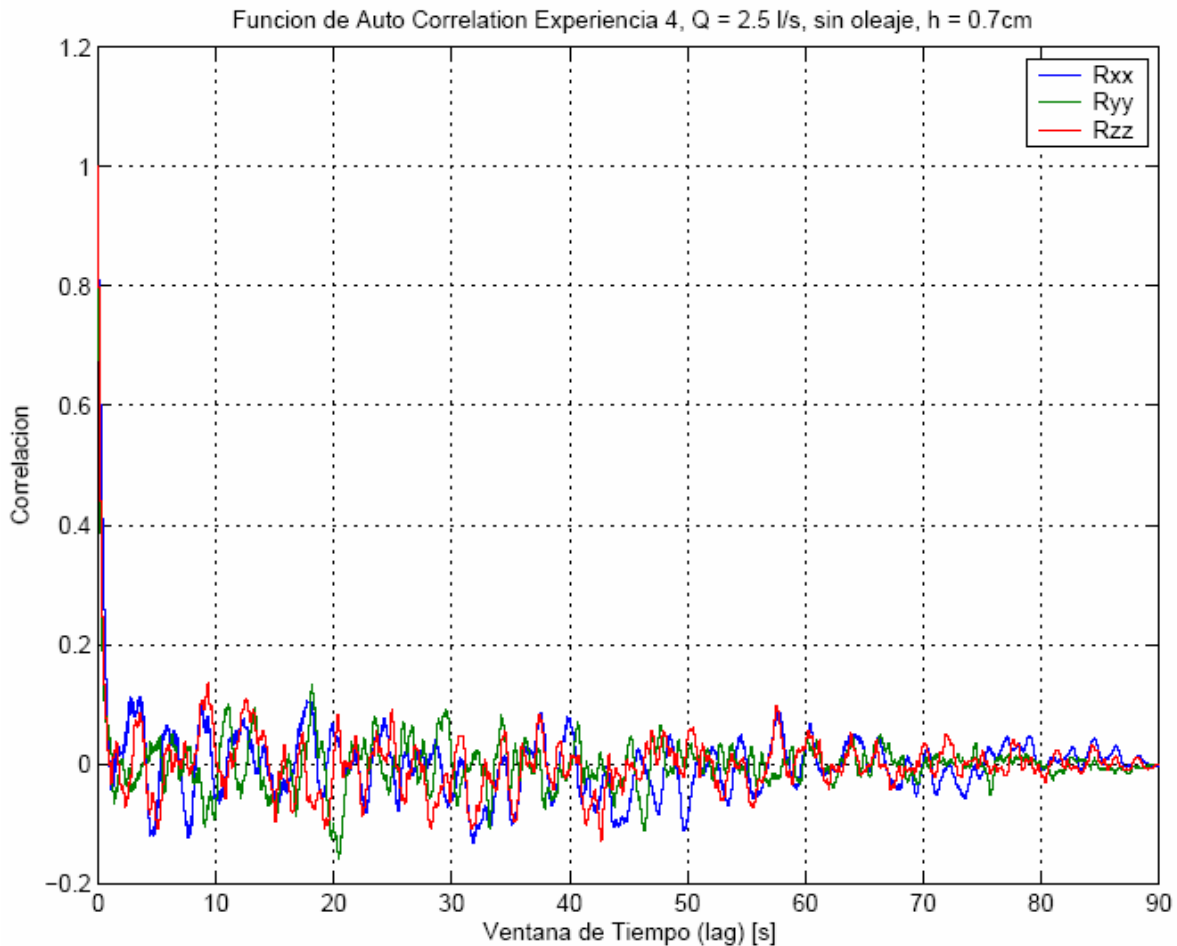


Figura 4.19: Autocorrelación de las Velocidades, Experiencia 4 sin oleaje.

La función de autocorrelación tiende a cero rápidamente, y se mantiene oscilando con una amplitud de 10% de correlación entorno al eje x. La convergencia indica que los datos rápidamente se independizan entre si, lo cual es bueno para realizar un análisis estadístico o espectral de la velocidad.

En la Figura 4.20 se presenta la función de autocorrelación de las 3 componentes de la velocidad media de la Experiencia 3, la cual contiene oleaje de período cercano a los 2 segundos.

Como era de esperarse, para las experiencias con oleaje, la función de autocorrelación es periódica con intervalos de tiempos igual al período del oleaje. El período del oleaje y el de la función de correlación es 2 segundos.

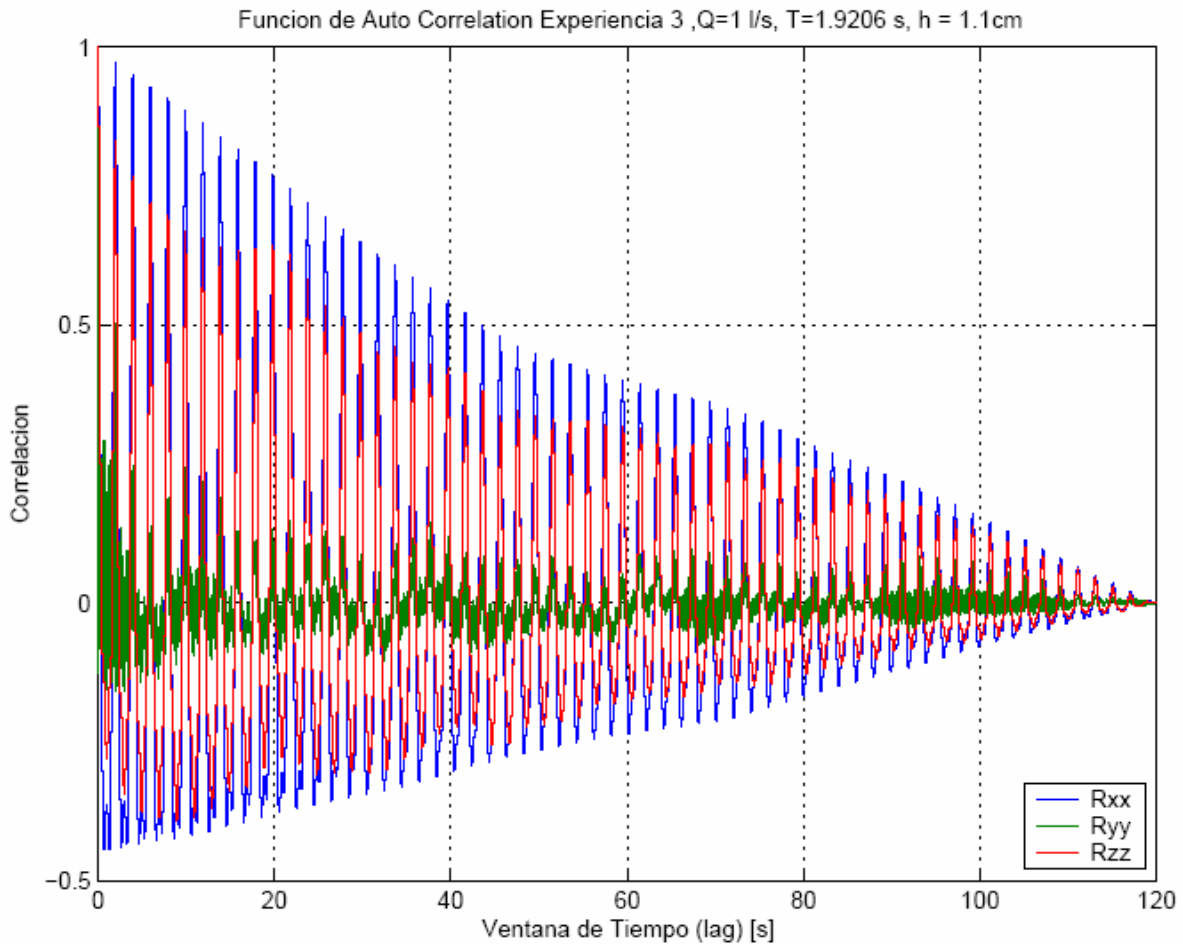


Figura 4.20: Autocorrelación de las Velocidades, Experiencia 3 con oleaje.

4.5.4.2 Correlación Cruzada

La correlación cruzada al igual que la autocorrelación, verifica la relación entre componentes de velocidad, pero esta vez no analiza la independencia de la información de una variable con sí misma, si no más bien con las otras componentes.

Se analizará para efectos prácticos las mismas experiencias anteriores (3 y 4) y en los mismos puntos. La Figura 4.21 correspondiente a la Experiencia 4, en la cual se presenta la correlación cruzada de las 3 componentes de velocidad.

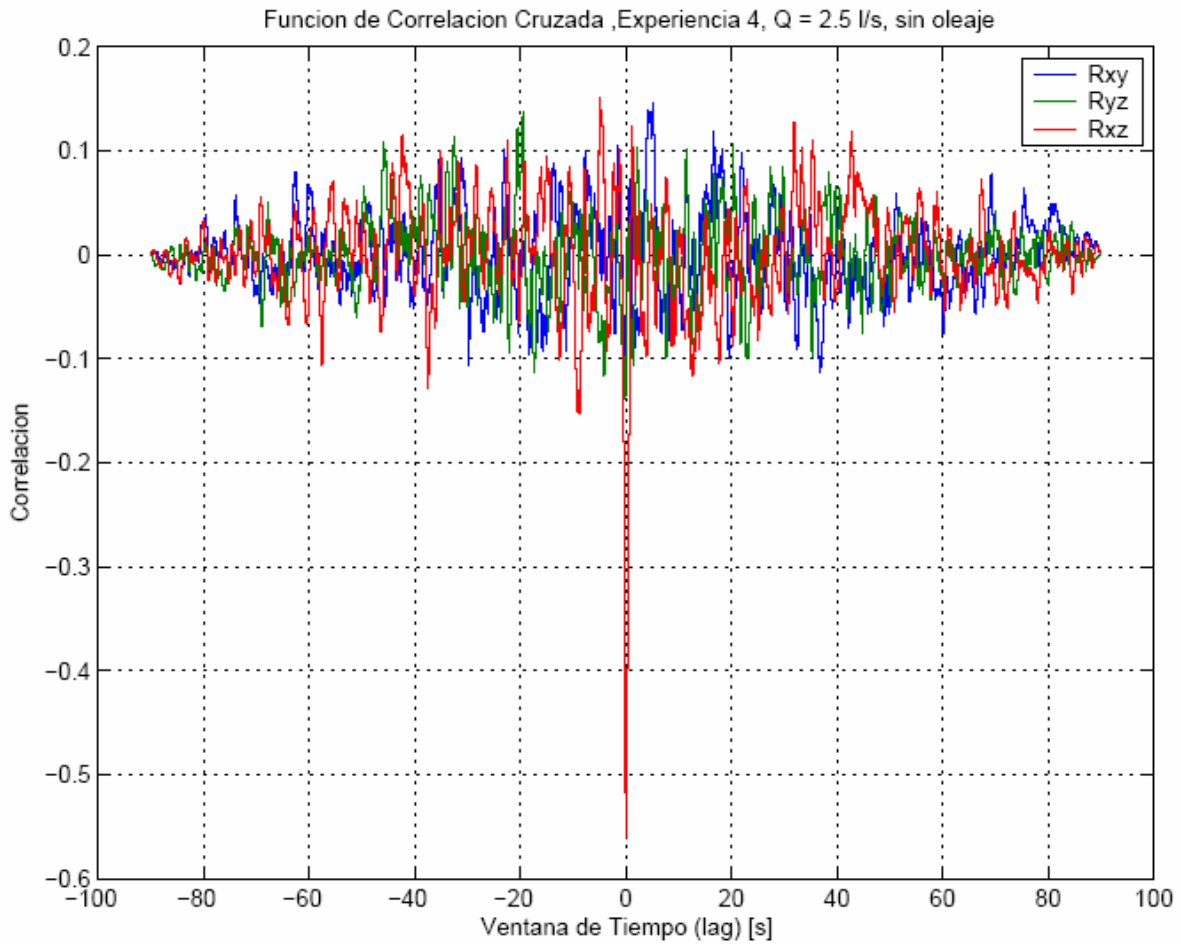


Figura 4.21: Correlación cruzada de las variables, Experiencia 1.

En la Figura 4.21 se puede observar que la correlación entre las componente de la velocidad vertical y horizontal es máximo para tiempo cercano a cero, esto último es la contribución de los esfuerzos de Reynolds, $\overline{u'w'}$. Las correlaciones entre las componentes de velocidad decaen rápidamente para tiempo pequeños, lo cual indica que las componentes se hacen independientes unas con otras en tiempo cortos.

La Figura 4.22 correspondiente a la Experiencia 3 con oleaje, en la cual se presenta la correlación cruzada de las 3 componentes de velocidad.

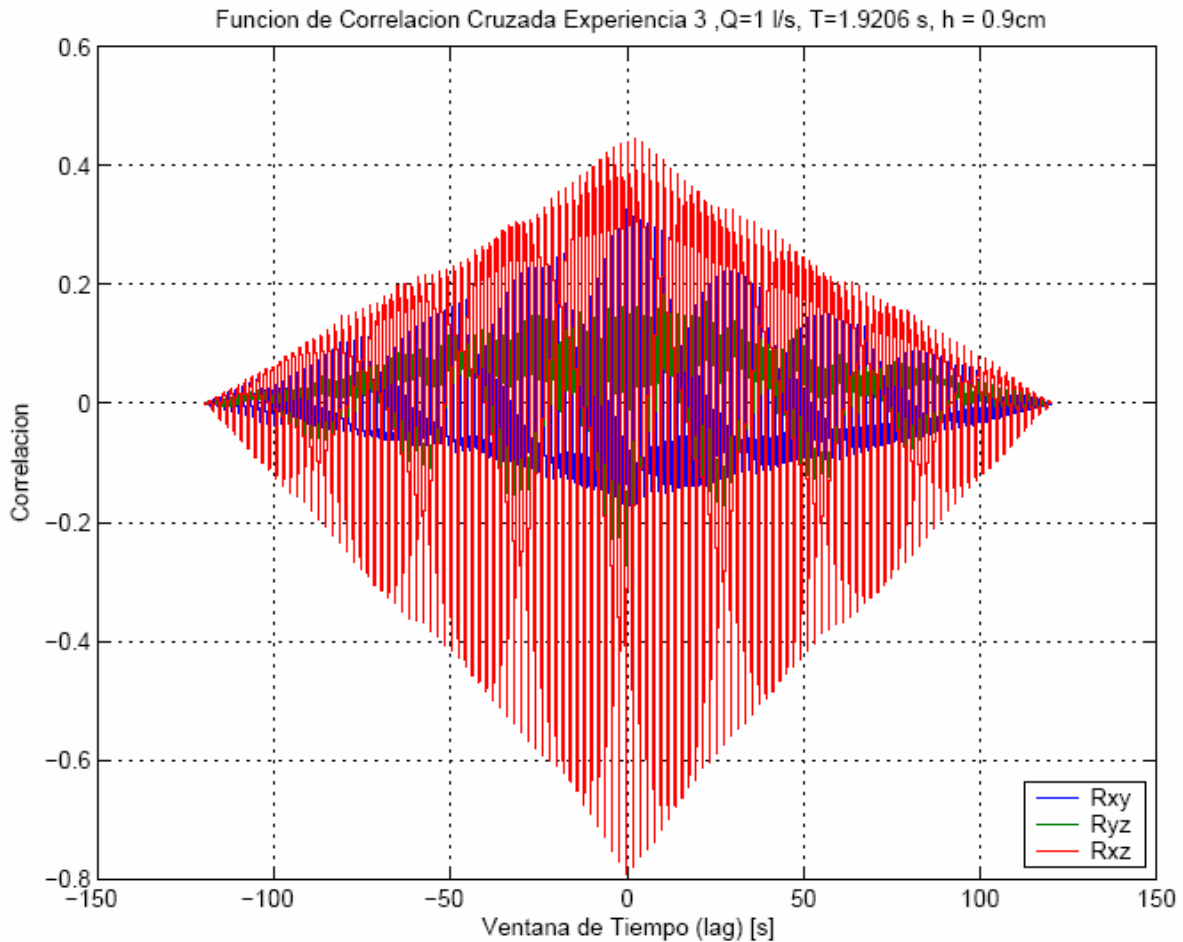


Figura 4.22: Correlación cruzada de las variables, Experiencia 3 con oleaje.

En la Experiencia 3 se puede apreciar un claro aumento de la correlación, esto se debe a que el flujo posee un oleaje monocromático y unidireccional de período constante y por tanto las velocidades en cada uno de los ejes también lo son, lo que conlleva a una correlación entre componentes.

Como se puede apreciar, la correlación entre las componentes de velocidad vertical y horizontal es siempre mayor que las otras 2, para todas las experiencias. Esto se debe a que las líneas de trayectorias en un sistema con oleaje son elípticas con período constante.

Finalmente se debe recordar que para realizar estadísticos es conveniente que no exista relación entre las variables. Además se determinó que el tiempo de medición debe ser mayor que la escala de tiempo integral.

4.6 Análisis Registro de Conductividad

Cada una de las 6 experiencias contiene 7 perfiles los cuales contienen 11 puntos cada uno. Cada medición fue realizada con una frecuencia de 50 Hz (datos por segundo) por un intervalo superior a 1 minuto. Debido a la gran cantidad de información recopilada durante las experiencias se hace necesaria la creación de una rutina en Matlab, la cual permite reducir los tiempos de cálculo y manejo de la información.

Todos estos análisis serán presentados en este trabajo mediante gráficos los cuales resumen en buena medida los resultados obtenidos de cada experiencia.

El primer análisis realizado por la rutina, corresponde a la estacionalidad de la conductividad, análisis que fue ya discutido en la sección 4.3, del cual se dedujo que el tiempo de medición mínimo fue de 90 segundos por punto de cada perfil.

4.6.1 Perfiles de Concentración

Se promedió la señal de conductividad de cada punto para cada perfil, para luego construir los 7 perfiles asociados a cada experiencia (ver Figura 3.6). A continuación se presentan los perfiles correspondientes a la Experiencia 2, ensayo que contiene oleaje de período 3 segundos y caudal de 1 l/s.

En la Figura 4.23, los perfiles se encuentran ordenados según la concentración, desde el perfil 1 hacia aguas abajo, hasta el perfil 7. Esto corresponde efectivamente al orden espacial de los perfiles, con lo que se concluye que la concentración aumenta hacia aguas abajo.

Como era de esperarse, la concentración de sal es máxima en las zonas cercanas al fondo decreciendo hasta la concentración de sal del agua potable en la zona cercana a la superficie libre. El flujo de agua potable que ingresa al canal evita la mezcla completa en la columna de agua generando además un alto gradiente de concentraciones.

En el Capítulo 5, se analizará el efecto del oleaje sobre las tasas de transporte de masa desde los sedimentos y la distribución de concentración en la columna de agua

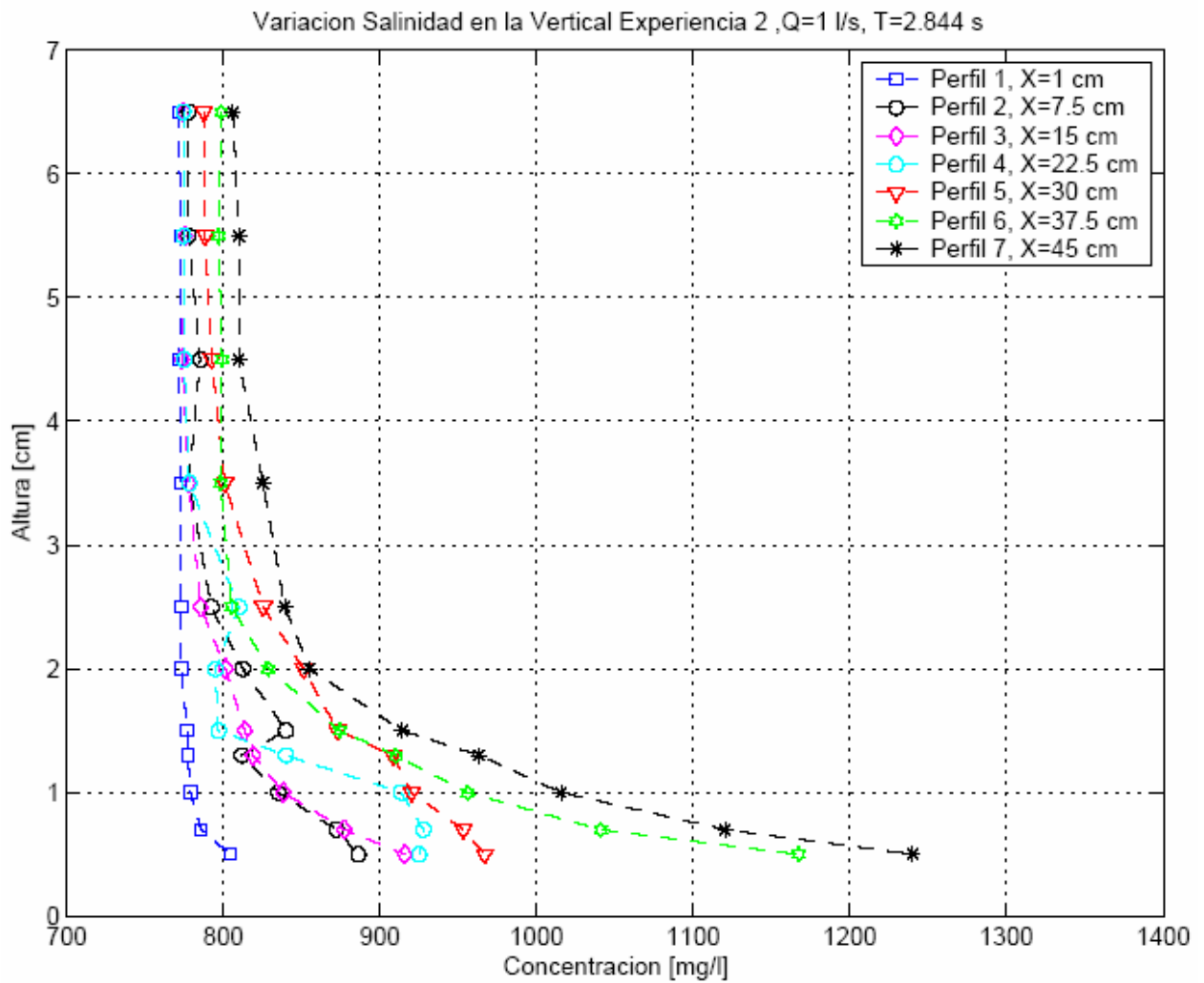


Figura 4.23: Perfiles de Concentración, Experiencia 2.

4.6.2 Masa total incorporada a la columna de agua y flujo másico

Una vez determinados los perfiles de concentración se procedió a determinar la masa total incorporada al sistema en cada perfil. Para esto, se promedió la concentración en toda la columna representada por un perfil.

$$M(x) = \int_0^h C(x, z) dz \quad (4.14)$$

A continuación se grafica masa por unidad de ancho de canal versus distancia dentro del volumen de control. Además se adjuntan dos curvas de tendencias, la primera, de color verde, corresponde a una de tipo lineal y la segunda de color azul corresponde a una polinomial de segundo orden.

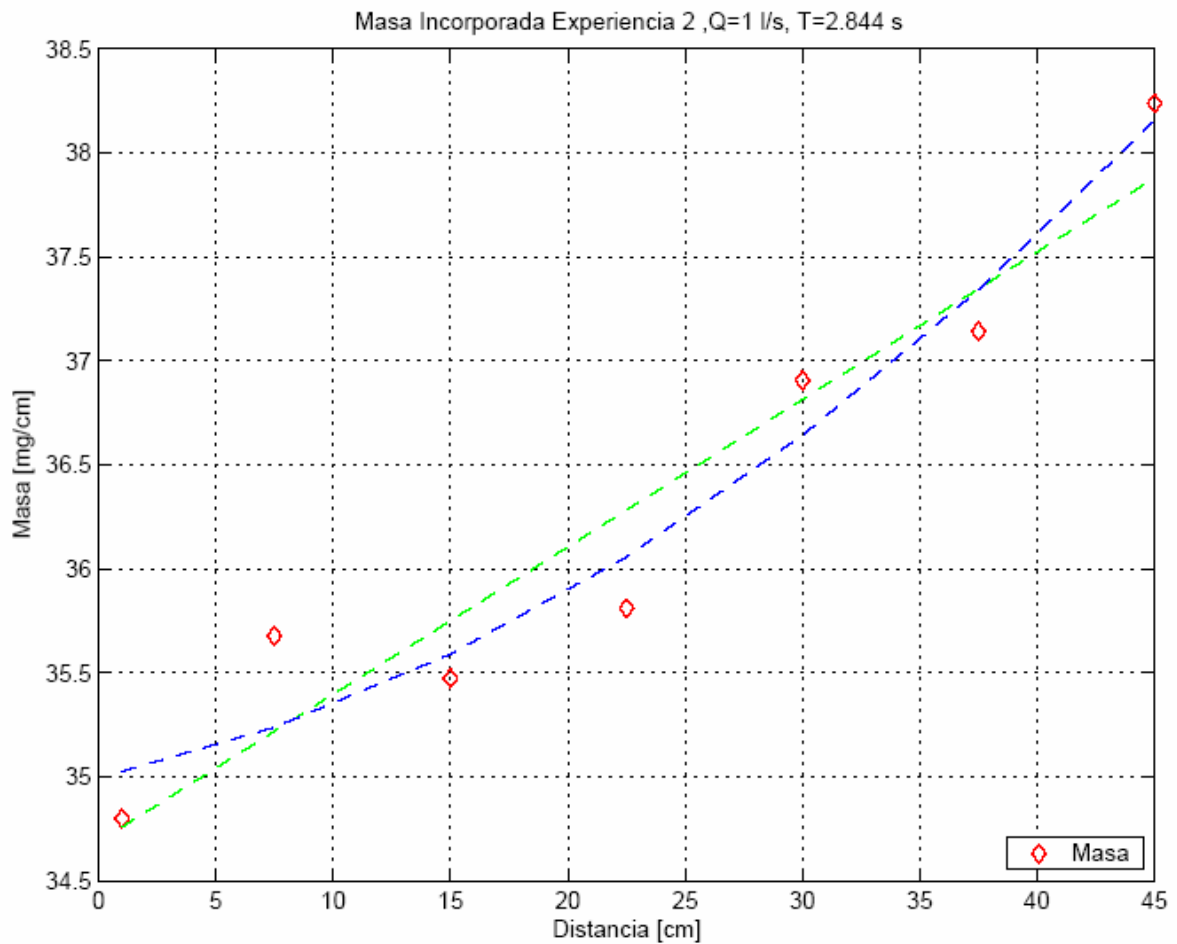


Figura 4.24: Perfil de masa incorporada, Experiencia 2.

De la Figura 4.24 se observa que existe un incremento de la masa incorporada al sistema hacia aguas abajo (recordar que el perfil 1 se encuentra aguas arriba, $x = 1\text{cm}$). Se puede aproximar en forma aceptable una tendencia lineal de incremento de masa (línea en color verde). Este resultado es similar al obtenido en estudios anteriores (Reiher 2004), donde considerando una velocidad media constante, la masa total incorporada al sistema es creciente con el tiempo.

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE EXPERIENCIAS

5.1 Introducción

El principal objetivo de este estudio consiste en determinar los efectos que produce el oleaje sobre la transferencia de masa desde los sedimentos hacia la columna de agua, mediante el análisis de la estructura del flujo y la turbulencia. Para esto se realizaron 6 experiencias las cuales se pueden subdividir en 2 grupos de distinto caudal. Cada grupo de igual caudal contiene 3 experiencias, una sin oleaje y 2 con oleaje de distinto período (ver Tabla 3.3). La metodología descrita en los capítulos precedentes permite contrastar experiencias sin oleaje con las que sí poseen, para así poder determinar de forma cualitativa los efectos sobre la turbulencia y mezcla.

Si bien la comparación de los perfiles de velocidad están bien estudiados en trabajos anteriores (Guzmán 2006), es de gran interés volver a analizarlos para así poder realizar análisis comparativos de la estructura de la turbulencia en cada caso.

5.2 Perfiles de Velocidad Media

En la Figura 5.1 se han presentado los perfiles de velocidad media de todas las experiencias. Estos perfiles corresponden al promedio de la serie de velocidades obtenidas por el ADV. Es evidente que se experimentaron 2 grupos caudales distintos, tema que ya ha sido visto en capítulos anteriores, pero que puede ser observado en la Figura 5.1.

Para las experiencias de velocidad baja se puede apreciar que esta variable no tuvo variaciones significativas en cada experiencia, es decir, que el oleaje no afecta mayormente el perfil de velocidad, obteniéndose una velocidad media de 2.8 cm/s. Para el caso de las experiencias que poseen un mayor caudal, se puede observar que el oleaje tiene el efecto de disminuir la velocidad del flujo, sobre todo en la zona más cercana a la superficie libre, en mayor magnitud a medida que el período aumenta. La Experiencia 4 presenta una diferencia de velocidad media de 1 cm/s con respecto a la Experiencia 5 y 6, diferencia que es despreciable al momento de analizar los perfiles adimensionales.

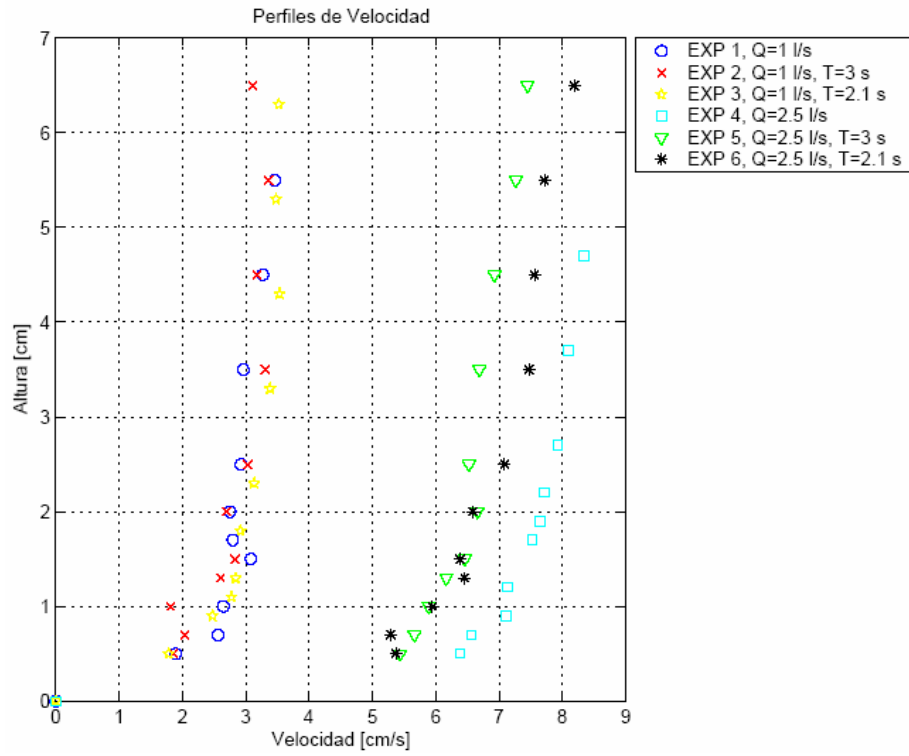


Figura 5.1: Perfiles de Velocidad Media

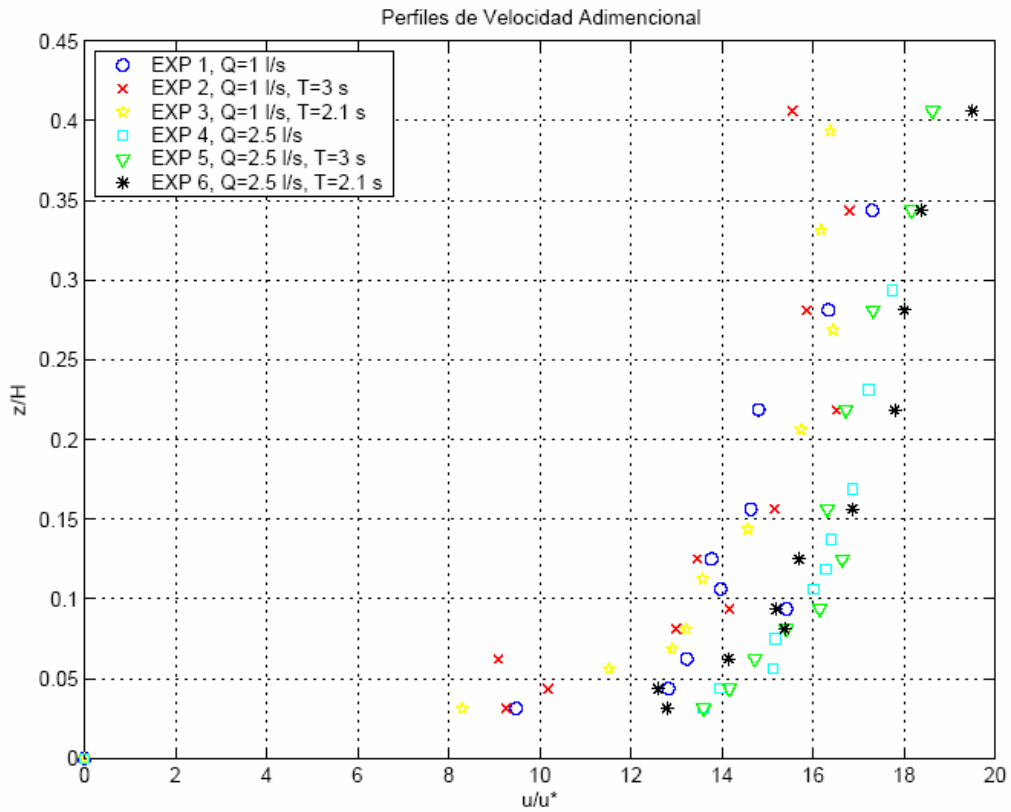


Figura 5.2: Perfiles de Velocidad Media Adimensionalizado

5.3 Perfiles de Energía Cinética Turbulenta

La Energía Cinética Turbulenta está directamente relacionada con la capacidad de mezcla de la columna de agua y de la solución salina incorporada a ésta, y por lo tanto con la transferencia de masa entre los sedimentos y la columna. Es por este motivo que se hace necesario analizar comparativamente los perfiles de energía cinética turbulenta para cada experiencia y así poder relacionar los efectos provocados por el oleaje.

En Figura 5.3 y Figura 5.4 se grafica la energía cinética turbulenta para las experiencias 1, 2, 3 y 4, 5, 6 respectivamente. Se ha adimensionalizado la energía cinética turbulenta, K , mediante la velocidad de corte, u_* , y la profundidad z mediante la altura total de escurrimiento H (16 cm).

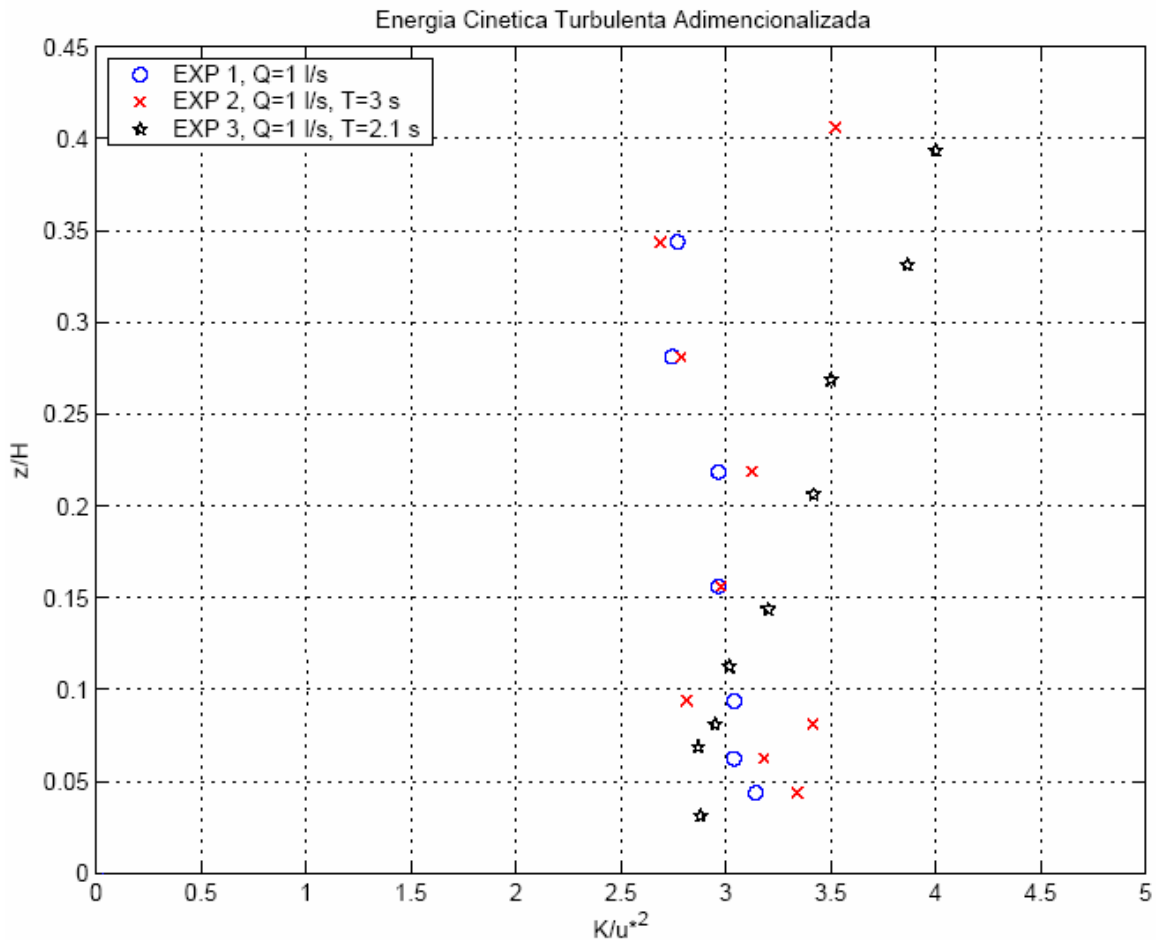


Figura 5.3: Energía Cinética Turbulenta adimensionalizada, Experiencias 1,2 y 3.

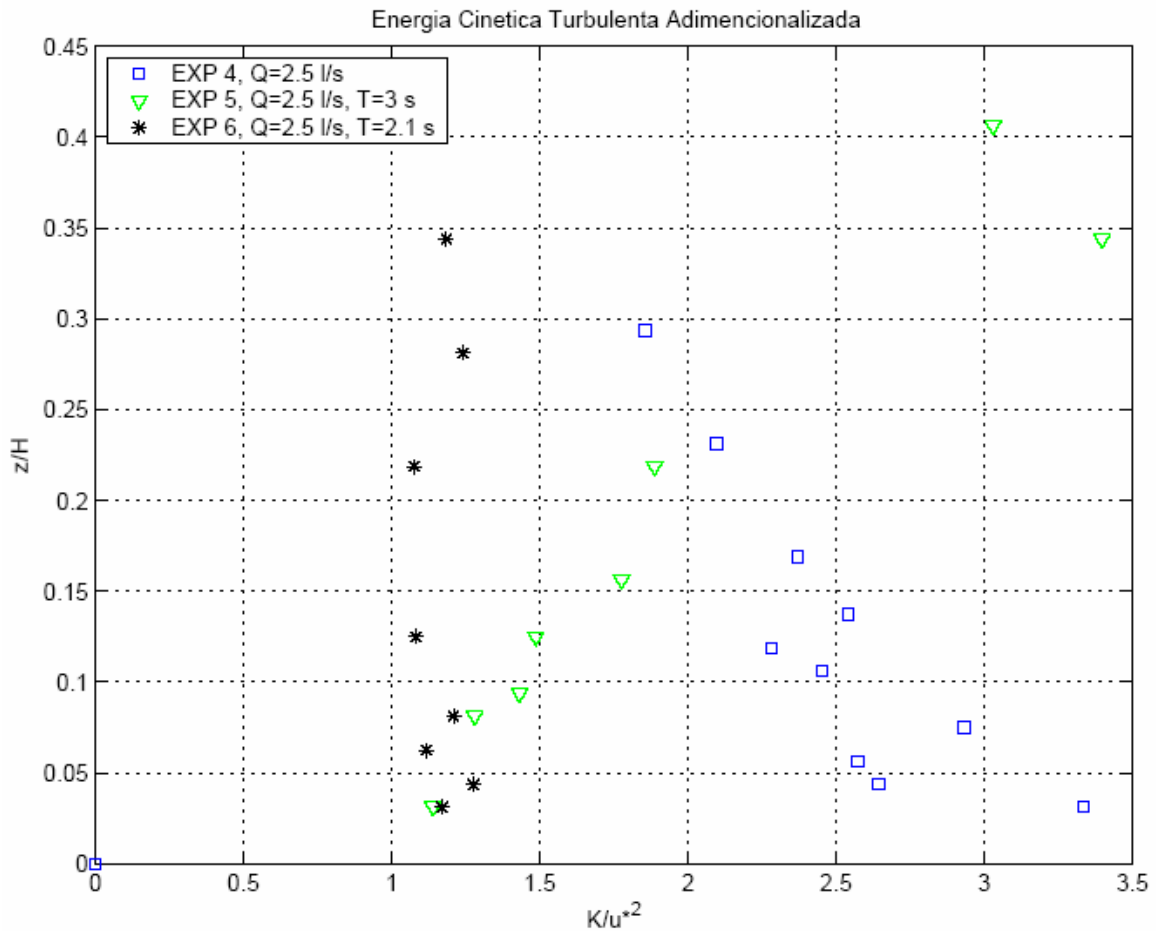


Figura 5.4: Energía Cinética Turbulenta adimensionalizada. Experiencias 4,5 y 6.

En las figuras anteriores se puede observar que la energía cinética turbulenta para las experiencias sin oleaje (Experiencia 4) es decreciente con respecto a la altura, es decir la energía es máxima cerca del fondo. Esto es provocado por los altos gradientes de velocidad que ocurren en las cercanías del fondo. Luego, las experiencias con oleaje, presentan un aumento en la intensidad de la turbulencia en la zona cercana a la superficie libre, esto último es más pronunciado en la experiencia 3 (Figura 5.3), la cual posee una mayor frecuencia y por ende una mayor agitación,

Lamentablemente, con las cuatro experiencias con oleaje, no se puede definir una relación empírica entre el aumento de la energía cinética turbulenta y la frecuencia de oleaje. Según la Figura 5.3 las altas frecuencias de oleaje provocan un aumento de la energía cinética turbulenta.

5.4 Perfiles de Concentración

Se realizó un análisis comparativo de los perfiles de concentración entre las experiencias con y sin oleaje. Con el fin de no saturar una imagen con demasiada información se utilizan 3 gráficos, uno correspondiente a la Experiencia 1, la cual no posee oleaje y un caudal de 1 l/s (Figura 5.5), el segundo corresponde a la Experiencia 2, la que sí posee un oleaje de 3 segundos de período (Figura 5.6) y el tercero corresponde a la Experiencia 3 que posee una oleaje de 2 segundos (Figura 5.7), estas últimas experiencias poseen igual caudal. Los perfiles de las experiencias restantes se encuentran en el Anexo II.

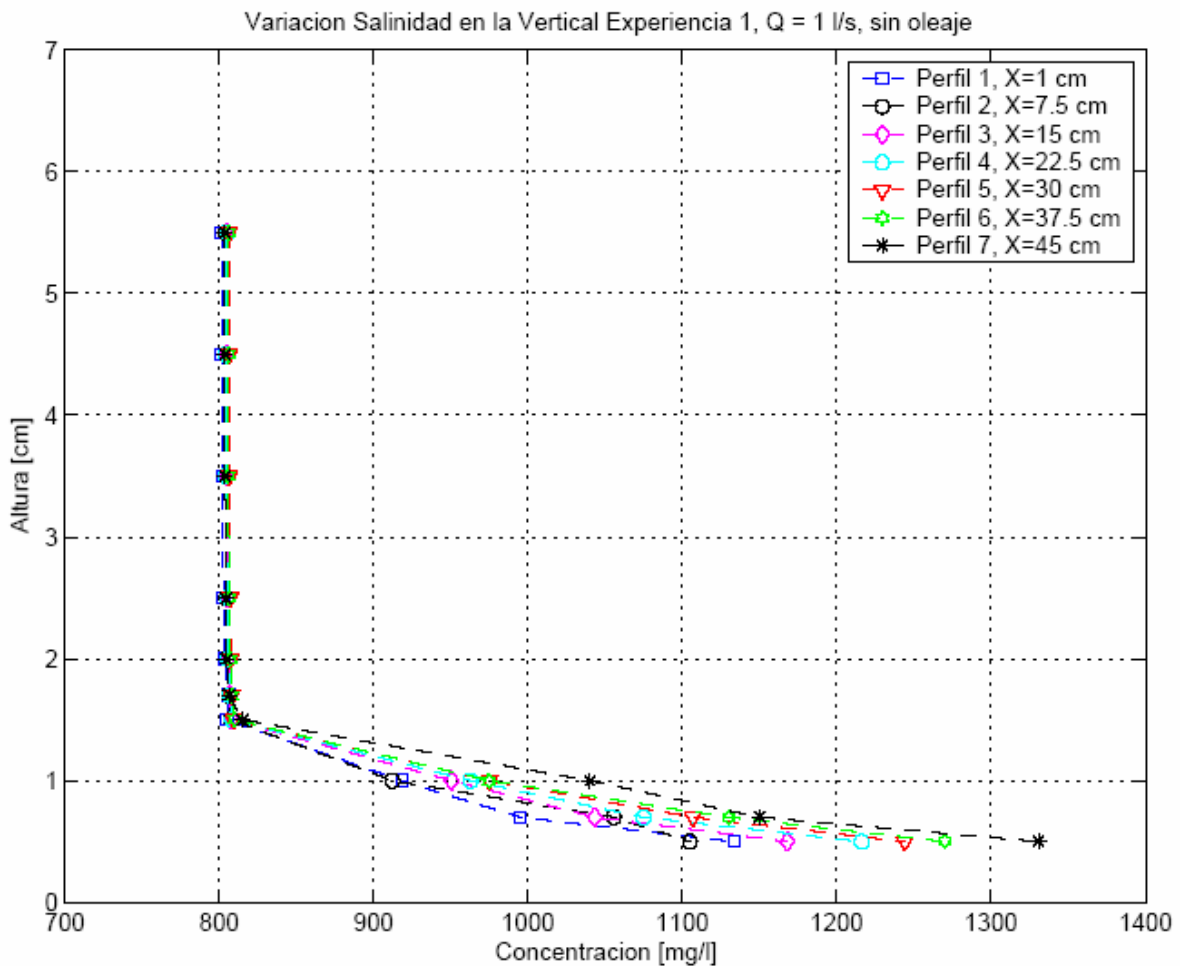


Figura 5.5: Perfiles de concentración Experiencia 1.

De la Figura 5.5 se concluye que la concentración de sal cerca al fondo es muy elevada y por lo tanto existe una estratificación, lo cual se hizo evidente al momento de hacer los experimentos. Esta estratificación se produce por la diferencia de densidades entre el agua potable que circula

en el canal y la solución salina que es inyectada en los sedimento la cual posee una concentración de NaCl de 3.5%. En la Experiencia 1 (Figura 5.5), se observa que no existe un aumento de la concentración de sal en la vertical para alturas sobre los 1.5 cm del fondo, es decir, las curvas son verticales y todas colapsan en una misma concentración (Salinidad 0%, ver Tabla 3.1). Esto puede deberse a la baja velocidad del flujo, el cual no tiene la capacidad de mezcla, lo que es consistente con el perfil de energía cinética turbulenta, en donde se aprecia que la energía cinética en las zonas altas, es mínima. Además, se observa que la haloclina, definida como la interfaz de la columna de agua en la que la salinidad del agua cambia rápidamente con la profundidad, tiende a ubicarse a los $z = 1.5$ cm del fondo, fenómeno que no se aprecia en las experiencias con oleaje (Figura 5.6).

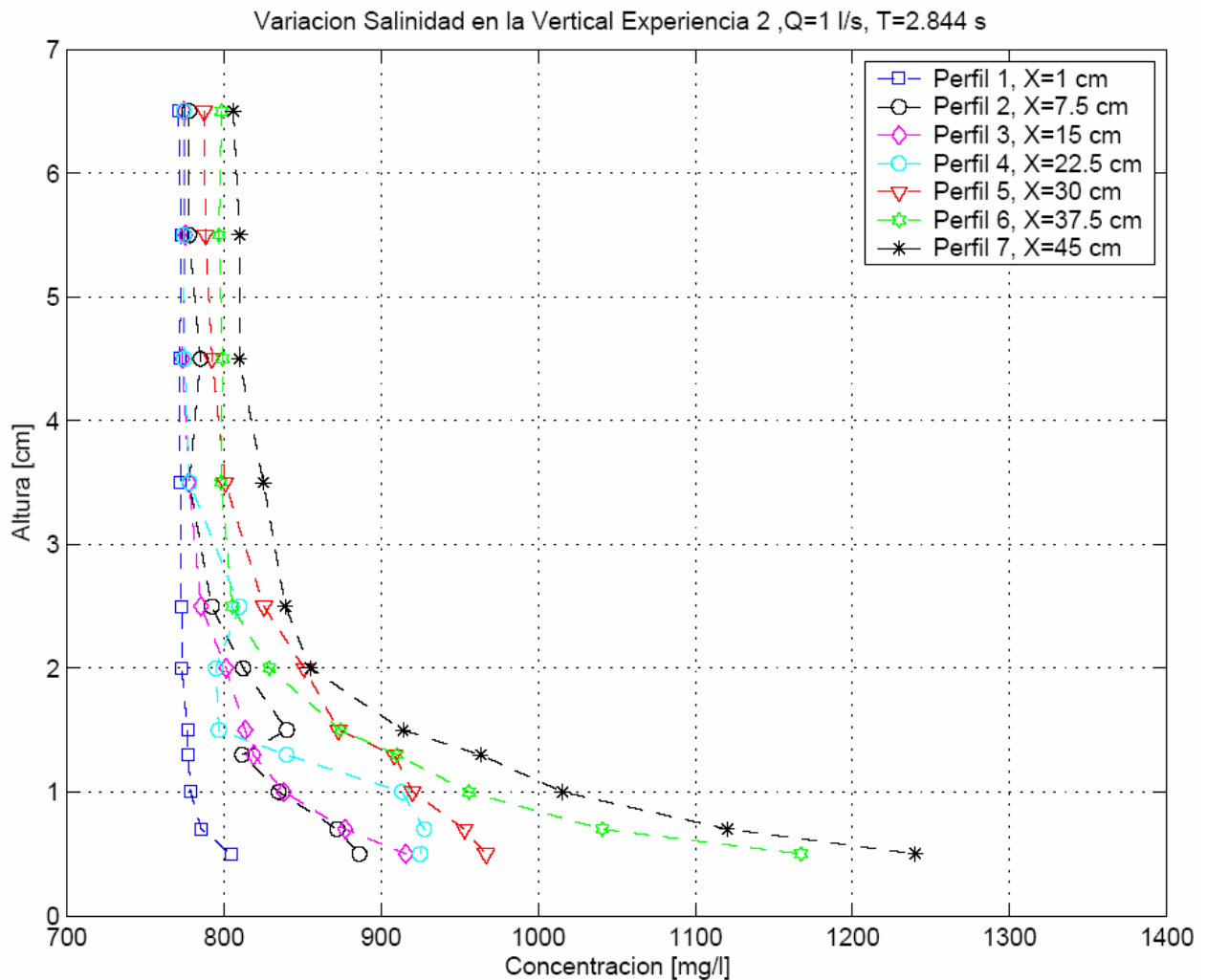


Figura 5.6: Perfiles de concentración Experiencia 2, con oleaje.

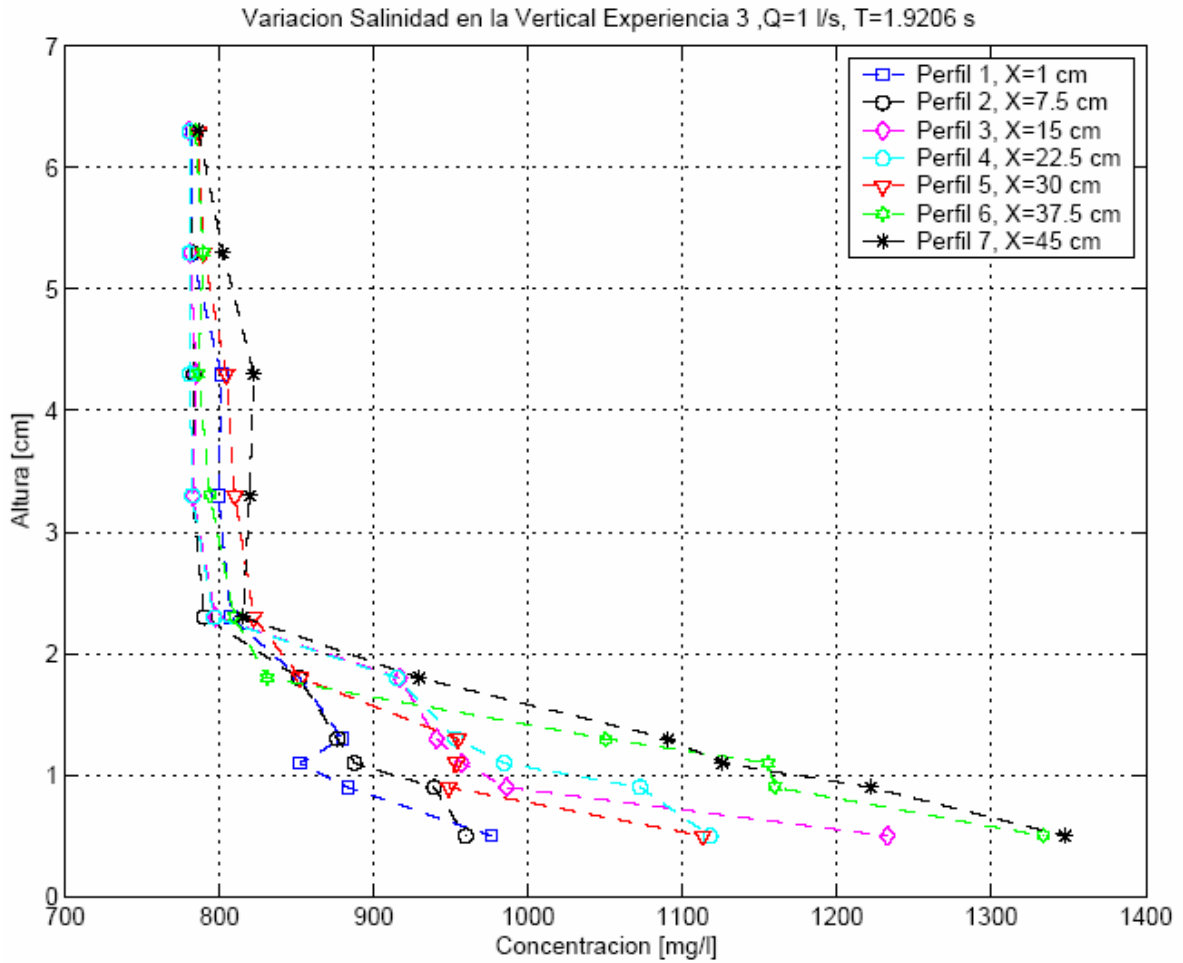


Figura 5.7: Perfiles de concentración Experiencia 3, con oleaje.

Como ya se comentó con anterioridad, existe un evidente aumento de la concentración hacia aguas abajo para todas las experiencias, lo que provoca el desplazamiento de los perfiles hacia la derecha. Sin embargo, los perfiles correspondientes a las experiencias con oleaje presentan un mayor desplazamiento hacia aguas abajo. Este fenómeno es provocado por el flujo advectivo que genera el oleaje, mientras que en las zonas cercana la fondo la difusión turbulenta provoca un aumento de las concentraciones en la vertical, situando la haloclina sobre los 2.3 cm,

5.5 Perfiles de Flujo Másico

Se determinaron los perfiles de flujo másico en función de la distancia en el volumen de control, para todas experiencias según la Ecuación 4.6. A continuación en la Figura 5.8, se grafican los flujos másico de las experiencias que poseen un caudal de 1 l/s, mientras que las experiencias que poseen un caudal de 2.5 l/s son presentadas en la Figura 5.9.

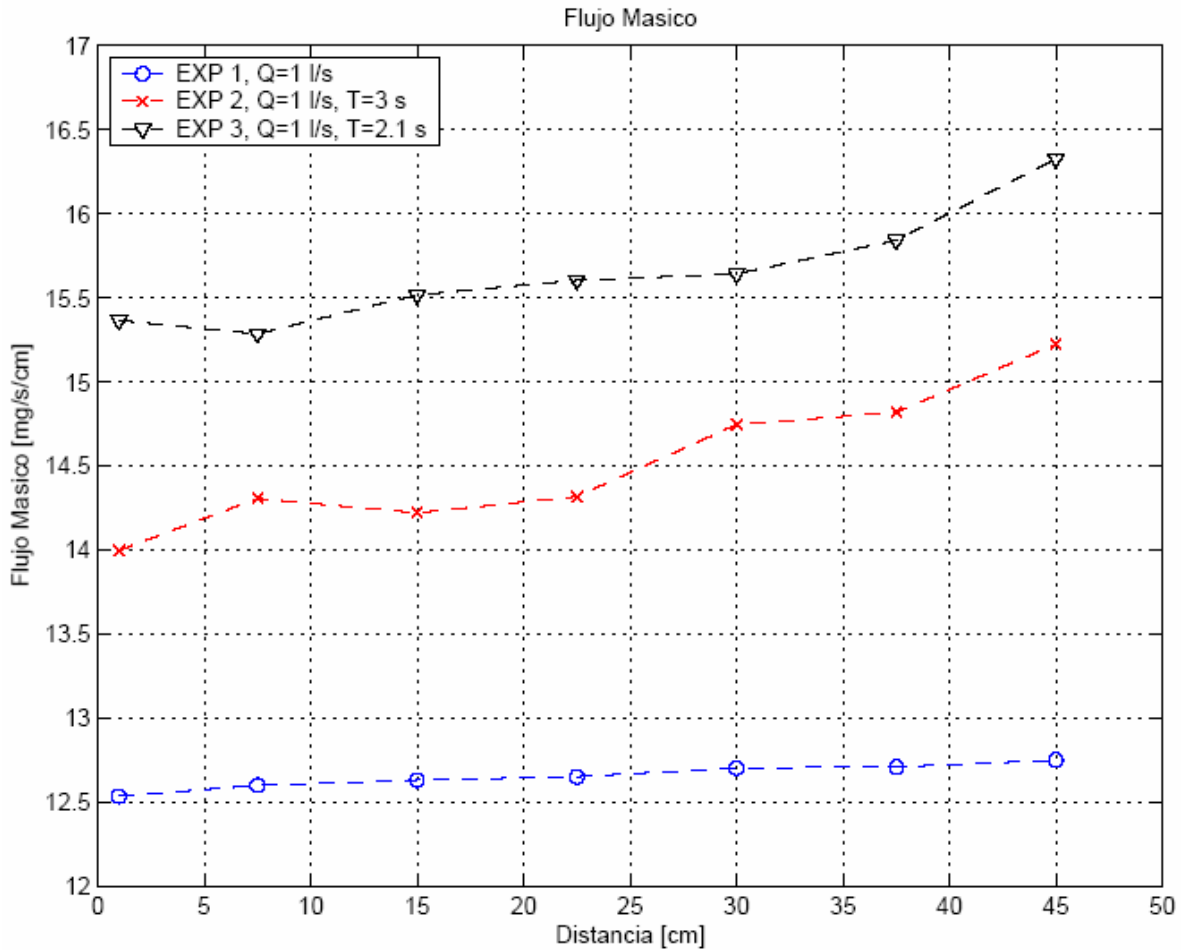


Figura 5.8: Perfiles de Flujo Másico, Experiencias con caudal 1 l/s

En la Figura 5.8 se puede observar que el flujo másico es creciente hacia aguas abajo, lo que es consecuente con los perfiles de concentración antes mostrados. El oleaje provoca que la pendiente de las curvas sea más vertical (Experiencia 2 y Experiencia 3) que el en el caso de la experiencia 1 (sin oleaje), es decir, existe un mayor flujo másico en las experiencias con oleaje. Se concluye que existe una mayor tasa de transferencia cuando el sistema está en presencia de oleaje. Además, se puede apreciar en ambas figuras, que las curvas que están relacionadas con experiencias que poseen oleaje, están por sobre las que no poseen oleaje, es decir, las olas superpuestas a la corriente aumentan la transferencia de soluto desde los sedimentos hacia la columna de agua.

Finalmente, las experiencias que fueron realizadas con un caudal de 2.5 l/s (Figura 5.9), poseen en general un mayor gasto másico, esto último, comparando experiencias con igual período de ola.

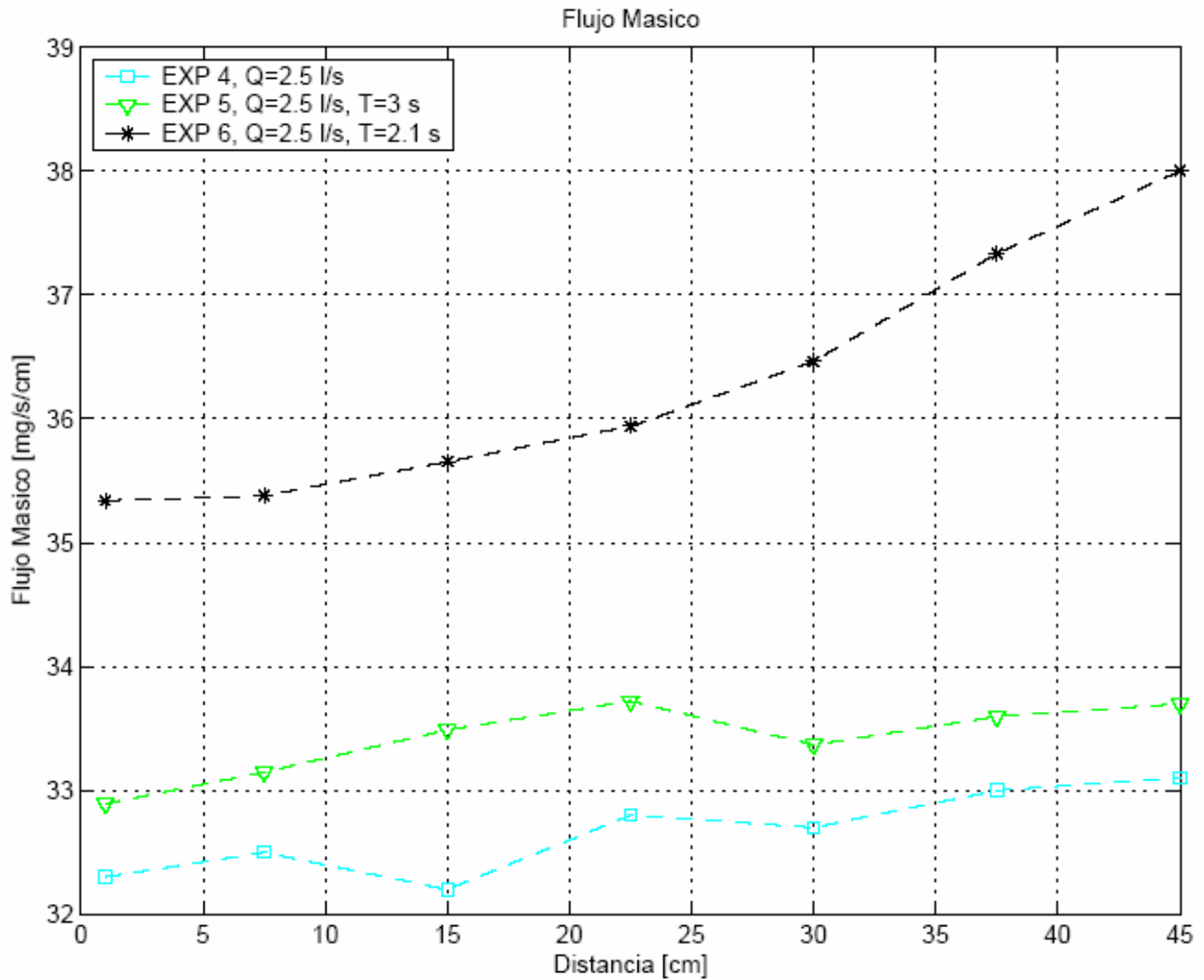


Figura 5.9: Perfiles de Flujo Másico, Experiencias con caudal 2.5 l/s

El oleaje provoca un aumento en las tasas de transferencia de masa, esto en gran medida es provocado por el flujo advectivo en la dirección z. La distribución de velocidades de una ola depende de la fase de esta, por ejemplo, en la cresta de la ola la componente en la dirección x será máxima en el sentido de propagación del oleaje, mientras que la componente en la dirección z será nula, a su vez, en los nodos de la onda, la componente en la dirección x será 0 y la componente en la dirección z será máxima o mínima dependiendo de la dirección de propagación del oleaje (ver Figura 5.10). Esta distribución de velocidades en el oleaje es igual para trayectorias circulares (aguas profundas) o hiperbólica (aguas someras),

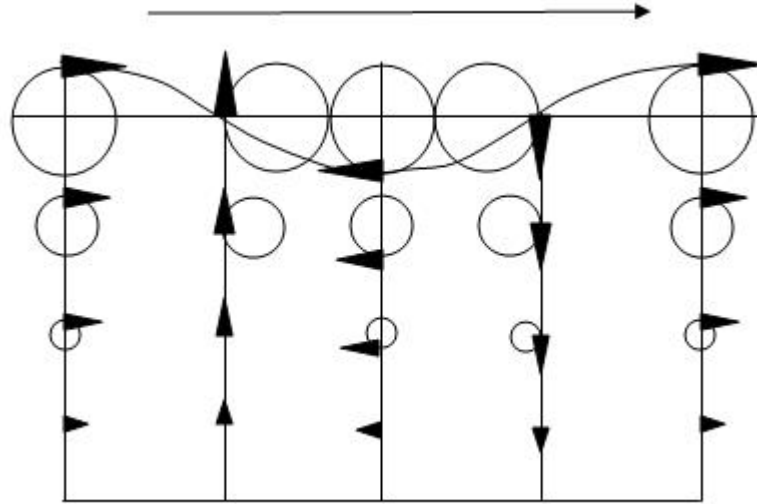


Figura 5.10: Distribución de velocidades en oleaje

Si la componente vertical de la velocidad es máxima en un nodo, es de esperarse que la concentración de sal aumente en dicho punto, es decir, la señal de concentración es periódica de igual forma que la señal de velocidad y de altura. En la Figura 5.11, correspondiente a la Experiencia 5 con oleaje de período 3 segundos, se presenta un trozo de la señal de altura de ola superpuesta con una de concentración de sal, en la cual se puede apreciar que la concentración de sal aumenta en forma periódica en uno de los nodos de la ola en donde la componente vertical de la velocidad es máxima.

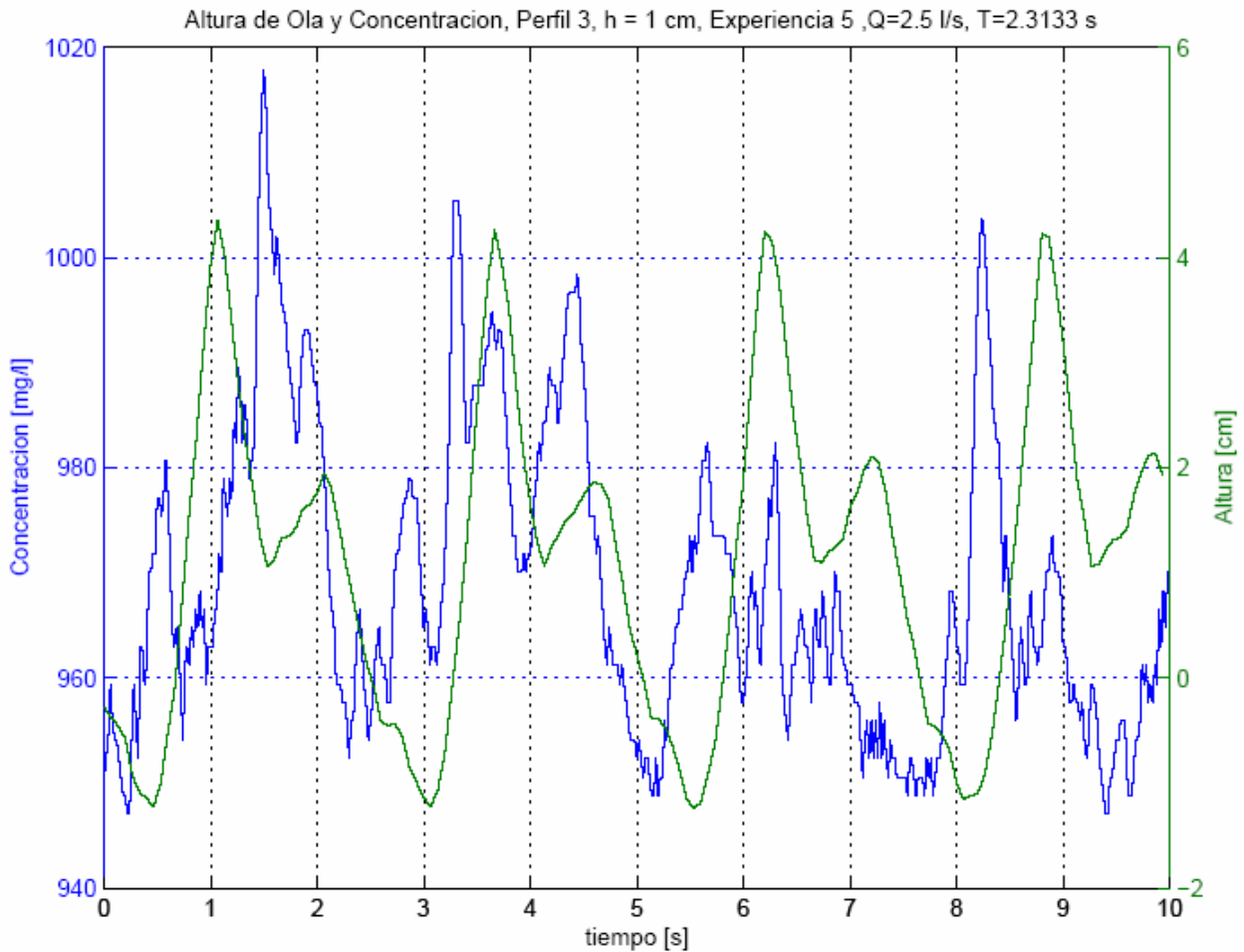


Figura 5.11: Señal de altura de ola y concentración de sal

5.6 Coeficiente de intercambio Masa, k_L .

Ordenando la ecuación de advección-difusión (Ecuación 5.1) y promediando sobre la turbulencia (Ecuación 5.2) se puede describir matemáticamente el problema en consideración. De la Ecuación 5.2 se reconocen los siguientes términos de izquierda a derecha; el primero corresponde al cambio impermanente de la concentración media, el segundo término está relacionado con el flujo advectivo medio y difusivo (turbulento y molecular) respectivamente en la dirección x . Finalmente el tercer término, de igual forma que el segundo, corresponde a el flujo advectivo medio y difusivo total en la dirección z .

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}\bar{C}}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + D_z \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{u} \cdot \bar{C} - D_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{w} \cdot \bar{C} - D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) = 0 \quad (5.2)$$

Donde:

\bar{u} : Velocidad media horizontal

\bar{w} : Velocidad media vertical

\bar{C} : Concentración media de Sal.

D_i : Difusividad Total en la dirección i.

Es importante notar que en el segundo término, los efectos advectivos en la dirección del flujo son en magnitud mucho mayor que los difusivos. Considerando régimen permanente e integrando espacialmente en toda la columna de agua, se obtiene la siguiente expresión,

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h \bar{u} \cdot \bar{C} dz + \int_0^h \frac{\partial \bar{w} \bar{C}}{\partial z} \cdot dz - \frac{\partial}{\partial z} \int_0^h D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} dz = 0 \quad (5.3)$$

Resolviendo la ecuación anterior, considerando que el primer término corresponde al gasto másico advectivo, G_m , y que el segundo término es cero debido a que no existe flujo advectivo en la dirección z, se obtiene:

$$\frac{\partial G_m}{\partial x} + \left(D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \Big|_h - D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \Big|_o \right) = 0 \quad (5.4)$$

Finalmente, considerando que no existe flujo a través de la superficie libre, se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{\partial G_{mx}}{\partial x} - D_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \Big|_o = 0 \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial G_{mx}}{\partial x} - G_{mz=o} = 0 \quad (5.6)$$

Donde:

G_{mx} : Flujo másico advectivo en la dirección x

$G_{mz=0}$: Flujo másico difusivo a través de los sedimentos hacia la columna de agua.

Luego, considerando un modelo lineal de flujo másico hacia la columna (Dade 1993), se puede introducir un valor de coeficiente de intercambio masa, k_L , tal que:

$$G_{mz=0} = \frac{dM}{dt} = k_L \cdot (C_{sed} - \overline{C_w}) \quad (5.7)$$

Donde:

k_L : Coeficiente de intercambio de masa

C_{sed} : Concentración de NaCl en los sedimentos

$\overline{C_w}$: Concentración media de NaCl en la columna de agua.

El valor de la concentración de NaCl en los sedimentos, se determinó mediante las muestras extraídas en el modelo, mientras que la concentración media de NaCl en la columna de agua se determinó mediante el promedio de la concentración del perfil solo en la zona estratificada.

En la Tabla 5.1 se presentan los valores del coeficiente intercambio de masa obtenido para cada experiencia. Además se determinó el número de Sherwood, Sh, el cual permite realizar una comparación entre experiencias graficándolo en función del número de Reynolds de cada experiencia definido en función de u_* .

Tabla 5.1: Coeficiente de Intercambio de masa

	EXP 1	EXP2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6
Q [l/s]	1	1	1	2.5	2.5	2.5
T [s]	0	3	2.1	0	3	2.1
u^* [cm/s]	0.2	0.2	0.215	0.4	0.47	0.42
n/u^* [cm]	0.05	0.05	0.05	0.025	0.021	0.024
dv [cm]	0.5	0.5	0.47	0.25	0.21	0.24
δd [cm]	0.057	0.057	0.053	0.024	0.029	0.027
Re	4537	4336	4776	10347	11909	10773
kl [cm/s]	0.0001215	0.0005990	0.0005207	0.0003651	0.0013993	0.0014224
Sh	131.0	645.8	561.4	393.6	1508.7	1533.6

Los resultados obtenidos se resumen en un modelo simple de transferencia de masa, expresado en función del coeficiente de intercambio de masa. Además, se concluye que k_L , adimensionalizado

en la forma del número de Sherwood es una función lineal del número de Reynolds del flujo. El coeficiente de intercambio de masa para las experiencias con oleaje resulta ser mayor para las que poseen oleaje y un mayor caudal, esto se ve representado mediante la adimensionalización en el número de Sherwood. (ver Figura 5.12: Número de Sherwood y Número de Reynolds).

$$Sh = \frac{k_L \cdot H}{D}, \quad Re = \frac{u_* H}{\nu}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}$$

Donde:

k_L : Coeficiente de transferencia de masa

D : Coeficiente de difusión de sal en el agua ($1.484 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)

u_* : Velocidad de Corte

ν : Viscosidad Cinemática

El valor de k_L es afectado directamente en su magnitud por la concentración C_{sed} que se considere. La determinación exacta de la concentración de sal en las cercanías de la interfaz ($z = 0$), resulta incierta en estos ensayos y en la instalación experimental solo se tiene registros de la concentración media en el lecho. Es importante tener presente que la concentración en la interfaz es menor que la registrada en el modelo.

En la Figura 5.12 se presentan la experiencias obtenidas de este estudio y de las experiencias de Hondzo (1999), obtenidas en un estudio de transferencia de oxígeno disuelto en la interfaz agua-sedimento.

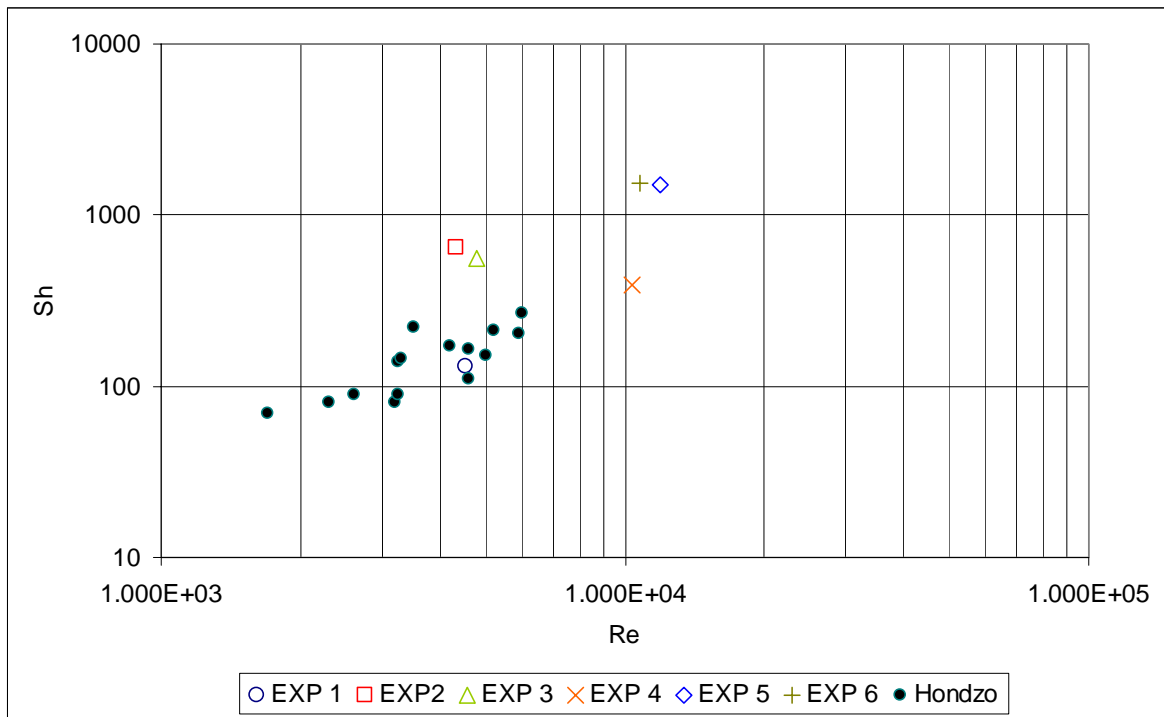


Figura 5.12: Número de Sherwood y Número de Reynolds

Investigadores han presentado funciones de la transferencia de masa en términos del número de Sherwood, número de Reynolds y del número de Schmidt, mediante una correlación del tipo $Sh = a Re^b Sc^{1/3}$, (ejemplos: Probstein et al., 1972; Isaacson and Sonin, 1976; Incropera and Dewit, 1990; Hondzo, 1999). Los valores de las constantes a y b son obtenidos típicamente por mediciones experimentales, Hondzo por su parte determinó que los valores de a y b son 0.012 y 0.89 respectivamente.

De la Figura 5.9 se concluye que existe una buena correlación de la información con los resultados obtenidos por Hondzo. El comportamiento de las experiencias sin oleaje (puntos rojos circulares), tienen un comportamiento similar al obtenido por Hondzo, mientras que las experiencias con oleaje (triángulos azules) hacen evidente que poseen un coeficiente de transporte de masa mucho mayor.

CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El generador de oleaje, el controlador de posicionamiento vertical y los softwares implementados permitieron trabajar en el sistema de forma eficiente y cómoda, lo que permite realizar mediciones extensas en la estación de trabajo.

La calibración de los sensores de conductividad y temperaturas realizada en laboratorio permitió realizar mediciones precisas de los fenómenos ocurridos en el modelo, obteniéndose correlaciones de las muestras cercanas a 1.

La tarjeta de adquisición de datos implementada para este estudio, permitió el manejo en forma sincronizada de los sensores de conductividad, temperatura y altura. Mientras que el sensor de velocidad, ADV, no pudo ser incorporado a este sistema ya que posee un protocolo y software de adquisición propio.

El uso de altas concentraciones en el estanque de mezcla, provocaron la presencia de un flujo estratificado, lo que a su vez permitió que el sensor registrara valores de conductividad en la columna de agua. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos dicha estratificación no afectó en la tasa de transferencia de masa, ya que los resultados fueron contratados con los obtenidos por las experiencias de transferencia de oxígeno disuelto, obteniéndose resultados satisfactorios.

Los tiempos de registro determinados fueron los adecuados ya que se analizaron las convergencias de las señales de velocidad y conductividad para la media y la desviación estándar. Además se determinó que el valor de la escala de tiempo integral para todas las experiencias es mucho menor que el tiempo de registro determinado.

Las series de velocidades registradas y las rutinas diseñadas permitieron caracterizar la hidrodinámica del sistema, entregando perfiles de velocidad medias los que poseen una distribución logarítmica en todas las experiencias. Dichos perfiles permitieron determinar los

valores de la velocidad de corte, u_* , y los espesores de las capas viscosa y difusa mediante una relación del número de Schmidt. Se determinó además, la resistencia hidráulica del lecho mediante el número de Reynolds de la partícula, Re_{*p} , con el cual se concluye que el lecho es hidrodinámicamente liso para todas las experiencias.

Se determinaron los perfiles de energía cinética turbulenta, de los cuales se desprende que para las experiencias sin oleaje, la energía cinética turbulenta aumenta hacia las zonas cercanas al fondo y disminuye en las cercanías de la superficie libre. El incremento de la energía cinética turbulenta es producto de los altos gradientes de velocidad los cuales son provocados por la presencia del fondo el cual impone condición de no resbalamiento. Para el caso de las experiencias con oleaje, se determinó que la energía cinética turbulenta se incrementa en las zonas altas del escurrimiento y decrece en las zonas cercanas al lecho. Dicho aumento es provocado por el movimiento elíptico el cual es máximo en las zonas cercanas a la superficie libre y decrece hasta ser nulo en las cercanías del fondo. Con la información obtenida no se pudo determinar una relación entre la magnitud de la energía cinética turbulenta y la frecuencia de oleaje. Era de esperarse que la energía cinética turbulenta fuese mayor en las experiencias con frecuencias mayores, ya que esto es sinónimo de alta agitación. Este resultado fue obtenido en las experiencias 2 y 3.

Mediante las series de conductividad se determinó la concentración de sal contenida en el agua, y así construir los perfiles de concentración a lo largo del volumen de control. Estos perfiles se encuentran desplazados hacia aguas bajo, lo que indica que la concentración de sal aumenta en la dirección del flujo. Los perfiles de gasto másico indican que para las experiencias con oleaje existe una mayor tasa de incorporación del soluto hacia la columna de agua, mientras que para las experiencias sin oleaje dicho fenómeno ocurre en menor magnitud.

La resolución de la ecuación de advección-difusión promediada sobre la turbulencia permitió determinar que la advección en la dirección horizontal es igual a la difusión turbulenta de fondo en la vertical. Los resultados obtenidos se resumen en un modelo simple de transferencia de masa, expresado en función del coeficiente de intercambio de masa. Además, se concluye que el coeficiente de transferencia de masa, k_L , adimensionalizado en la forma del número de Sherwood es una función lineal del número de Reynolds del flujo. El coeficiente de intercambio

de masa para las experiencias con oleaje resulta ser mayor para las que poseen oleaje y un mayor caudal, esto se ve representado mediante la adimensionalización en el número de Sherwood.

6.2 Recomendaciones para estudios posteriores

En los futuros estudios que se lleven a cabo en el canal se puede ampliar el rango de experiencias ya que se conoce la naturaleza del oleaje, las calibraciones y los resultados obtenidos de este estudio. Además es importante realizar experiencias que contengan información de las concentraciones aguas arriba del volumen de control, ya que como se pudo apreciar en los análisis, existe un flujo desde los sedimentos hacia aguas arriba.

Es importante tener en cuenta al momento de realizar mediciones de transporte de masa, que la metodología utilizada debe ser consecuente con las condiciones de experimentación. En este estudio se utilizaron sensores de conductividad los cuales necesitan una concentración mínima para así poder registrar información, esto obligó a que la solución salina inyectada tuviera una concentración muy alta y por ende ocurre la estratificación de esta solución. Se recomienda utilizar concentraciones menores, las cuales eviten el efecto de estratificación, y por ende el uso de instrumentos y metodología adecuada como fluorimetría. Sin embargo las experiencias realizadas por Hondzo muestran que no existe un efecto importante de la estratificación sobre la transferencia de masa. Aun así, se recomienda la metodología antes mencionada para poder realizar una visualización de procesos de transferencia y las estructuras del flujo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ballester, E. (2004) Memoria para optar al título de Ingeniero Civil “*Estudio del comportamiento de la barra de sedimentos en la desembocadura del río Maipo, Chile*”.
2. Boudreau, B., Jorgensen, B. (2001). “*The Benthic Boundary Layer*”, Transport Processes and Biogeochemistry.
3. Dean, R., Dalrymple, R. (1998). “Water Wave Mechanics For Engineers And Scientists”, Vol 2, Pág. 171 – 185.
4. Espinoza, J. (2006) Memoria para optar al título de Ingeniero Civil “*Caracterización Hidrodinámica de la desembocadura del río Maipo*”.
5. Guzmán, C. (2006) Memoria para optar al título de Ingeniero Civil “*Puesta en marcha de canal con generador de oleaje y caracterización hidrodinámica*”.
6. Hondzo, M., Steinberger, N. (1999) “Diffusional Mass transfer at sediment-water Interface” Journal of Environmental Engineering. Pag 192-200
7. Hondzo, M. (1998) “Dissolved oxygen transfers at the sediment-water interface in a turbulent flow” Water Resources Research, Vol. 34, No. 12, Pag. 3525-3533.
8. Lathi, B.P.(1974). Communication Systems
9. Niño, Y., García, C., Cantero, M., García, M. (2005), “*Turbulence Measurements with Acoustic Doppler Velocimeter*”, Journal of Hydraulic Engineering.
10. Niño, Y., Reiher, C., De la Fuente, A., Contreras, Manuel. “*Numerical and field study of oxygen exchange at the sediment/water interface of shallow floor in SALT lake of Northern Chile*”.
11. Niño, Y., Reiher, C., Quijada, S. “*Estudio Experimental y Numérico de la transferencia de solutos desde el sedimento en una columna de agua agitada por grillas*” Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XVII Congreso Chileno de Hidráulica.
12. Niño, Y., (2004). Proyecto FONDECYT “*Turbulencia y transporte en la capa límite béntica de lagos y estuarios, estudio de terreno y modelación*”, concurso regular a fondos FONDECYT.
13. Niño, Y., Tamburrino, A. Apuntes curso “Hidrodinámica Ambiental”
14. Niño, Y., Tamburrino, A. Apuntes curso “Transporte Hidráulico de Sólidos”
15. Niño, Y., Reiher, C. (2004) “*Efecto de la turbulencia sobre la transferencia de masa desde los sedimentos en un cuerpo de agua. Simulaciones con un modelo K-ε*”. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica Sao Pedro, Estado de Sao Paulo, Brasil.

16. Niño, Y., Reihner, C. (2004) “ *K-ε modeling of vertical mass transport in turbulent stratified open channel flow*”. 4th International symposium on Environmental Hydraulics, Hong-Kong, China.
17. Patil, S., Rastogi, A.K., Mahajan, S.P. (2003), C.W. Li, “*Transport of pollutant in open channel with short waves*”, Environmental Fluids Mechanics 3: Pág. 235-248.
18. Vásquez, J. Apuntes curso “Hidráulica Marítima”
19. Vergara, M. “Técnicas de Modelación en Hidráulica”, Alfaomega, Pág. 37-106
20. Worman, A. (1998). “Analytical solution and timescale for transport of reacting solutes in rivers and streams” Water Resources Research, Vol. 34, No. 10, Pag. 2703-2716.

ANEXO 1

Perfiles de Velocidad

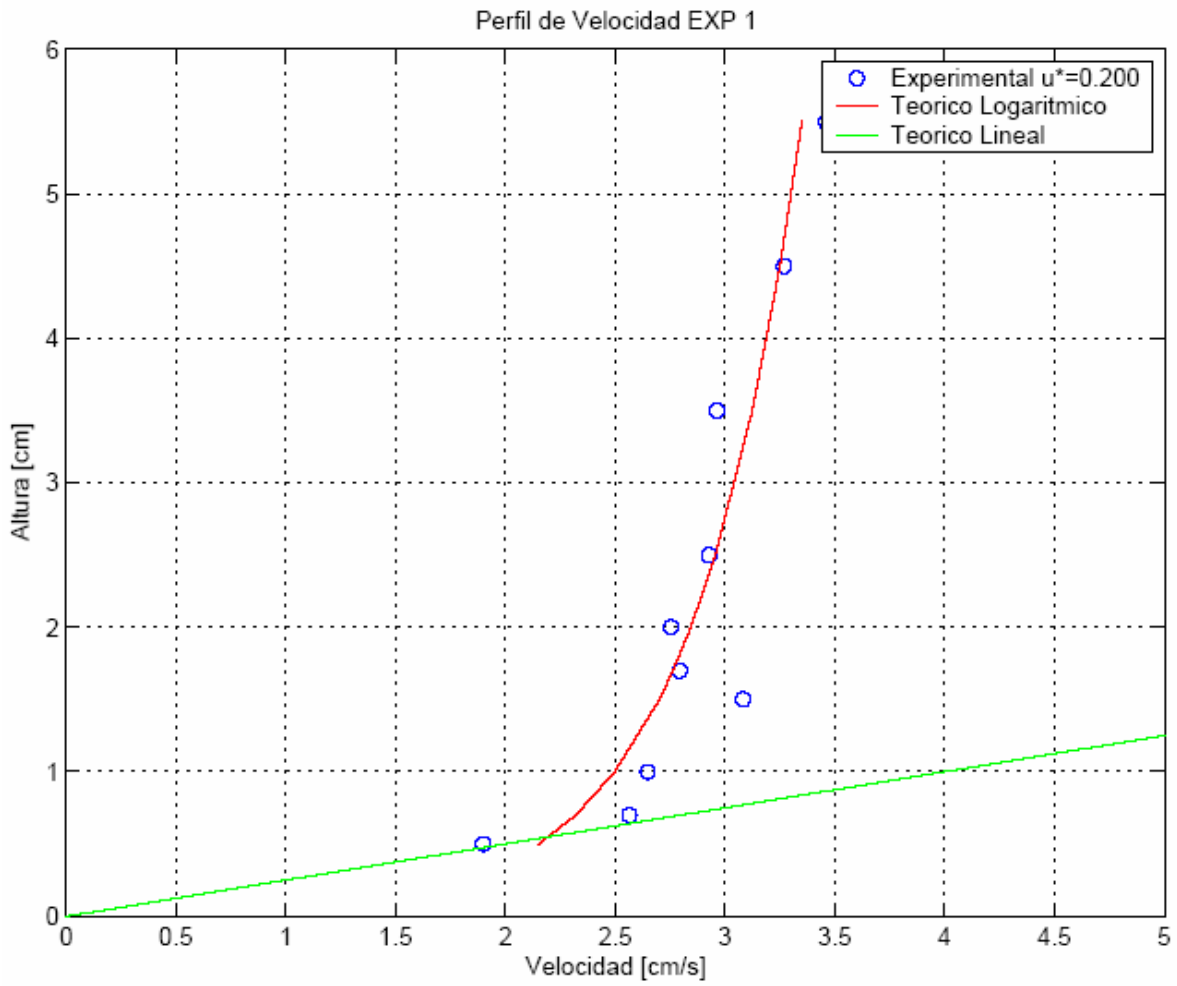


Figura A.1: Perfil de Velocidad Experiencia 1

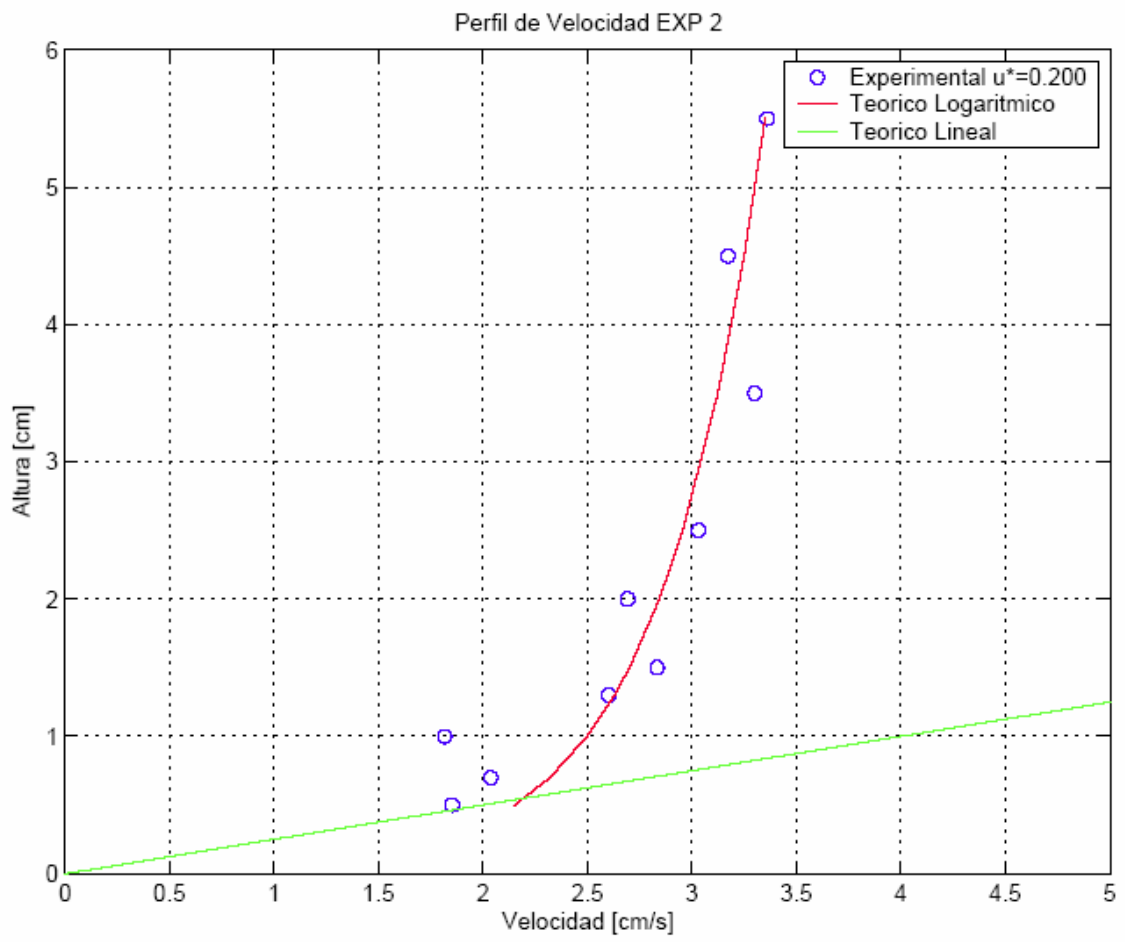


Figura A.2: Perfil de Velocidad Experiencia 2

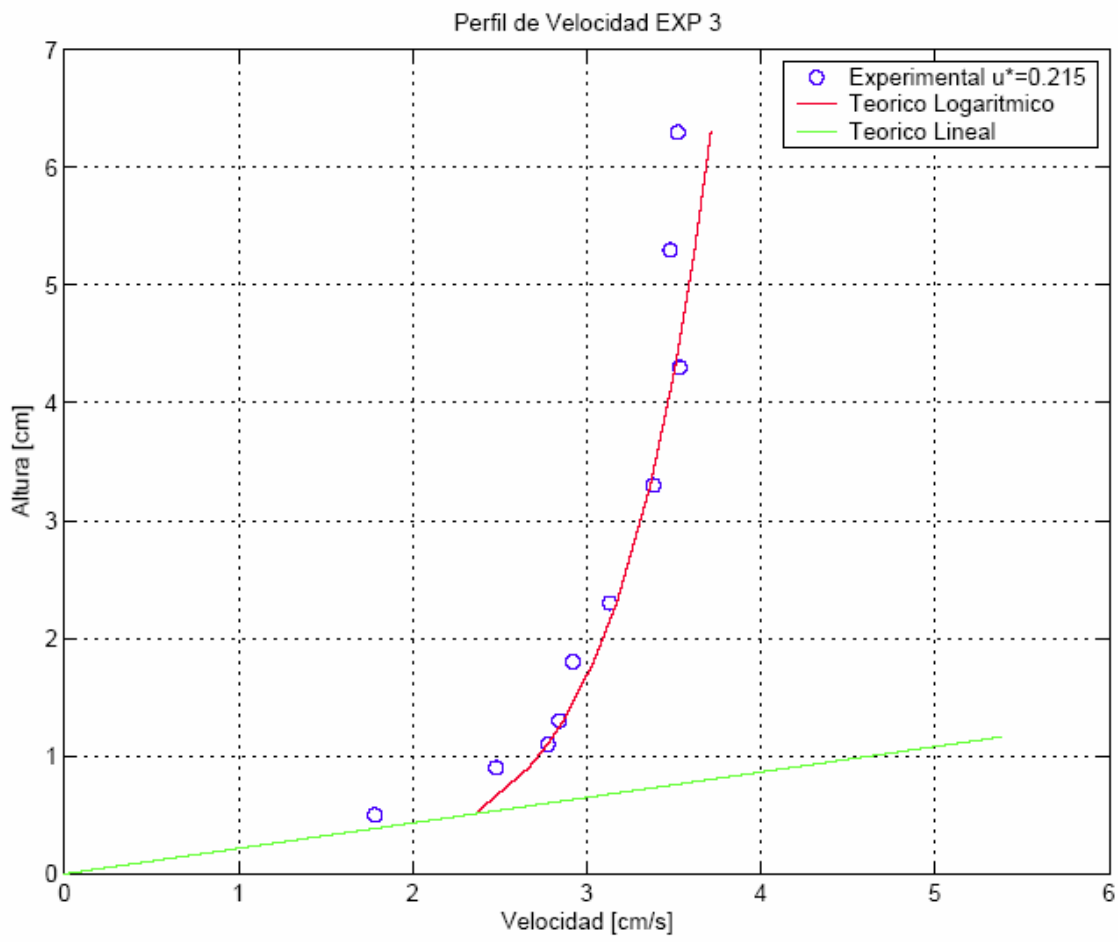


Figura A.3: Perfil de Velocidad Experiencia 3

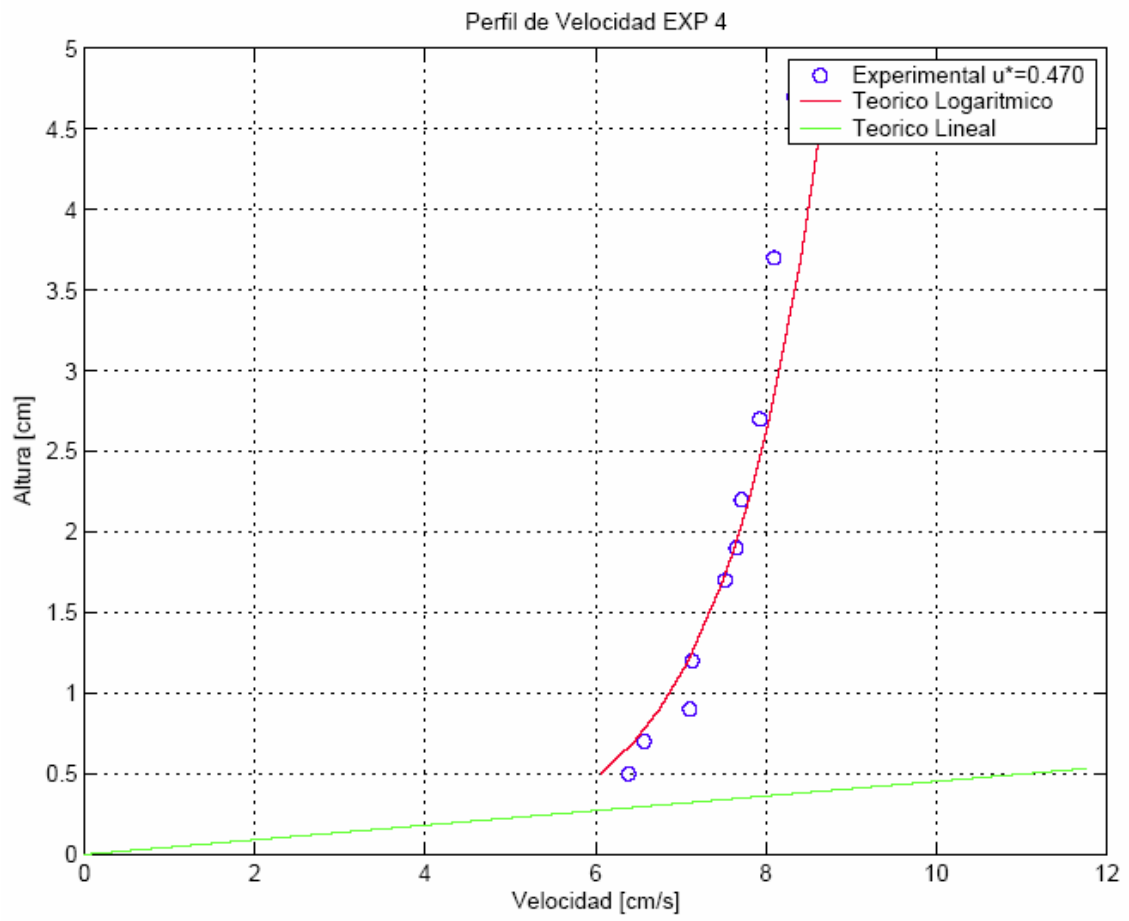


Figura A.4: Perfil de Velocidad Experiencia 4

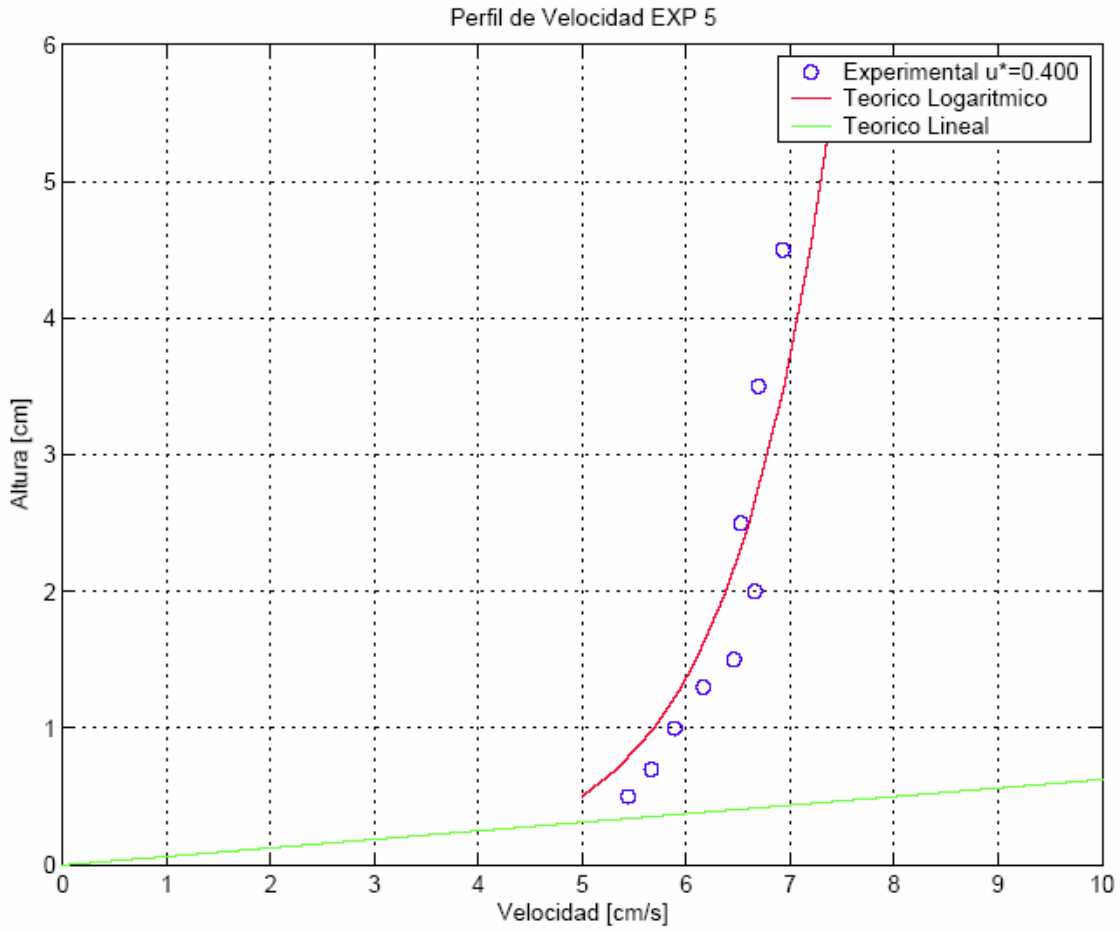


Figura A.5: Perfil de Velocidad Experiencia 5

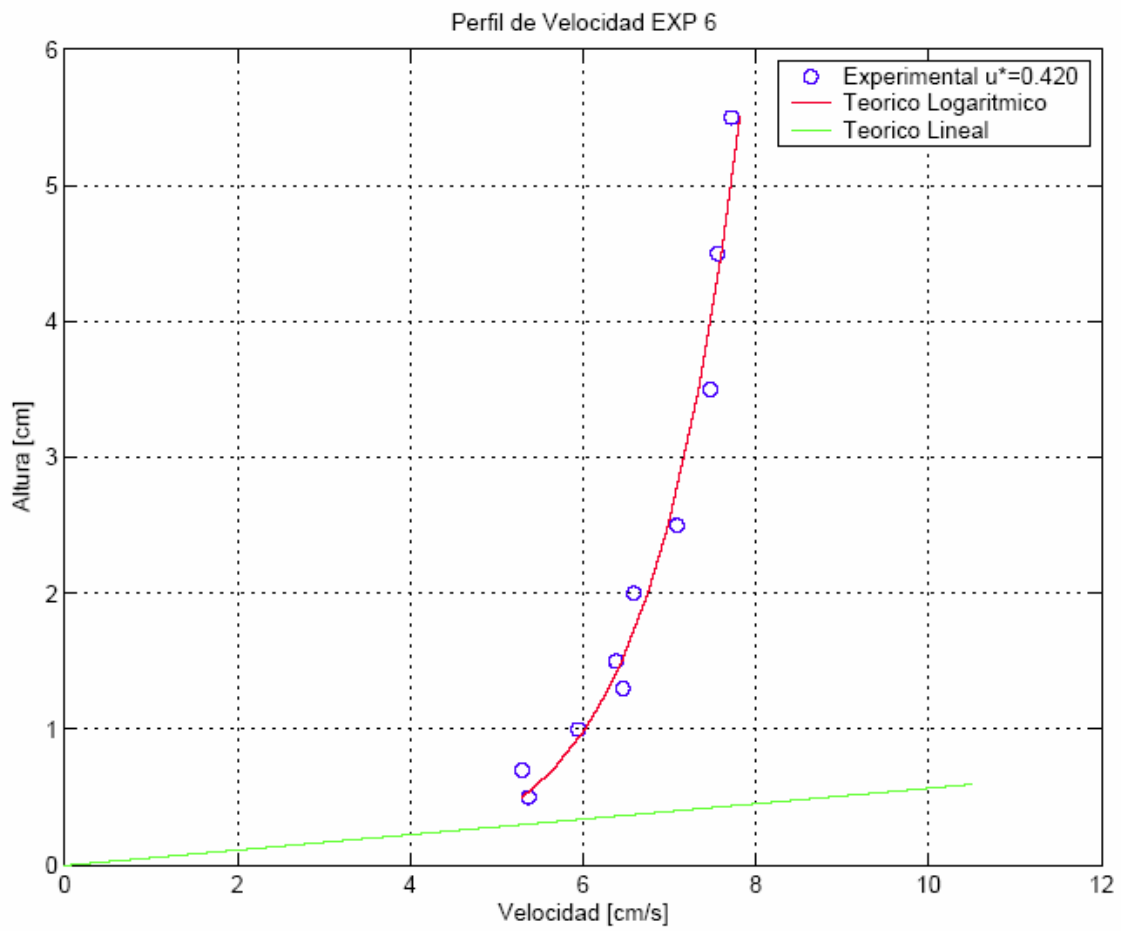


Figura A.6: Perfil de Velocidad Experiencia 5

ANEXO 2

Perfiles de Concentración

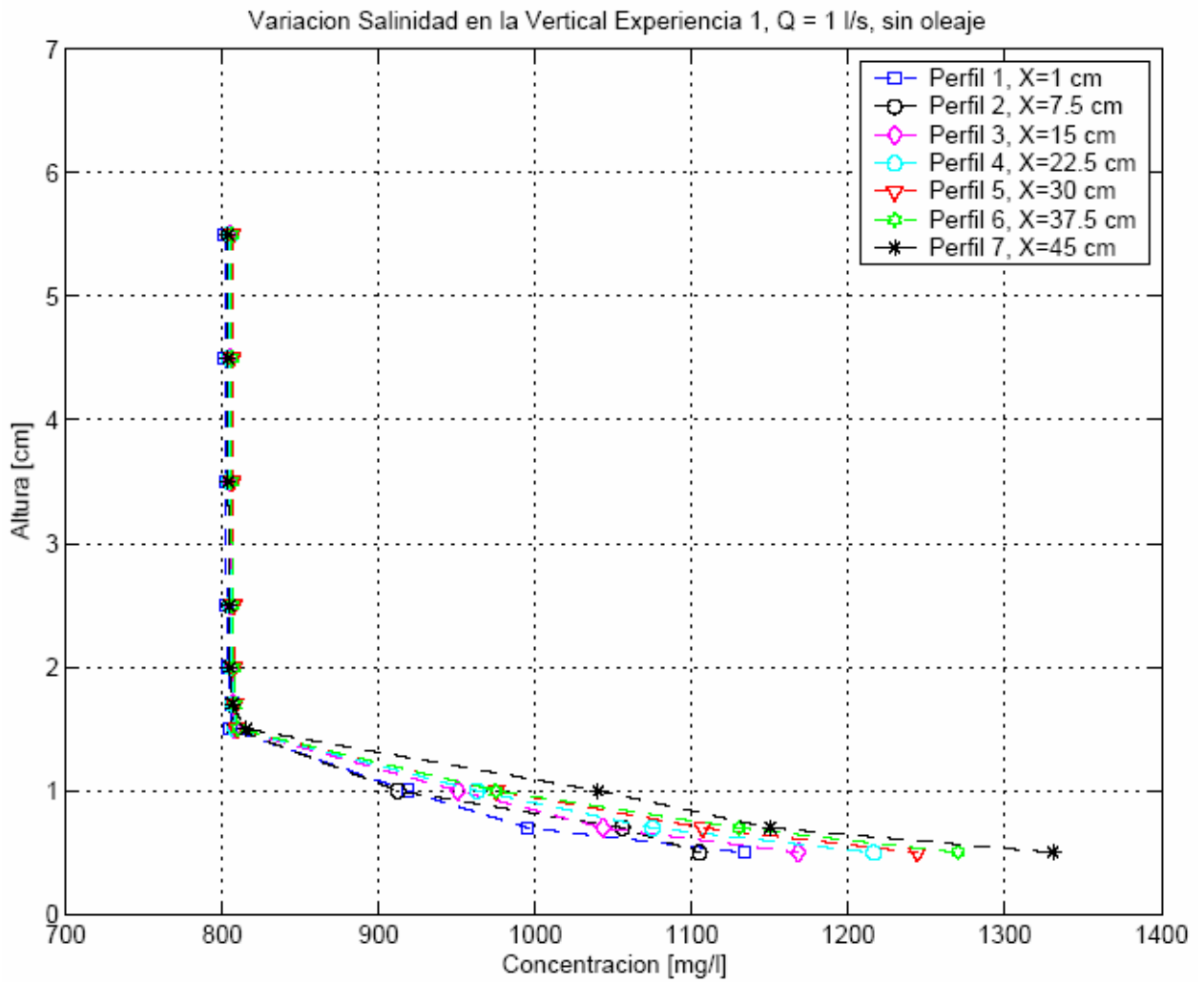


Figura A.7: Perfiles de Concentración Experiencia 1

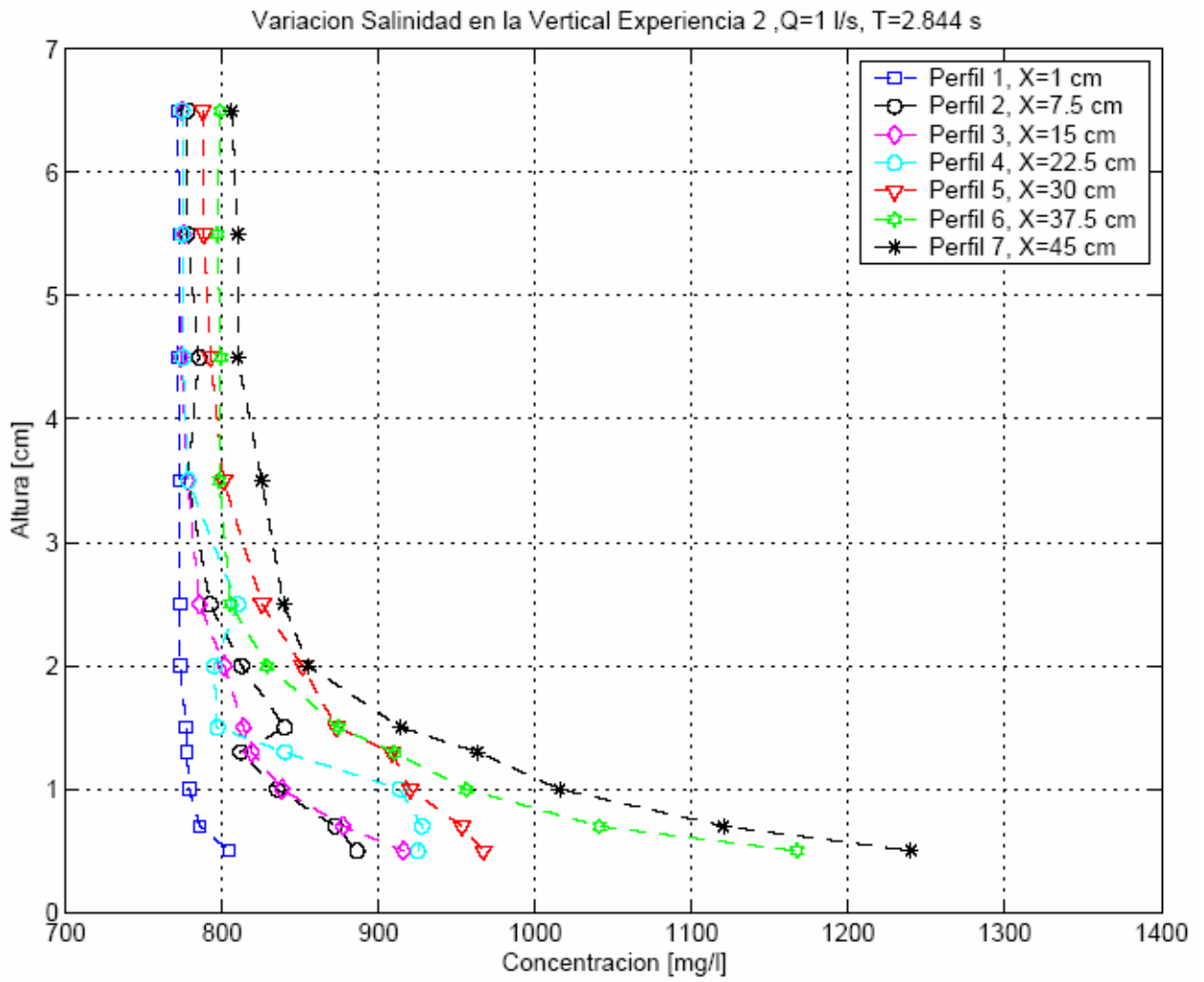


Figura A.8: Perfiles de Concentración Experiencia 2

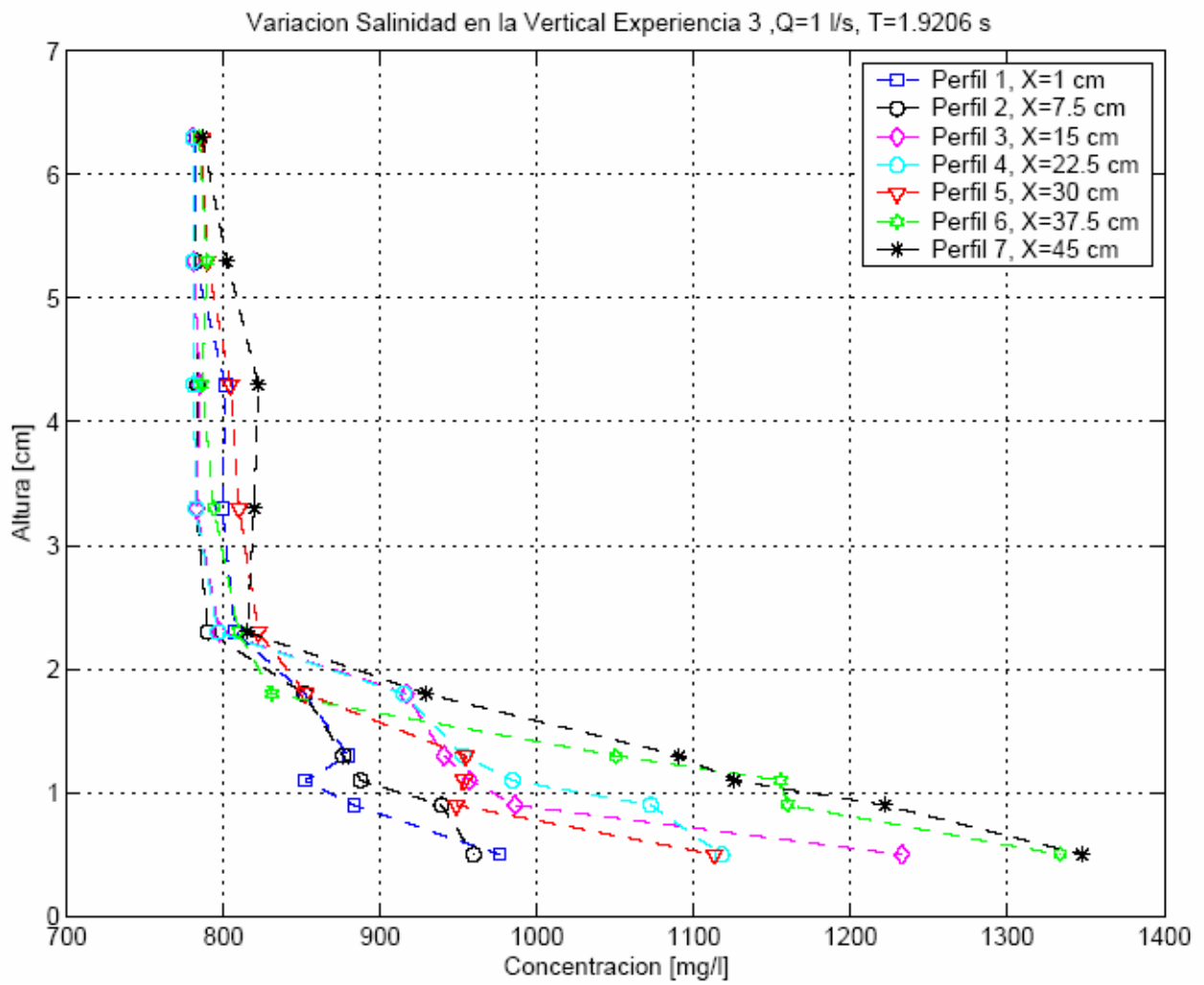


Figura A.9: Perfiles de Concentración Experiencia 3

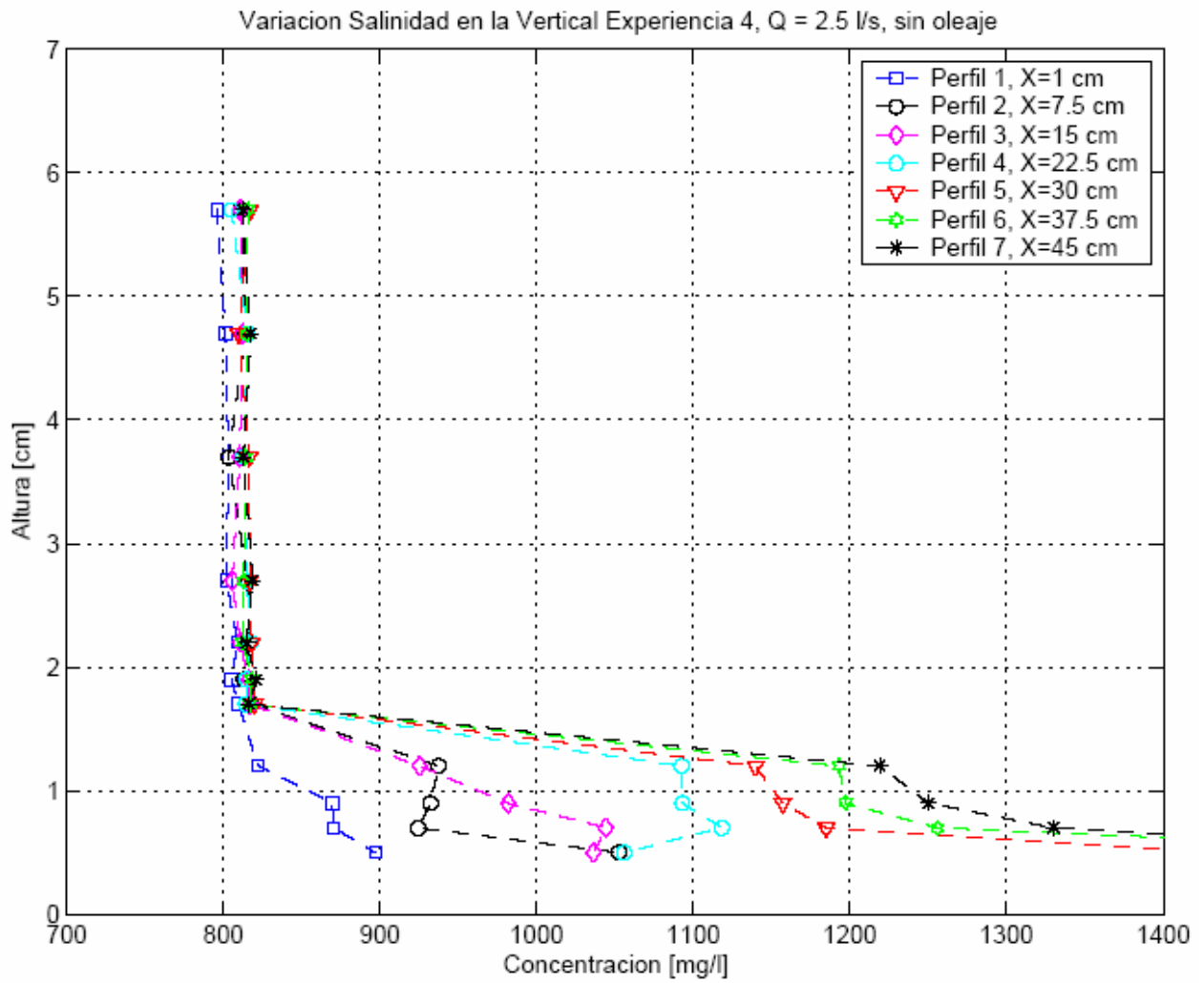


Figura A.10: Perfiles de Concentración Experiencia 4

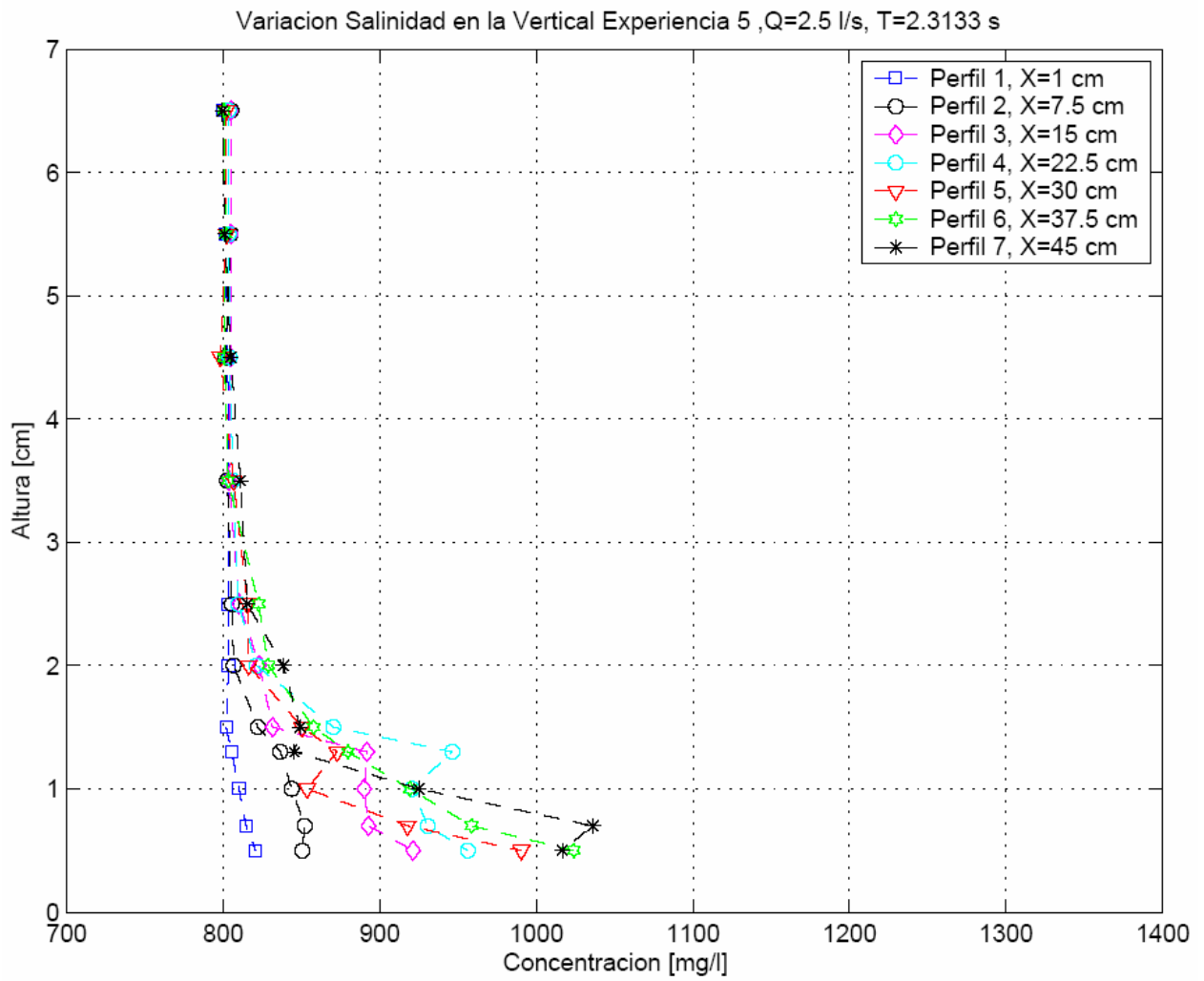


Figura A.11: Perfiles de Concentración Experiencia 5

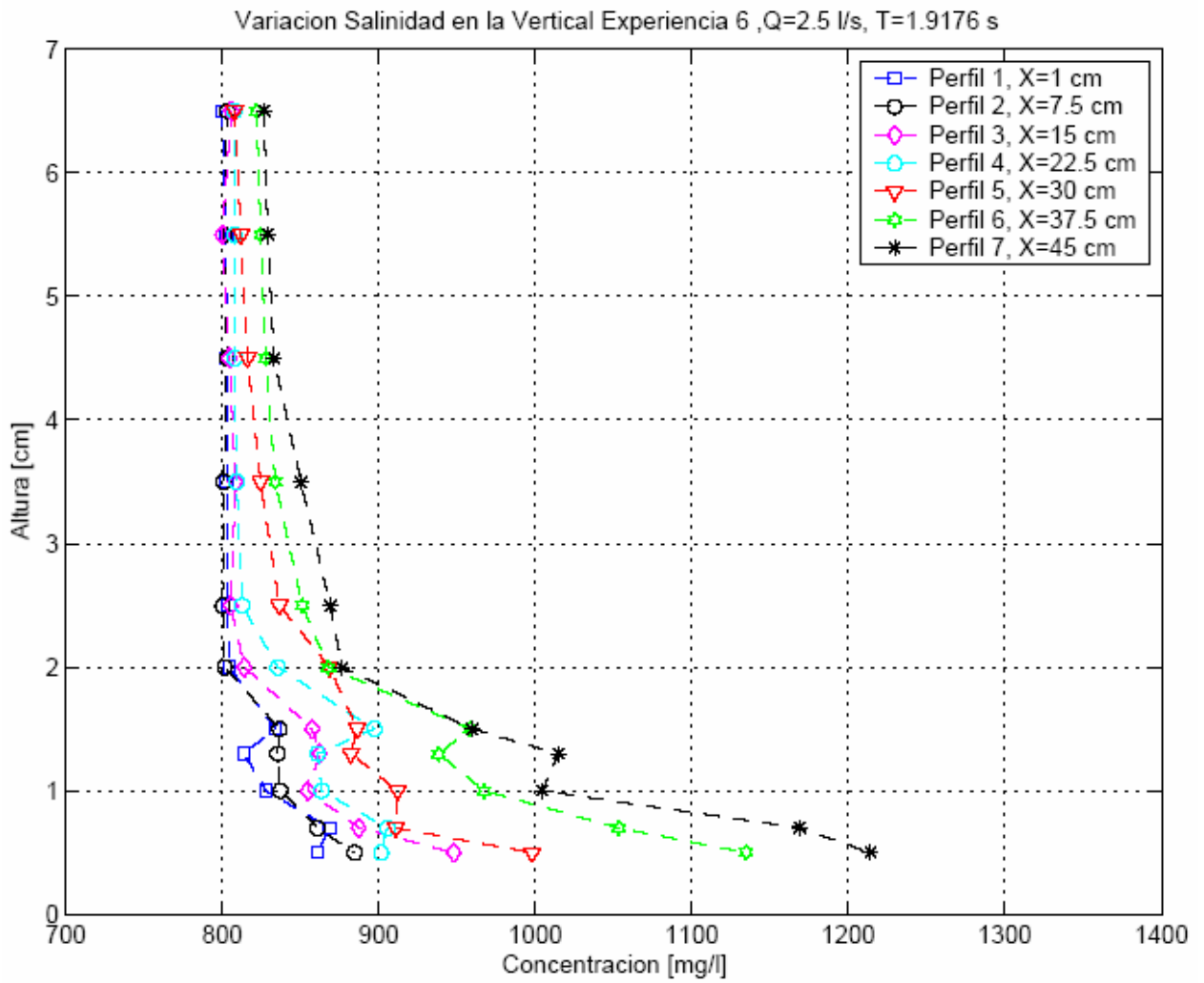


Figura A.12: Perfiles de Concentración Experiencia 6

ANEXO 3
**Controlador de dispositivo
de posicionamiento vertical**

ANEXO 3 CONTROLADOR DE DISPOSITIVO DE POSICIONAMIENTO VERTICAL

Introducción

Con el fin de automatizar el sistema de medición del canal, y para que esté acorde al tipo de estudio realizado, se debieron modificar los acostumbrados soportes de ADV manuales a uno de tipo electrónico. Se incorporó un motor de 12V de corriente continua que se conectó al tornillo sin fin del soporte, encargado del movimiento vertical de este.

Este motor está comunicado a un controlador electrónico el cual permite manejar el movimiento vertical del ADV y del Conductivímetro, con una precisión de 0.5 milímetros a través de un computador mediante una interfaz de Labview creada para este estudio, además para facilitar la visualización de la posición se instaló una cámara la cual permite el monitoreo desde el computador.

Descripción circuito electrónico

Debido a la restricción de la tarjeta de adquisición de datos, la cual solo posee puertos de salida analógica, la lógica del control se resolvió de la siguiente forma:

Se utilizó un control de lazo abierto el cual se basa principalmente en comparadores de voltaje (amplificadores operacionales utilizados en configuración de comparador). Un Amplificador Operacional puede ser utilizado para determinar cual de dos señales en sus entradas es mayor. Basta con que una de estas señales sea ligeramente mayor para que cause que la salida del amplificador operacional sea máxima, ya sea positiva (+Vsat) o negativa (-Vsat) que en este caso están referenciadas con 5V y 0V respectivamente para cada comparador.

En una primera etapa, se hace pasar la señal proveniente de la tarjeta de adquisición de datos (señal analógica entre 0-5V) por dos comparadores en paralelo, los cuales envían una señal de 5V, solo si la entrada es mayor a 4 o menor a 1V. Al enviar 5V uno de estos dos comparadores (el otro siempre enviará 0V, ya que al cumplirse la condición de uno, no se cumple la del otro), ocurren dos acciones simultáneas, en primer lugar, los 5V de salida de esta etapa entran a un tercer comparador, el cual ve si este voltaje es mayor a 1V; si es así, alimenta un transistor 2N2222, el cual a su vez alimenta la bobina de un relé (SPST) que es activado, y conecta el motor

con su alimentación para hacerlo girar; y en segundo lugar, como se requiere el efecto de que el motor gire en ambos sentidos, esta misma señal que se obtiene después de la primera etapa de comparadores, alimenta un segundo transistor idéntico al primero, el cual alimenta a su vez un relé de dos contactos (DPDT), los cuales, como se ve en la Figura A.13 conectan el motor en un sentido o en otro.

Por lo tanto, a este circuito se le envían 3 señales distintas: con 0.5 V, se cumple la condición de uno de los opamp (el que compara si 0.5 es menor que 1), lo que hace que éste envíe la señal de 5V, se encienda el motor y gire de tal forma que los instrumentos instalados en el soporte bajen. Con 4.5V, se cumple la condición del opamp que compara con 4V (compara si 4.5 es mayor que 4), lo que hace que el motor se encienda, y gire de tal forma que los instrumentos suban. Y por último, para detener por completo el motor, es necesario enviar una señal entre 1 y 4V, ya que así, al pasar por la primera etapa de comparadores, ambos enviarán 0V, lo que no permitirá que el motor se encienda, e independiente de la posición de los contactos del relé doble, el motor no girará. Para asegurarse que esto ocurra, se envía una señal de 2.5V.

La alimentación del circuito completo se hace utilizando la red domiciliaria de 220V alternos. Se utiliza un transformador de 220 / 9V y 5A, seguido de un rectificador de onda completa para obtener una tensión continua, y luego una etapa de 2 condensadores en paralelo de 4400uF, los que ayudan a que la tensión que alimenta al motor y al circuito sea constante. Con estos 9V se alimentan reguladores de voltaje de 5V, los cuales a su vez alimentan a los comparadores. Los voltajes de 1 y 4V que se utilizan como referencias en los opamp, se obtienen alimentando con 5V una resistencia variable, la cual se regula hasta que ésta entregue el voltaje deseado.

A continuación se adjunta esquema del circuito electrónico (Figura A.13), y en la Figura A.14 se puede ver físicamente la instalación de éste.

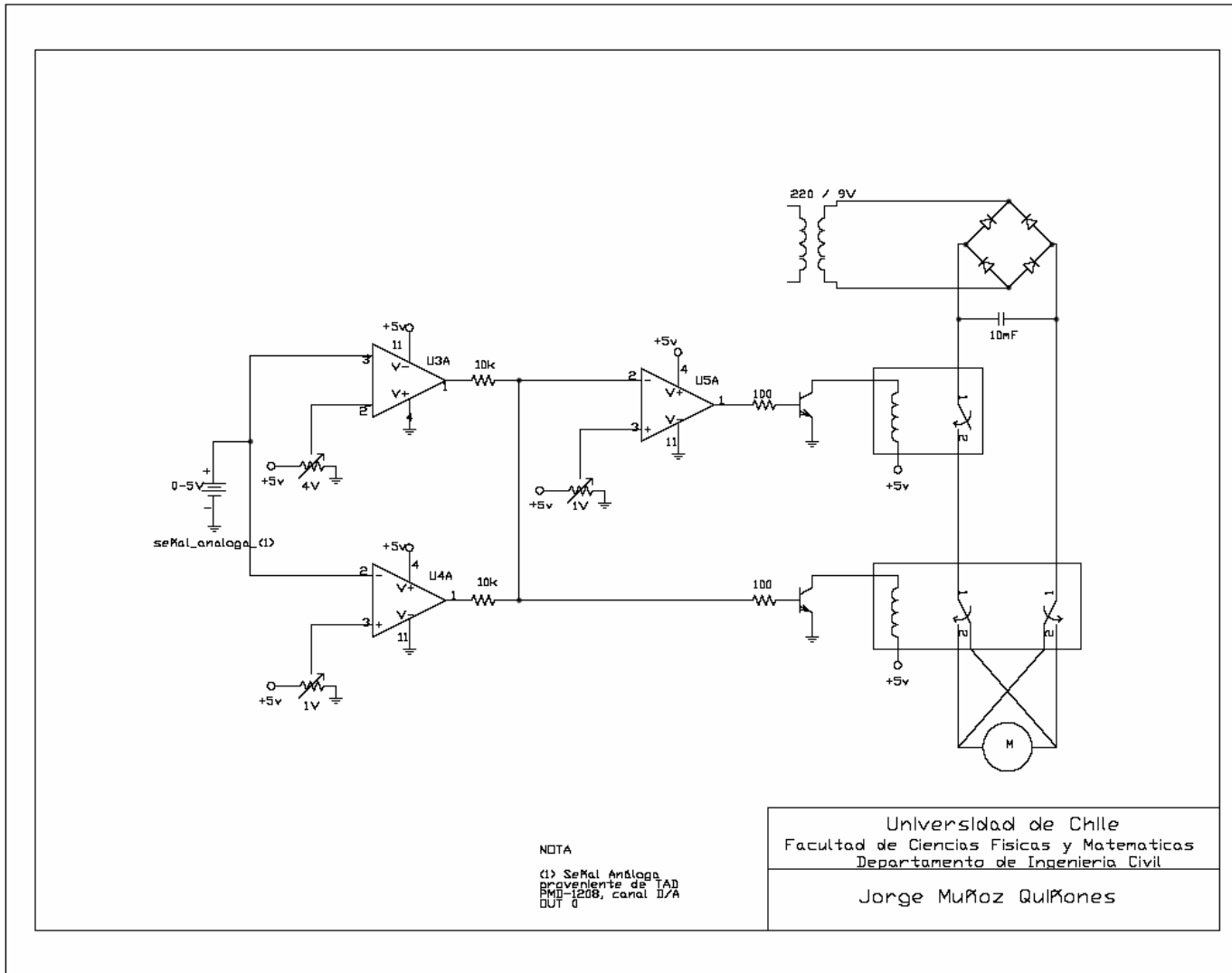


Figura A.13 Circuito Electrónico descriptivo del controlador

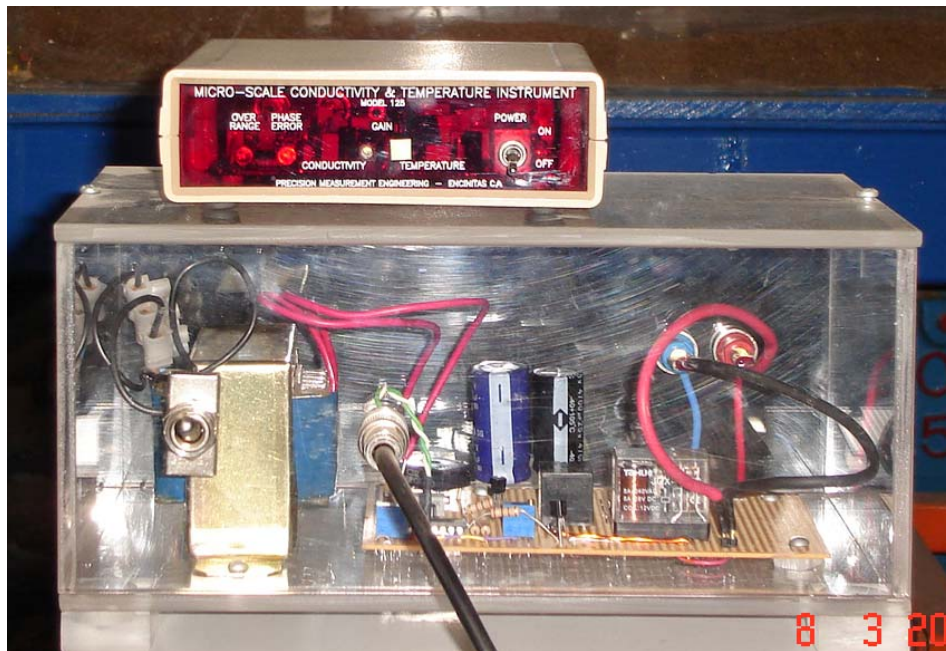


Figura A.14 circuito electrónico controlador soporte vertical.

Descripción software Labview 7

Se creó interfaz mediante el software Labview 7, la cual permite controlar la posición vertical del ADV y Conductivímetro. Esta interfaz se diseñó de forma que fuera sencilla e intuitiva para cualquier usuario. Posee dos botones de accionamiento, uno para subir y otro para bajar el soporte, un visor del voltaje que se le está enviando al circuito electrónico explicado en el punto anterior, y un botón principal de apagado.

En la Figura A.15 se observa la interfaz en Labview 7, y en la Figura A.16 el diagrama de bloques que genera dicha interfaz.

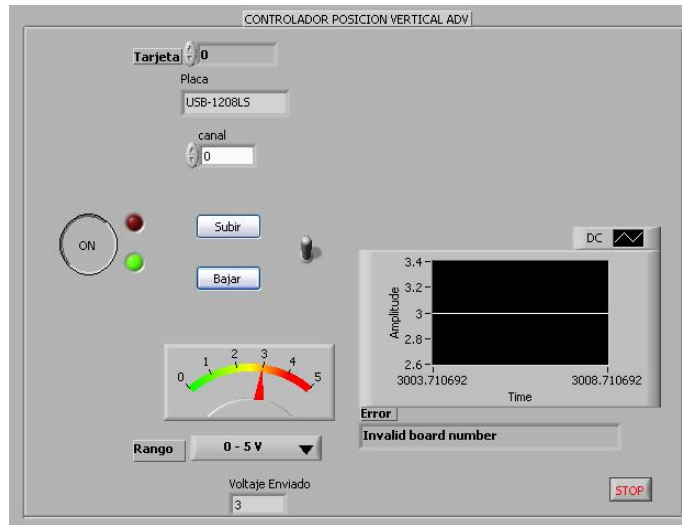


Figura A.15: Interfaz controlador soporte vertical en Labview 7.

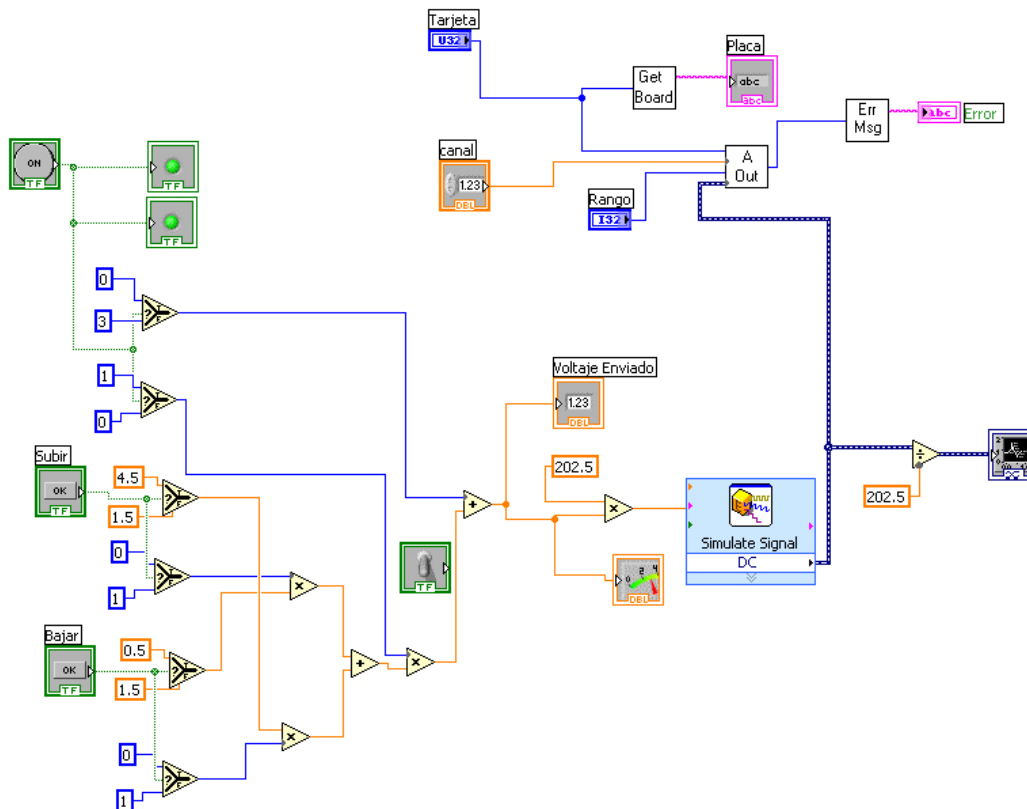


Figura A.16: Diagrama de bloques interfaz en Labview 7.