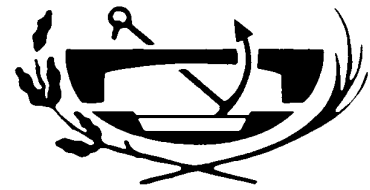




**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
DE CARTAGENA**

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE  
INGENIERÍA TÉCNICA CIVIL**



***INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS  
ESPECIALIDAD HIDROLOGÍA***

Proyecto Fin de Carrera

**CARACTERIZACIÓN DE RESALTOS LIBRES A  
PARTIR DE VELOCIDADES INSTANTÁNEAS CON  
EQUIPO DOPPLER.  
FLUJO AGUAS ABAJO DE UNA COMPUERTA  
PLANA**

***JUAN ANTONIO VICENTE ALFONSO***

Dirigido por:

**D. LUIS G. CASTILLO ELSITDIÉ**

Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P.

Cartagena, julio de 2008

*A mi madre y a mi padre por su apoyo, ya que no habría llegado hasta aquí sin su ayuda.*

*A mi director de proyecto, Dr. Luis G. Castillo, por haber sido un excelente profesor, un maestro y un apoyo fundamental en los momentos más complicados del proyecto.*

*A mi compañero Sebas, porque sólo nosotros sabemos cuánto ha costado este proyecto y ha sido un gran apoyo, como mis compañeros Ginés y Julio.*

*A la familia Cervantes Castejón, por toda su ayuda.*

*Al resto de mis familiares y amigos por su ánimo, a pesar de no haberles dedicado todo el tiempo que quisiera en algunos momentos.*

*A Ana.*

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>1 OBJETIVOS</b>	<b>9</b>
<b>2 RESUMEN</b>	<b>11</b>
<b>3 LABOR EXPERIMENTAL Y FILTRADO DE DATOS</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Trabajo de laboratorio</b>	<b>43</b>
3.1.1 <u>Configuración de la sonda</u>	43
3.1.2 <u>Rango de caudales de trabajo</u>	45
3.1.3 <u>Situación actual del canal</u>	48
<b>3.2 Ensayos de laboratorio</b>	<b>53</b>
<b>3.3 Sontek Horizon ADV. Principales especificaciones</b>	<b>57</b>
<b>3.4 Filtrado de datos</b>	<b>61</b>
<b>4 FUNDAMENTOS Y ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL</b>	<b>73</b>
<b>4.1 Introducción</b>	<b>73</b>
4.1.1 <u>Aplicaciones prácticas del resalto hidráulico</u>	74
4.1.2 <u>Tipos de resalto hidráulico</u>	75
<b>4.2 Condiciones de flujo y características de la longitud del resalto</b>	<b>77</b>
4.2.1 Características de la longitud del resalto	77
4.2.2 Caída de la velocidad máxima	85
4.2.3 Perfil superficial	87
<b>4.3 Relación entre profundidades inicial y final</b>	<b>89</b>

<b>4.4 Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos</b>	<b>-----107</b>
<b>4.5 Longitud del resalto hidráulico</b>	<b>-----119</b>
<b>4.6 Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos</b>	<b>-----127</b>
4.6.1 <u>Distribución de velocidades</u>	-----127
4.6.2 <u>Caída de velocidad máxima</u>	-----133
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>-----143</b>
<b>ANEXO 1. RESULTADOS DEL FILTRADO A PARTIR DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO</b>	<b>-----149</b>
<b>ANEXO 2. GRÁFICAS DE VELOCIDAD FRENTE CALADO</b>	<b>-----181</b>
<b>ANEXO 3. CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A LOS RESALTOS HIDRÁULICOS ANALIZADOS</b>	<b>-----201</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>-----207</b>

## **INTRODUCCIÓN**

En el proyecto de fin de carrera se realizan medidas de flujo en lámina libre, principalmente de velocidades instantáneas dentro del seno de algunos resaltos hidráulicos libres formados aguas abajo de una compuerta.

A continuación se hace una comparación y contrastación de los resultados obtenidos en la práctica con trabajos experimentales ya afianzados; para luego ampliar los registros existentes y realizar la caracterización temporal de los principales términos turbulentos.

Una vez hecho el análisis crítico, se extraen las conclusiones más importantes y se planifican y realizan las campañas de medición.

### **A. Definición del tipo de flujo**

En este proyecto fin de carrera se realiza el estudio del comportamiento del agua en una canal rectangular en el que se han formado diferentes resaltos hidráulicos libres.

Este fenómeno hidráulico se desarrolla en flujo permanente rápidamente variado, un tipo de flujo que ocurre cuando la profundidad del flujo no cambia o se supone constante con respecto al tiempo considerado, pero espacialmente el cambio de profundidad se produce de forma abrupta en distancias relativamente cortas.

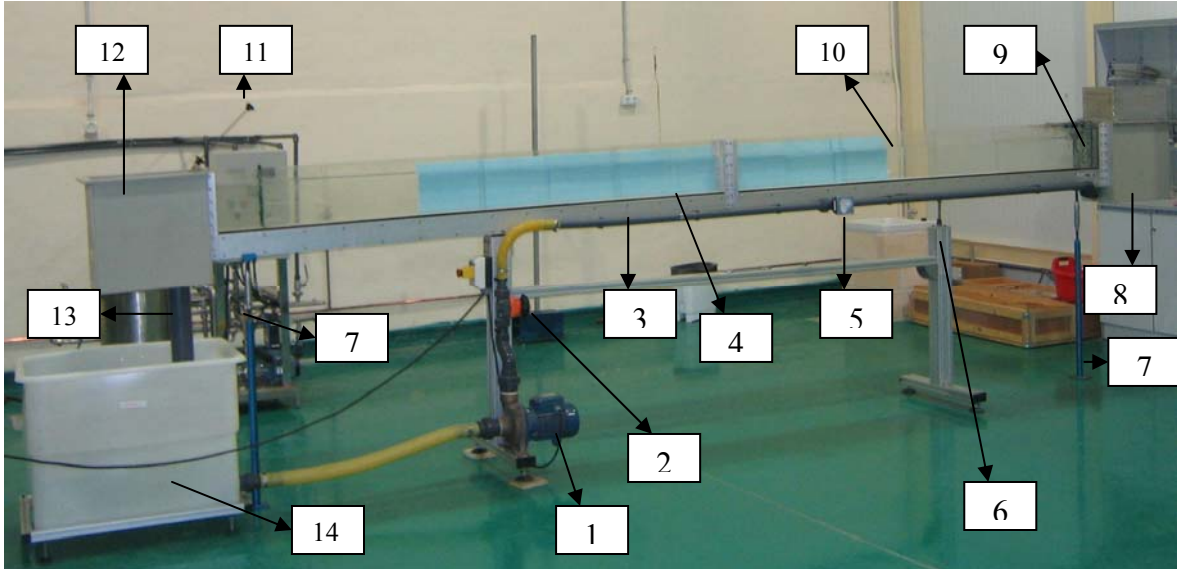
### **B. Descripción del canal de laboratorio y de los elementos para la adquisición de datos con ADV**

El trabajo experimental desarrollado en este proyecto fin de carrera consistió en la medida de velocidades instantáneas mediante un equipo Doppler en distintos tipos de resaltos producidos en un canal de laboratorio; así como la medida de otros parámetros característicos de los resaltos, como la longitud de resalto y las profundidades inicial y final utilizando un limnómetro.

Posteriormente se comparan los resultados experimentales con trabajos ya afianzados. A continuación se muestra una descripción del canal y de los elementos para la adquisición de datos con ADV.

▪ Descripción de los elementos del canal

La fotografía 1 muestra los principales elementos que componen el canal sobre el que realizamos el estudio:



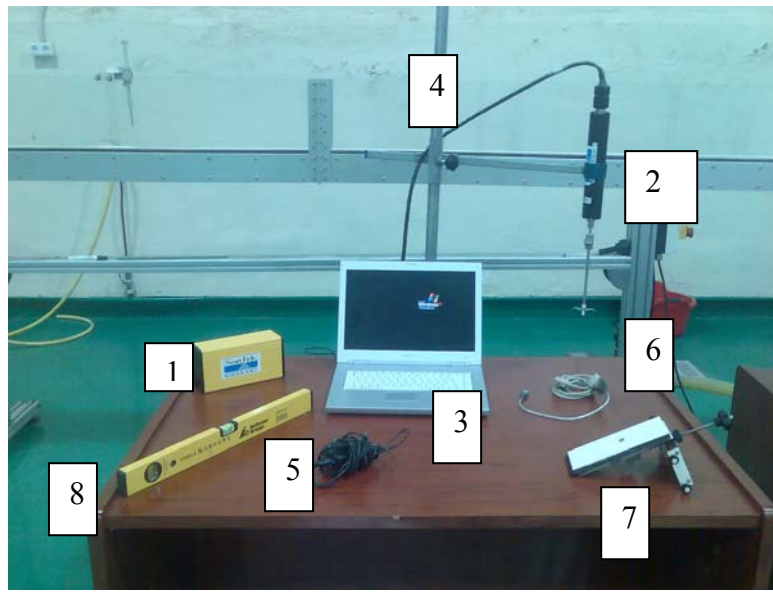
**Fotografía 1. Elementos del canal de laboratorio, Márquez (2006)**

De manera que:

1. Bomba de alimentación
2. Válvula de membrana reguladora del caudal
3. Tubería de impulsión
4. Solera del canal
5. Caudalímetro
6. Soporte con regulación de altura
7. Soportes niveladores de la pendiente del canal
8. Depósito tranquilizador suplementado
9. Tranquilizadores de flujo
10. Sección del canal de 81 x 250 x 5000 mm de longitud
11. Regulador del calado del agua en el canal
12. Depósito regulador del calado del agua
13. Tubería de retorno
14. Depósito de almacenamiento

▪ Descripción de los elementos para la adquisición de datos con ADV

La fotografía 2 muestra los distintos elementos necesarios para realizar mediciones de velocidad con ADV:

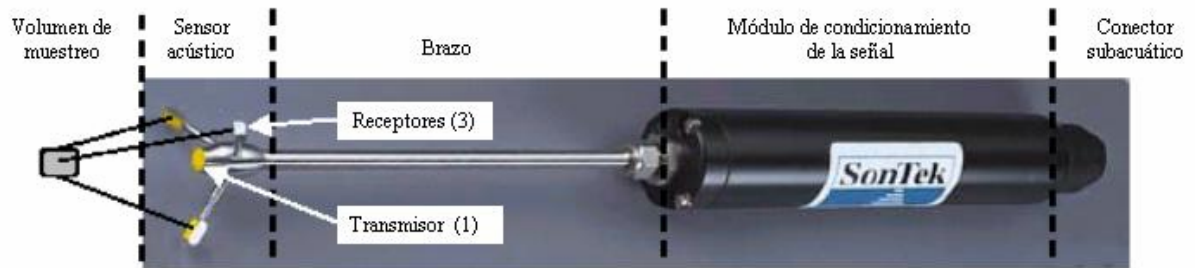


**Fotografía 2. Elementos para la adquisición de datos con ADV**

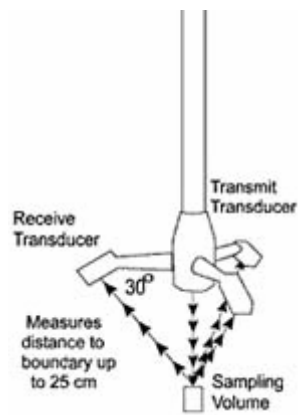
Son los siguientes:

1. Módulo de procesamiento ADVfield a prueba de salpicaduras
2. Sonda 3D de 16 MHz MicroADV
3. Ordenador con programa operativo Windows XP
4. Cable de unión entre la sonda y el procesador
5. Cable de alimentación del procesador
6. Cable para comunicar el módulo de procesamiento al ordenador
7. Limnómetro
8. Medidor de nivel

La fotografía 3 muestra los principales elementos de la sonda:



Fotografía 3 (a). Elementos principales de la sonda 3D



Fotografía 3 (b). Elementos principales de la sonda 3D



## **1. OBJETIVOS :**

- Un primer objetivo es el aprendizaje y correcto uso de una de las nuevas técnicas e instrumentación asociada para la medición de las velocidades instantáneas en un flujo en lámina libre.
- Un segundo objetivo es la adquisición de datos por medio del equipo Doppler y la comprobación y contrastación teórico-experimental de las distribuciones de velocidad; así como un filtrado numérico de los datos.
- Un tercer objetivo es la ampliación de medidas existentes y un estudio paramétrico de la distribución de velocidades instantáneas, medias, fluctuantes y la disipación de energía, en función del Número de Froude, en distintas posiciones del resalto hidráulico libre aguas abajo de una compuerta.



## **2. RESUMEN**

El trabajo realizado en el siguiente proyecto de fin de carrera se divide en tres partes:

-Primero: Una parte teórica donde se exponen las formulaciones de los temas que trata el proyecto de fin de carrera.

-Segundo: Una parte experimental donde se amplían y contrastan los nuevos registros de datos con los trabajos experimentales ya afianzados.

-Tercero: Una parte de tratamiento de datos para el estudio paramétrico de los diferentes tipos de resaltos hidráulicos.

En este proyecto se han realizado medidas de flujo en lámina libre, principalmente de velocidades instantáneas dentro del seno de algunos resaltos hidráulicos libres.

A continuación se hace una comparación y contrastación de los resultados obtenidos en la práctica con trabajos experimentales ya afianzados. Una vez hecho el análisis crítico, se proponen nuevas leyes y se extraen las conclusiones más importantes.

Los puntos principales que se han tratado en la realización de este proyecto son los siguientes:

### **A. Labor experimental y filtrado de datos**

#### **▪ Configuración de la sonda**

Para el correcto funcionamiento de la sonda es necesario introducir unos parámetros de entrada. Los más importantes son el rango de velocidad, cuyo valor establecido es de  $\pm 100$  cm/seg, y la frecuencia de muestreo que fue de 5 Hz. Otro parámetro fundamental es la salinidad, cuyo valor estimado fue de 2 ppt.

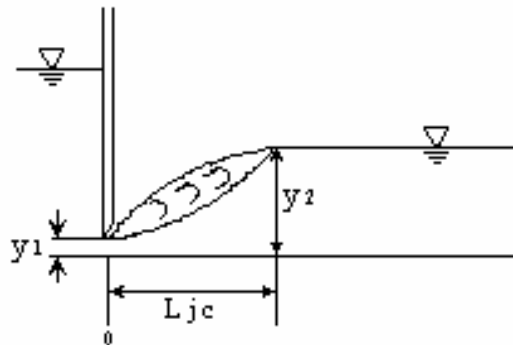
#### **▪ Rango de caudales de trabajo**

Mediante un aforo volumétrico se determinó con exactitud el caudal trasegado por el canal de laboratorio. Según la lectura del caudalímetro nuestros caudales de trabajo son 12.25, 11.25, 10.5, 10.5, 8, 6, 5 y 4 m<sup>3</sup>/h. Según el aforo volumétrico realizado, el caudal real y por tanto, los valores utilizados para este estudio, son 14, 13.52, 12.62, 11.9, 9.81,

7.58, 6.33, 5.35, y 3.58 m<sup>3</sup>/h, y medidos en l/s: 3.91, 3.75, 3.5, 3.31, 2.72, 2.1, 1.76, 1.49, y 1 l/s.

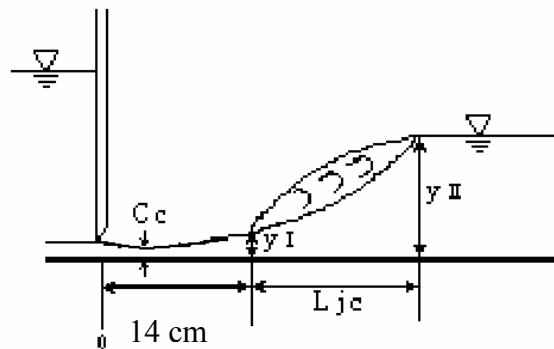
▪ **Tipos de resaltos estudiados**

Se formaron seis tipos de resaltos hidráulicos libres. El primero se refiere a un resalto libre bajo las condiciones del flujo potencial justo al pie de la compuerta (R.L.0).



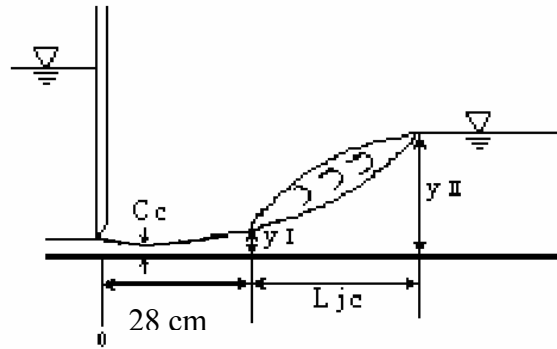
**Figura 2.1. Resalto al pie**

El segundo se refiere al inicio de un resalto libre estabilizado a 14 centímetros de la compuerta bajo condiciones de flujo parcialmente desarrollado (R.L.14).



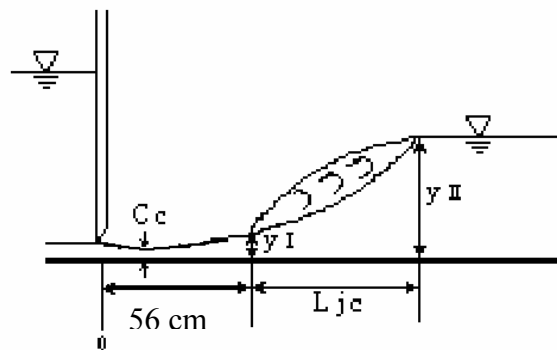
**Figura 2.2. Resalto a 14 cm**

El tercer resalto analizado se trata de un desplazamiento a 28 cm aguas abajo de la compuerta (R.L.28).



**Figura 2.3. Resalto a 28 cm**

Finalmente, el último resalto en el que hemos medido velocidades mediante nuestro equipo doppler, ha sido a 56 cm aguas abajo de la compuerta (R.L.56).



**Figura 2.4. Resalto a 56 cm**

Por último, debemos destacar que se han medido las características de dos resaltos más, desplazados a 70 cm y 90 cm respectivamente de la compuerta, pero en estos resaltos no hemos medido velocidades, sólo sus características principales.

El objetivo de medir estos resaltos era el de comprobar que a una distancia considerable, de unas 30 veces el calado contraído, el flujo era prácticamente desarrollado, mediante el análisis de las principales características de esos resaltos.

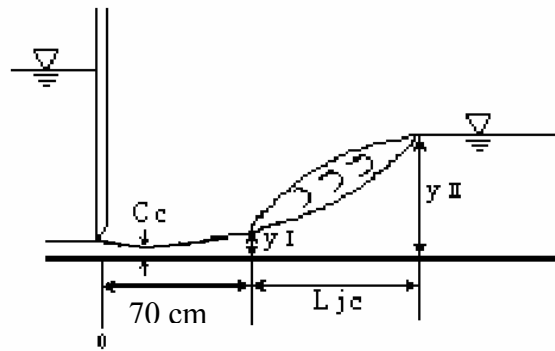


Figura 2.5. Resalto a 70 cm

El resalto a 90 cm:

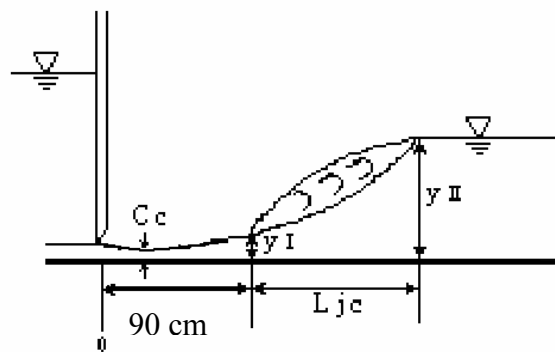


Figura 2.6. Resalto a 90 cm

- **Criterio establecido para obtener la longitud de resalto**

Es importante aclarar que la longitud de resalto fue establecida como la distancia entre el calado contraído y el punto aguas abajo en que se observó que el perfil de flujo no seguía subiendo.

- **Secciones estudiadas para cada resalto**

La mayoría de las secciones estudiadas se localizan dentro de la longitud de resalto considerada. Las seis secciones analizadas son las siguientes:

(a) Sección 0: localizada inmediatamente aguas abajo de la compuerta y situada a la distancia calculada, a partir del coeficiente de contracción, para el resalto al pie, para el resto de resaltos fue imposible cualquier medición en esta sección.

(b) Sección 1; localizada a  $1/4L_r$  (un cuarto de la longitud de resalto considerada).

(c) Sección 2; localizada a  $1/2L_r$ .

(d) Sección 3; localizada a  $3/4L_r$ .

(e) Sección 4; localizada a una distancia igual a la longitud del resalto.

(f) Sección 5; localizada a una distancia intermedia entre el final de la longitud de resalto estimada y la mitad del canal (punto hasta el cuál el canal es completamente horizontal).

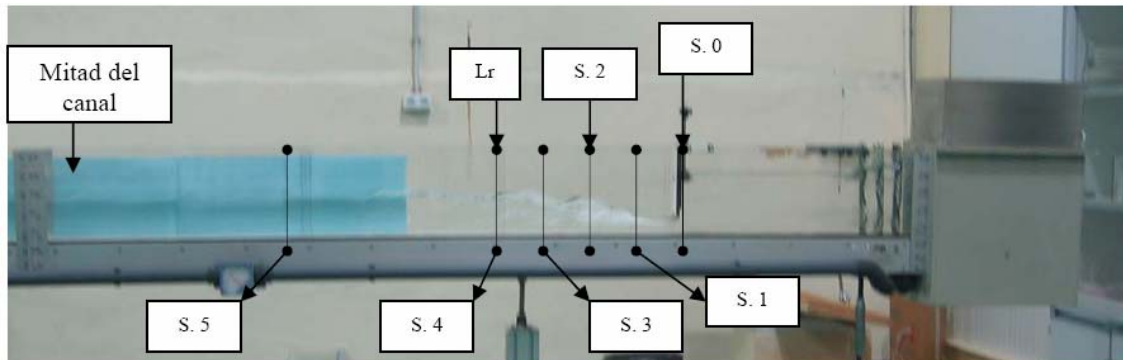


Figura 2.7. Esquema de las secciones

#### ▪ Principales especificaciones de la sonda

El equipo de medida de velocidades instantáneas ADV necesita estar sumergido, ya que el medio de transmisión fundamental del sonido en dicho equipo es el agua.

#### ▪ Filtrado de datos

En condiciones de aireación, la sonda deja de medir cuando una burbuja de aire atraviesa la trayectoria de muestreo, obteniéndose un valor de velocidad erróneo. Para desechar o paliar esas anomalías se realiza un filtrado digital de los datos, similar al que realizó Castillo (2008).

Una vez exportados los datos desde el programa de adquisición de datos Explore V a una hoja de cálculo Excel, se somete a un filtrado de datos a las muestras que lo requieran, y se van creando nuevas series a partir de las iniciales.

Recordemos que tendremos dos tipos de series iniciales, una de 4096 valores, con la que se pretende afianzar los resultados conseguidos por Márquez (2006), y otra serie de 2048,

con la que se pretende completar los resultados anteriores con valores de números de *Froude* intermedios.

Las fases fundamentales en el tratamiento de datos son las siguientes:

- Dada la serie inicial de 2048 o 4096 valores medidos de velocidad  $V_x$ , para cada uno de los puntos de muestreo considerados en los resaltos hidráulicos se obtiene el valor medio  $X_{media}$ .

- Se obtiene el valor máximo de la serie inicial, al que denominamos  $X_{máx}$ , y un valor  $A_1$  que se define como la diferencia entre el valor máximo  $X_{máx}$  y el valor medio  $X_{media}$  de la serie inicial, de modo que:

$$A_1 = X_{máx} - X_{media}$$

- Posteriormente se halla un valor  $X_{mín}$  obtenido de la diferencia entre la media de la serie inicial y el valor  $A_1$  hallado anteriormente,  $X_{mín} = X_{media} - A_1$ , para después obtener la amplitud  $A$ , de la diferencia entre los valores  $X_{máx}$  y  $X_{mín}$ , tal que:

$$A = X_{máx} - X_{mín}$$

- Por último se obtienen los valores de corte de la serie inicial de la siguiente manera:

El valor de corte superior será un valor  $X_{máx,c}$  que se define como el valor máximo de la serie inicial  $X_{máx}$  una vez reducido por el valor de amplitud  $A$  multiplicado por un factor de porcentaje considerado como 0,05 (percentil 95%):

$$X_{máx,c} = X_{máx} - (A * 0,05)$$

Este valor de corte superior pone un límite a la serie inicial de modo que los valores obtenidos mayores a este valor de corte quedan reducidos al límite  $X_{máx,c}$ . La serie inicial ha quedado así restringida a un límite superior menor que el valor  $X_{máx}$  inicial.

El valor de corte inferior  $X_{mín,c}$  se obtiene a partir del valor  $X_{mín}$  mayorado por el valor de la amplitud  $A$  multiplicado por 0,05 (percentil 5%):

$$X_{mín,c} = X_{mín} + (A * 0,05)$$



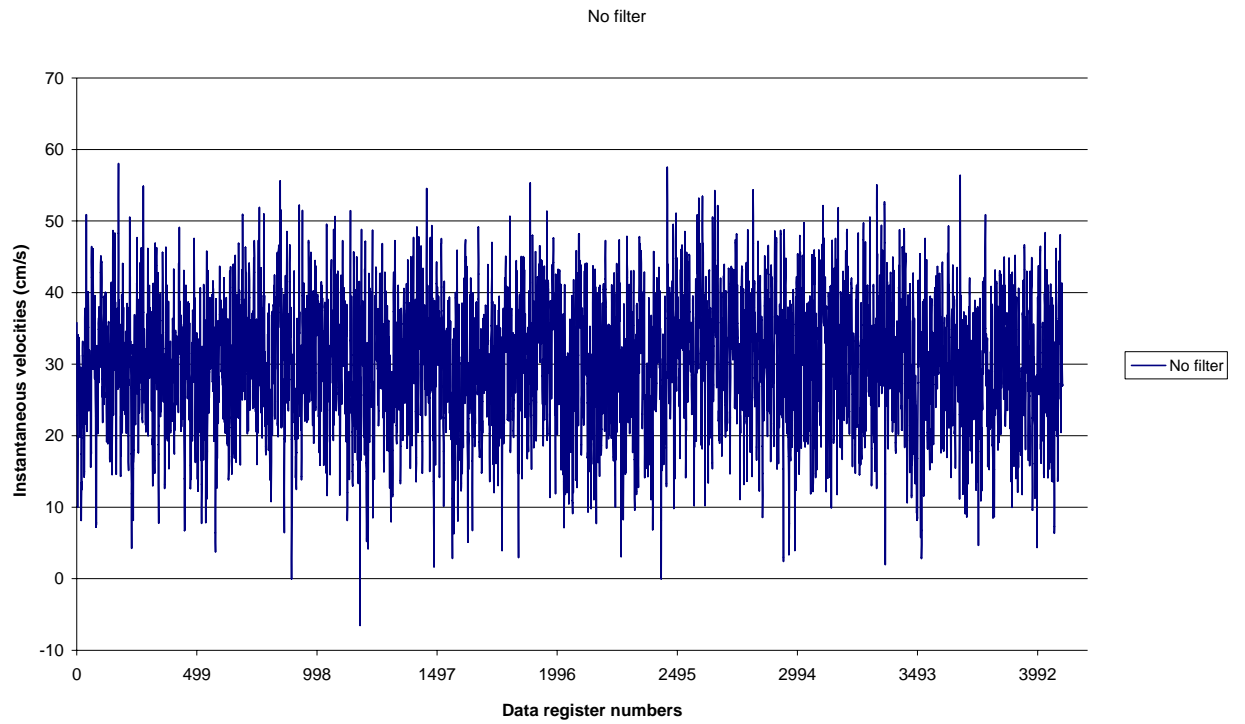
Igualmente este valor de corte inferior pone un límite a la serie inicial de modo que los valores menores a este valor de corte quedan reducidos al límite  $X_{\min,c}$ . La serie inicial queda así restringida a un límite inferior mayor que el valor  $X_{\min}$  inicial.

A este proceso se le denomina PRIMER FILTRADO. Se han llegado a realizar varios filtrados repitiendo el proceso descrito a aquellas muestras que lo requiriesen. Ninguna muestra se ha filtrado más de cuatro veces para no alterar excesivamente la serie inicial.

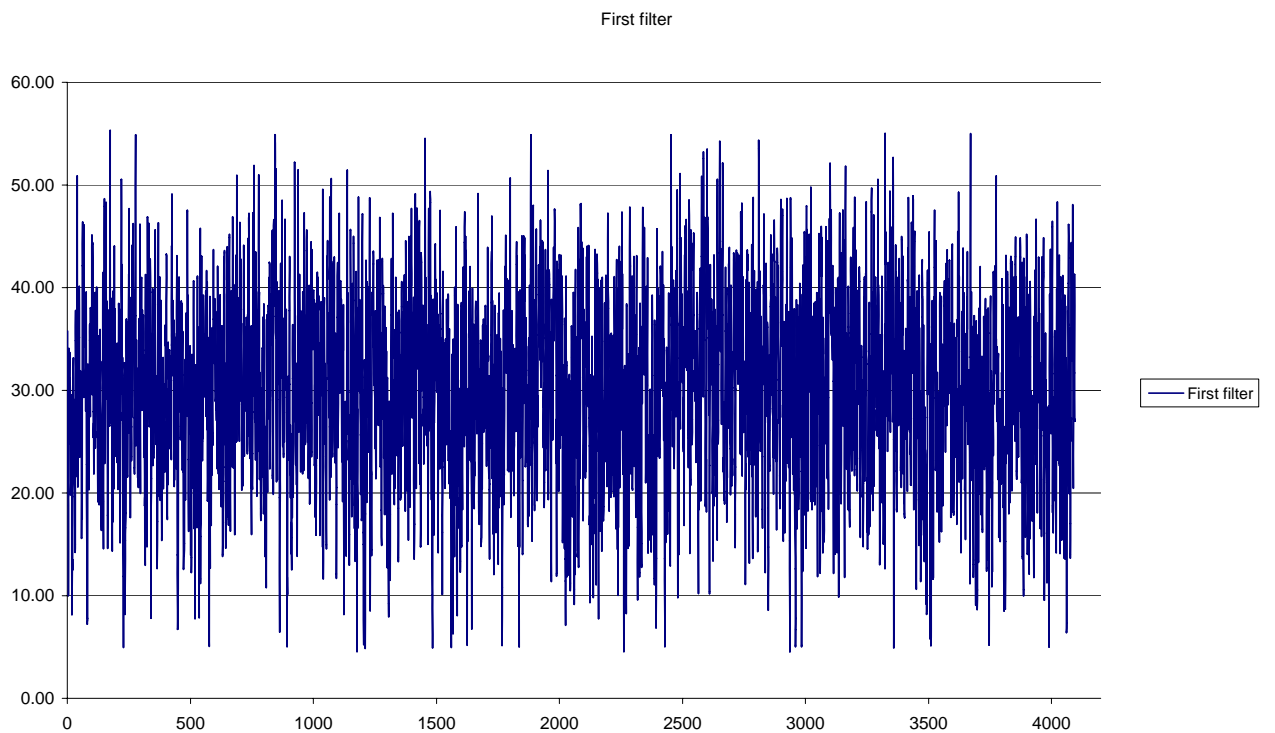
			<b>1° Filtrado</b>		<b>2° Filtrado</b>		<b>3° Filtrado</b>		<b>4° Filtrado</b>
<b>Sample</b>	<b>V1/X/E</b>	<b>L sup.</b>	<b>L inf.</b>	<b>L sup.</b>	<b>L inf.</b>	<b>L sup.</b>	<b>L inf.</b>	<b>L sup.</b>	<b>L inf.</b>
1	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79
2	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84
3	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82
4094	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69
4095	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01
4096	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17
Xmedia=	30.03		<b>30.03</b>		30.04		30.06		30.08
Xmax=	57.64		54.88		52.39		50.16		48.15
A1=	27.61		24.84		22.35		20.10		18.07
Xmin=	2.41		5.19		7.69		9.96		12.01
A=	55.23		49.69		44.70		40.20		36.13
A*0,05=	2.76		2.48		2.23		2.01		1.81
Xmax c=	54.88		52.39		50.16		48.15		46.34
Xmin c=	5.17		7.68		9.93		11.97		13.82

**Tabla 2.1. Modelo del tratamiento de datos**

A continuación se muestra el resultado gráfico del filtrado de la muestra anterior (Figuras 2.8 y 2.9), donde vemos que la muestra se homogeniza tras realizar un solo filtrado.



**Figura 2.8. Datos sin filtrar**



**Figura 2.9. Datos después del primer filtrado**

## **B. Labor experimental y filtrado de datos**

A continuación se presenta un resumen de las propiedades fundamentales de los resaltos libres, comprobándose y proponiéndose nuevas formulaciones.

### ▪ **Características de la longitud del resalto**

En la figura 2.10, se han incluido nuestros resultados experimentales en los resaltos libres establecidos,  $L_j$ ,  $L_r$  y  $L_t$ , hemos descartado aquellas medidas anómalas o que se alejaban mucho de los resultados esperables, pues al ser la medición de la longitud del resalto un criterio de medida subjetivo, se pueden producir algunas mediciones incoherentes que no deben ser tomadas en cuenta.

Para contrastar estos resultados con otros ya afianzados se han incluido los resultados experimentales obtenidos por Ohtsu et al. (1990), representando las cantidades  $L_{rj}/y_2$ ,  $L_j/y_2$ ,  $L_t/y_2$  medidas en función de  $F_1$  para un Caso “a” (referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo potencial) y un Caso “b” (referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo totalmente desarrollado). También se han incluido las medidas de Márquez (2006) recogidas en su proyecto y la ley teórica según el Bureau of Reclamation para resaltos libres.

En la figura 2.11, presentamos únicamente los valores de  $L_j$  obtenidos en nuestro proyecto, comparados con los de Márquez (2006), hemos de destacar que tanto en nuestro proyecto, como en el que realizó Márquez, el flujo era parcialmente desarrollado, por tanto los valores de Ohtsu que nos afectan son los del caso “a” :

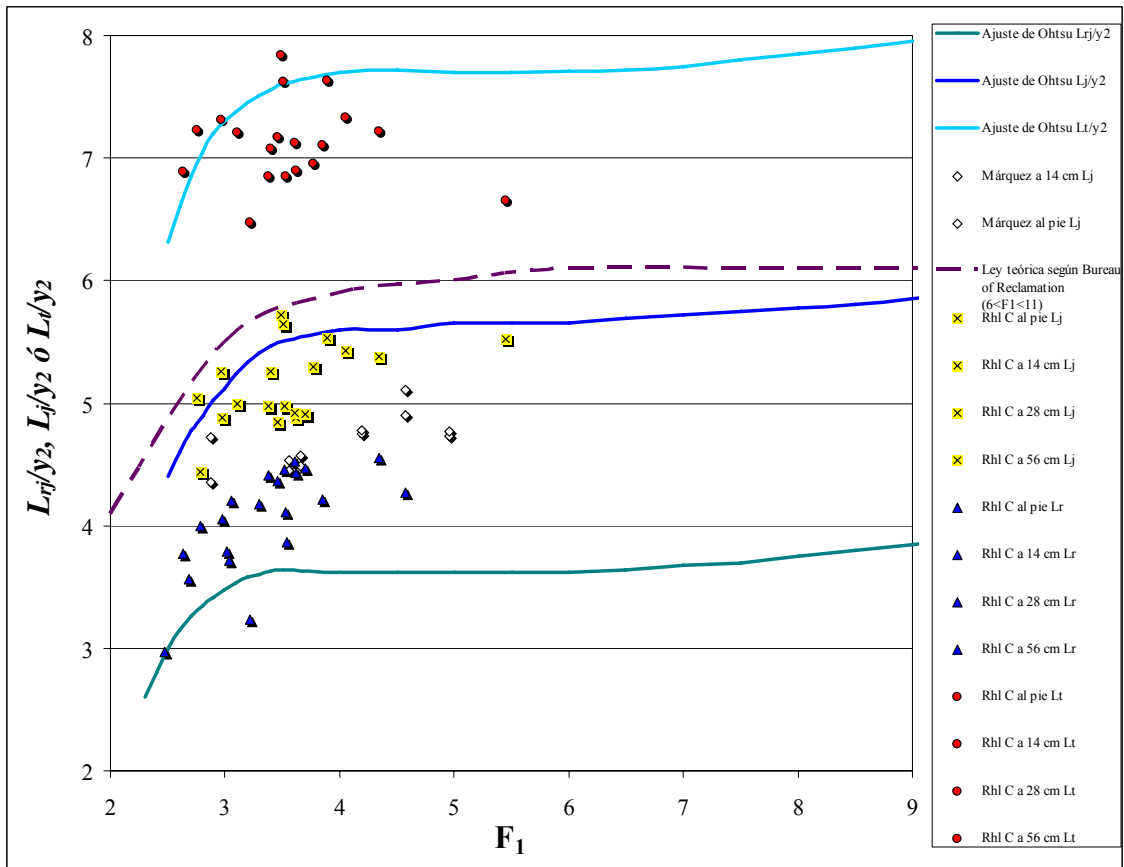


Figura 2.10. Características de longitud del resalto libre  $L_{rj}/y_2$ ,  $L_j/y_2$ ,  $L_l/y_2$

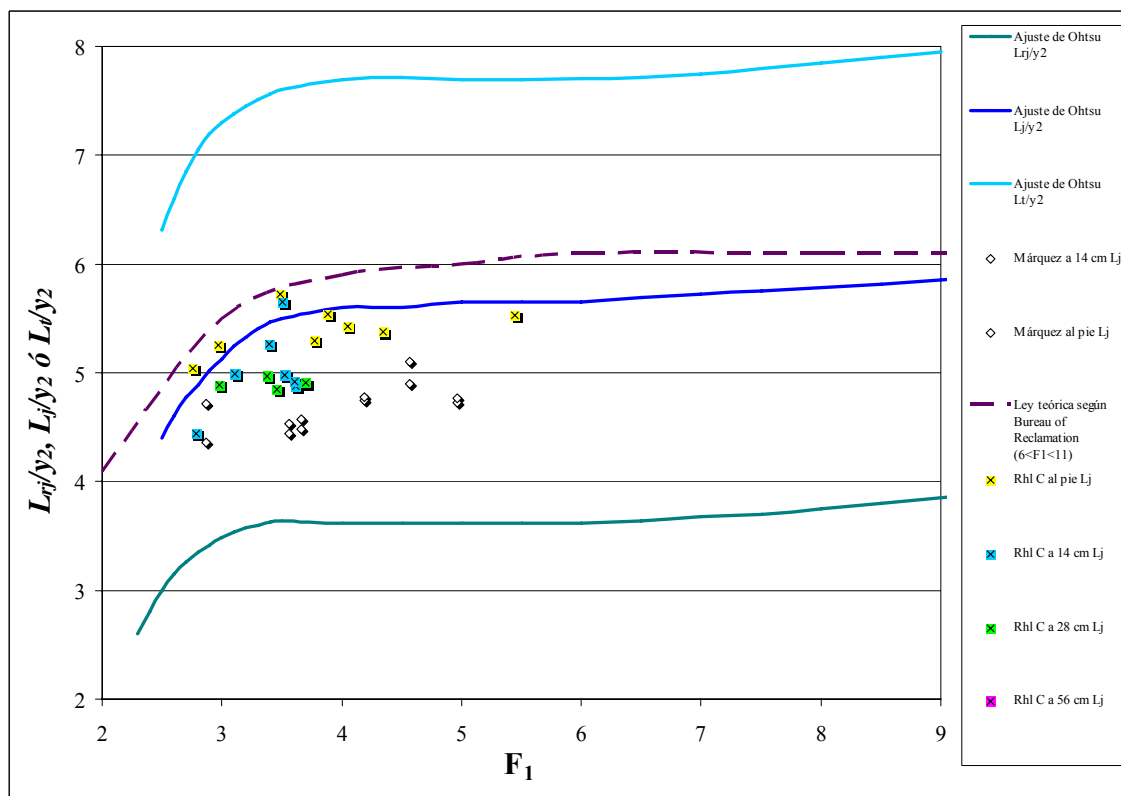


Figura 2.11. Características de longitud del resalto libre  $L_j$

Se puede observar que la longitud de resalto medido en nuestro laboratorio se encuentra entre los valores  $L_{rj}$  y  $L_j$  establecidos por Ohtsu et al. (1990). Esto está totalmente de acuerdo con el criterio establecido para medir nuestra longitud de resalto hidráulico que se encuentra entre la longitud de rulo del resalto  $L_{rj}$  y la longitud del resalto  $L_j$  definida por otros autores.

En la figura 2.12, análogamente a cómo se ha realizado en la figura 2.10, se han representado los valores de  $Lr/y1$ ,  $Lt/y1$ , y  $Lj/y1$ , se puede observar que los valores de  $Lt$  son superiores a los de  $Lj$ , y éstos superiores a los de  $Lr$  junto con la ecuación propuesta por Silvester (1964), también se recogen los valores medidos por Márquez (2006), al igual que hemos realizado anteriormente, analizamos y descartamos si procede los valores que alteran la serie.

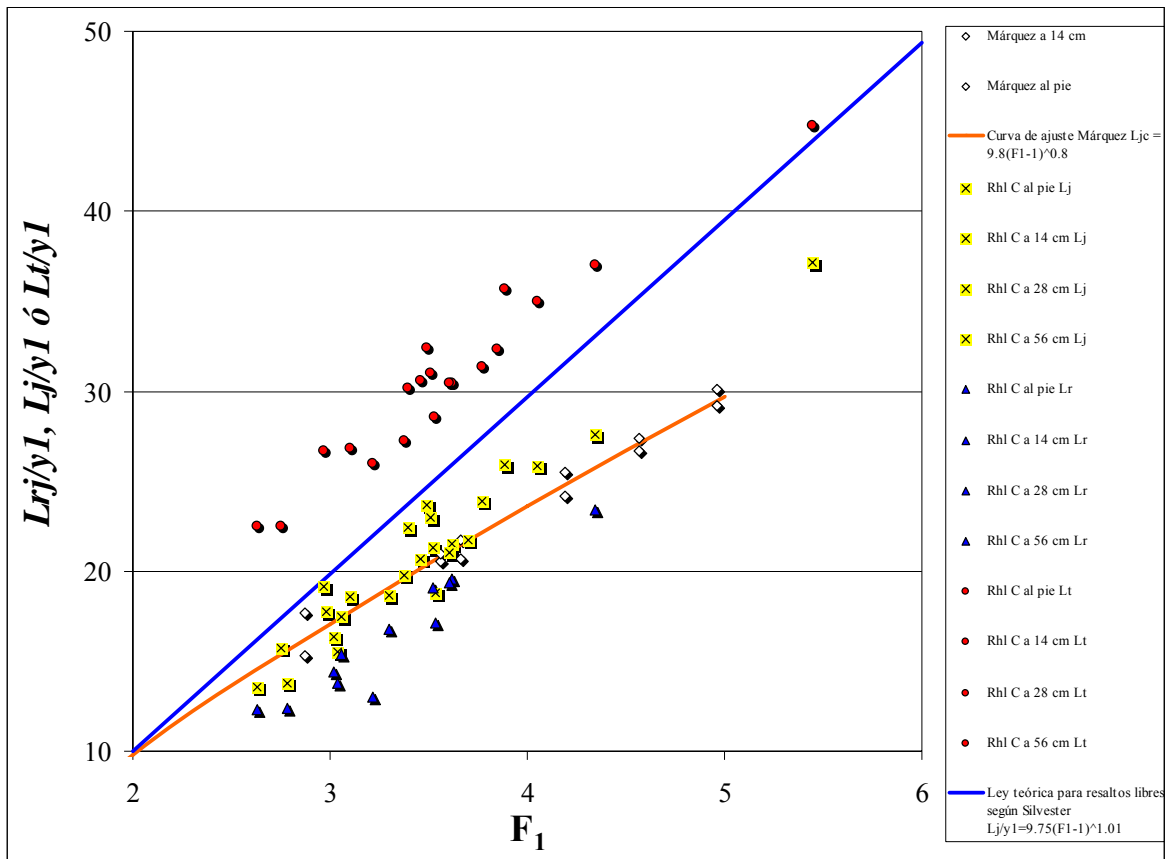


Figura 2.12. Características de la longitud del resalto libre  $Lr/y1$ ,  $Lt/y1$ , y  $Lj/y1$ .

En la figura 2.13 se presenta la relación  $L_j / y_1 = f(F_1)$  junto con la ecuación propuesta por Silvester (1964):

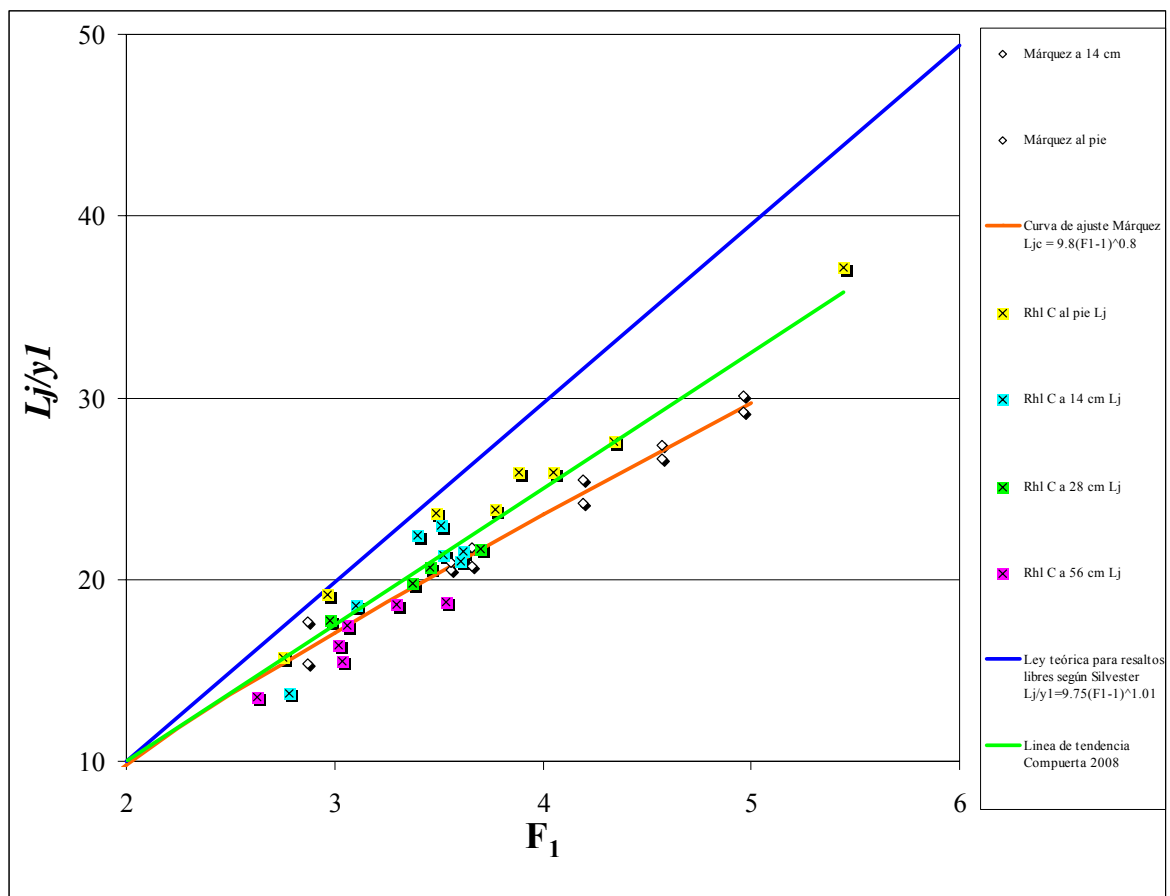
$$L_j / y_1 = 9,75(F_1 - 1)^{1,01}$$

La curva de ajuste obtenida por Márquez (2006) fue:

$$L_{jc} / y_1 = 9,8(F_1 - 1)^{0,80}$$

La curva de ajuste a nuestros datos experimentales, es la siguiente:

$$L_{jc} / y_1 = 9,51(F_1 - 1)^{0,879}$$



**Figura 2.13. Características de longitud del resalto libre**

Se puede observar que para valores de Froude bajos los valores de  $L_{jc}/y_1$  son similares, pero al aumentar el Froude nuestros valores experimentales son cada vez más pequeños comparados con los de Silvester. Esto también es concordante con el criterio definido para medir la longitud de resalto hidráulico.

- **Relación entre profundidades inicial y final**

A continuación se representa la ecuación de los calados conjugados de Bélanger:

$$\frac{y_2}{y_1} = (\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1) / 2$$

Se ha representado la ley teórica propuesta por Rajaratnam (1965), que demostró con diversos experimentos que el valor experimental de  $y_2/y_1$  para un  $F_1$  dado era algo más pequeño que el valor de  $y_2/y_1$  dado por la ecuación de Bélanger debido a los efectos de la tensión de corte del fondo integrada  $S_f$ . Por tanto, la ecuación propuesta por Rajaratnam, en la que se incluye el término  $S_f$  es la siguiente:

$$(y_2 / y_1)^3 - [2F_1^2 + 1 - S_f](y_2 / y_1) + 2F_1^2 = 0$$

Leutheusser y Kartha (1972) llevaron a cabo un estudio semi-empírico de resaltos hidráulicos rechazados aguas abajo de una compuerta. Sus ensayos corresponden a flujos totalmente desarrollados. Propusieron la siguiente relación de los calados conjugados:

$$F_1^2 = \frac{\frac{y_2}{y_1} \left[ \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2 - 1 \right]}{2.06 \left[ \frac{y_2}{y_1} - 1 \right] - 0.0244 \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2}$$

Presentamos en la figura 2.14 los valores de  $y_2/y_1$  para todos los resaltos con todos sus desplazamientos, a priori no podemos notar ninguna diferencia, pero estos valores no son correctos, pues están afectados por fenómenos de escala, y además, se representan sin distinción alguna valores para flujo “no desarrollado y desarrollado”, así que tendremos que tratar estos datos para obtener unos resultados coherentes.

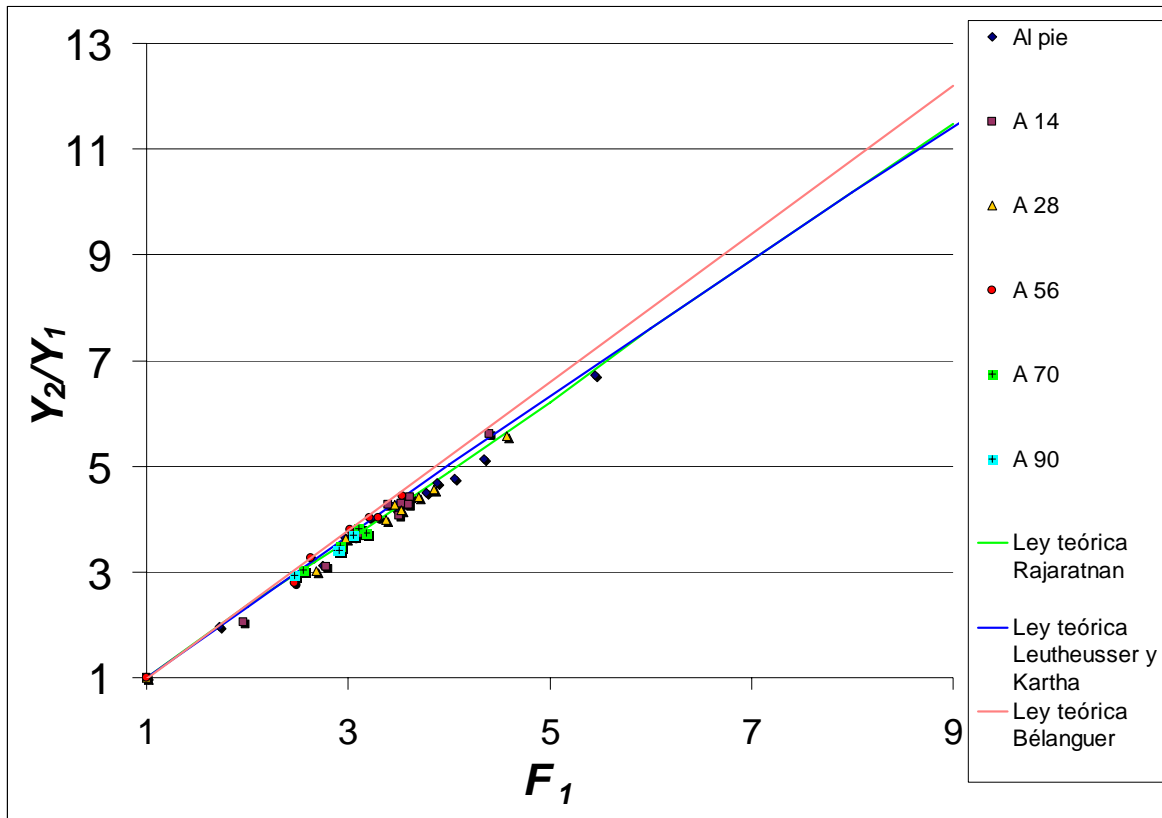


Figura 2.14. Relación entre  $\frac{Y_2}{Y_1}$  y  $F_1$

El criterio que hemos seguido para clasificar los flujos es similar al de Chanson (2005), en sus proyectos, el cual comprobó que para  $Reynolds > 21.000$  ya no se producen efectos de escala, nosotros consideraremos  $Re > 25.000$  como umbral a partir del cual, los efectos de escala son mucho menores.

En la figura 2.15 se presentan todos los desplazamientos una vez se han filtrado con el criterio de Chanson (2005), es decir, sólo se presentan los datos que tiene un  $Re > 25.000$ .

La figura 2.16 muestra los datos de la figura 2.15 después de filtrarlos con el criterio de que el flujo es “no desarrollado” para distancias a la compuerta menores de 30 veces el calado contraído, medidas desde el inicio del resalto, es decir, se presentan los resaltos desplazados para unas distancias menores de 56 cm desde la compuerta.



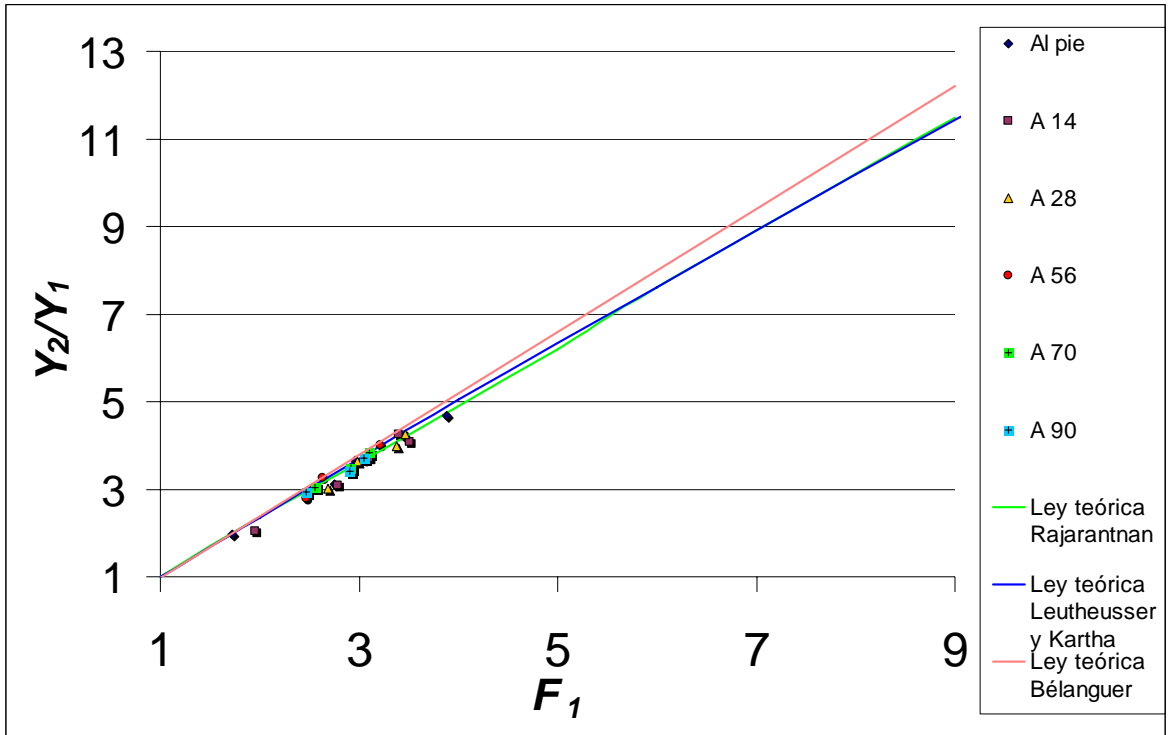


Figura 2.15. Flujos no desarrollados y desarrollados para  $Re > 25.000$ . Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

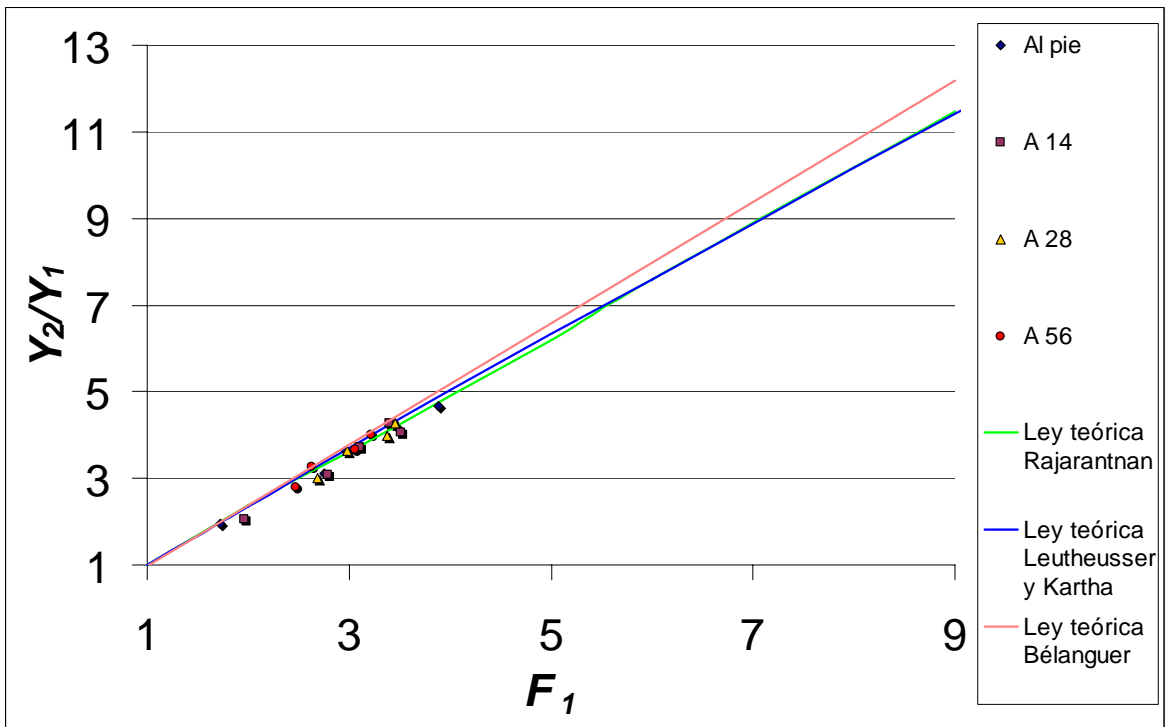


Figura 2.16. Flujos no desarrollados para  $Re > 25.000$ . Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

En la figura 2.17 se presentan flujos desarrollados y no afectados por efectos de escala, es decir, los resaltos que se encuentran a 70 y 90 cm de la compuerta, pues consideramos que están a una distancia mayor de 30 veces el calado contraído.

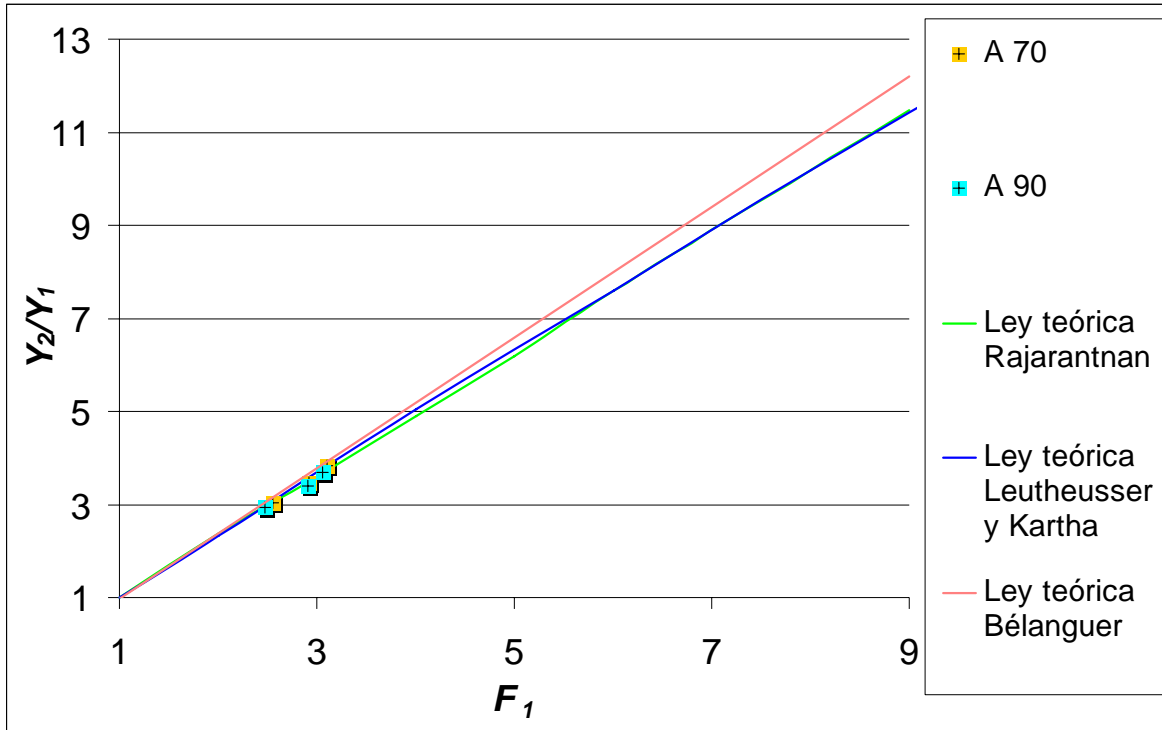


Figura 2.17. Flujo desarrollado para  $Re > 25.000$ . Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

En la figura 2.18 se presentan los datos para flujo desarrollado tras el azud, ya que hemos realizado un proyecto conjuntamente al de la compuerta, al ser flujo desarrollado tienden a la ley de Rajaratnan, los resultados presentados se consideran filtrados y no están afectados por los efectos de escala.

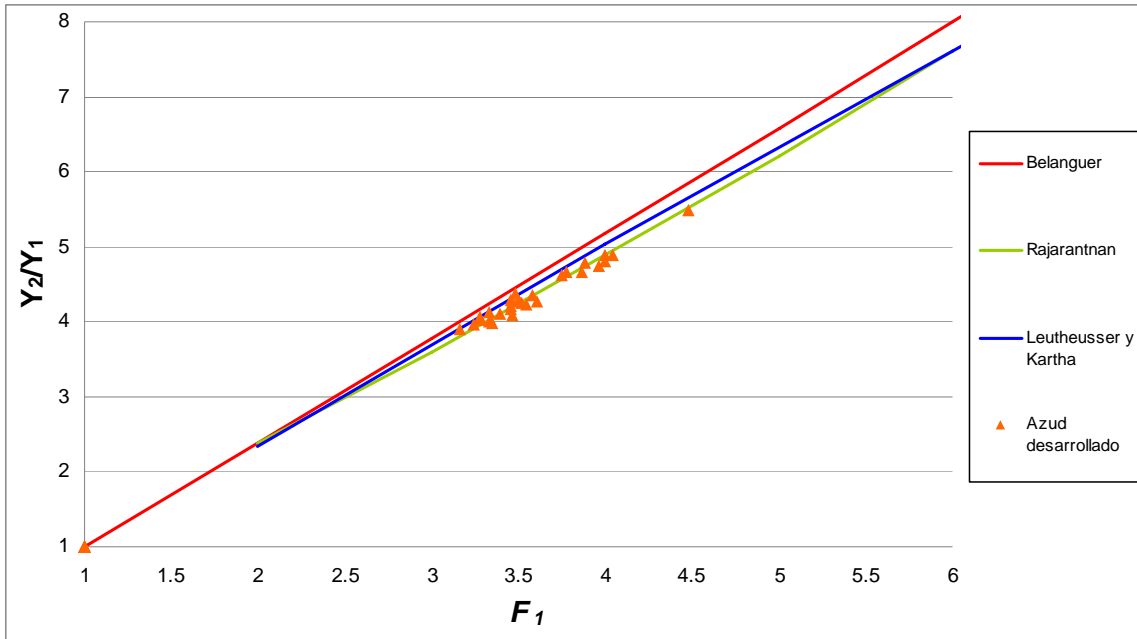


Figura 2.18. Flujo desarrollado tras azud, sin efecto de escala. Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

En la figura 2.19 se presentan los resultados para flujo desarrollado tras la compuerta, conjuntamente con los del azud, se obtienen unos resultados muy coherentes, debemos remarcar que, la longitud necesaria para que se desarrolle el flujo, es similar en ambas estructuras, unas 30 veces  $y_c$ , ambos valores caen en la ley de Rajarantnan.

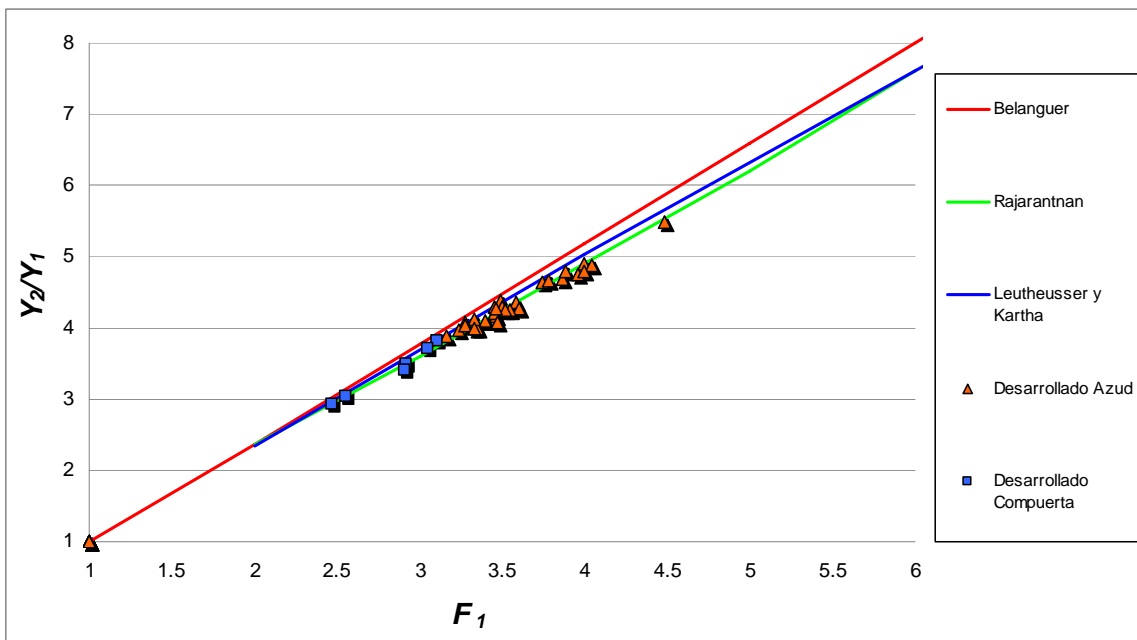


Figura 2.19. Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

Una interpretación de los gráficos presentados de las ecuaciones de Bélanguer, Leutheusser y Kartha y Rajaratnam :

- Leutheusser y Kartha llevaron a cabo un estudio semi-empírico, obtuvieron altos números de *Froude*, la ley que describieron es poco práctica y aunque es curva, se asemeja en ocasiones a la de Rajarantnan, es por su complejidad que esta ley ha sido menos representativa, se encuentra entre los valores de Bélanguer y Rajarantnan, ésto no hace pensar que el campo de estudio de los calados conjugados, aún tiene muchas lagunas y necesita ser examinado más profundamente, pues las teorías de muchos autores al respecto son contradictorias entre sí.

- Al tener valores altos de *Reynolds*, la capa límite turbulenta da mayores fuerzas de fricción que la laminar, pero presenta una mayor resistencia al desprendimiento.

- La relación de calados conjugados en los flujos totalmente desarrollados y parcialmente desarrollados en el estudio de la compuerta tienden a la ley de Rajarantnan, pero por diferentes motivos, como se expone a continuación.

- Tenemos dos efectos contrapuestos, por un lado, la distribución de velocidades es muy irregular y tiende a aumentar la pérdida de energía.

- Sin embargo, existe un efecto lubricante al producido por el espesor de la capa límite que tiende a reducir la pérdida de energía, al ser el contorno del canal lo que perturba y altera el flujo, perdemos fricción con el contorno.

- En cuanto a cuál de los dos efectos es mayor:

-Para las condiciones del aliviadero, y compuerta a 70 y 90 cm, analizando los valores no están afectados teóricamente por efectos de escala, al estar el flujo desarrollado, deberían tender a Rajarantnan, pues se produce una mayor fricción.

- En cuanto a la compuerta para flujos no desarrollados, se compensan estos dos efectos contradictorios, motivo por el cuál los resultados experimentales tienden a Rajarantnan, aunque teóricamente deberían tender a Bélanguer.

- Finalmente debemos destacar, que para el caso de la compuerta, aunque los experimentos de Chanson (2005) apuntan un  $Re > 21.000$  como dato para empezar a considerar que prácticamente no hay efectos de escala, en nuestro estudio podríamos concluir que los efectos de escala desaparecerían a partir de  $Re > 30.000$ , cifra que corresponde con los mayores  $Re$  que han sido medidos en el proyecto.

En nuestro proyecto, hemos considerado como aceptables, medidas con valores de  $Reynolds > 25.000$ .

- Para pequeños caudales las fuerzas viscosas son muy importantes.

Para asegurarnos de que los resultados que obteníamos al pie de la compuerta eran correctos, se midieron los calados contraídos aguas abajo de la compuerta para todos los resaltos al pie, además se han utilizado las gráficas de los coeficientes de contracción para obtener a partir de la apertura de compuerta y la carga aguas arriba de ésta, estos coeficientes, que multiplicándolos por la apertura de compuerta nos darán el calado contraído teórico e incluso la distancia a la que debe ser medido  $y_I$ .

Se observa claramente que nuestros resultados experimentales caen por debajo de los teóricos sistemáticamente.

Se representan únicamente los valores con  $Re > 25.000$  para cerciorarnos de que los valores están menos afectadas por los efectos de escala.

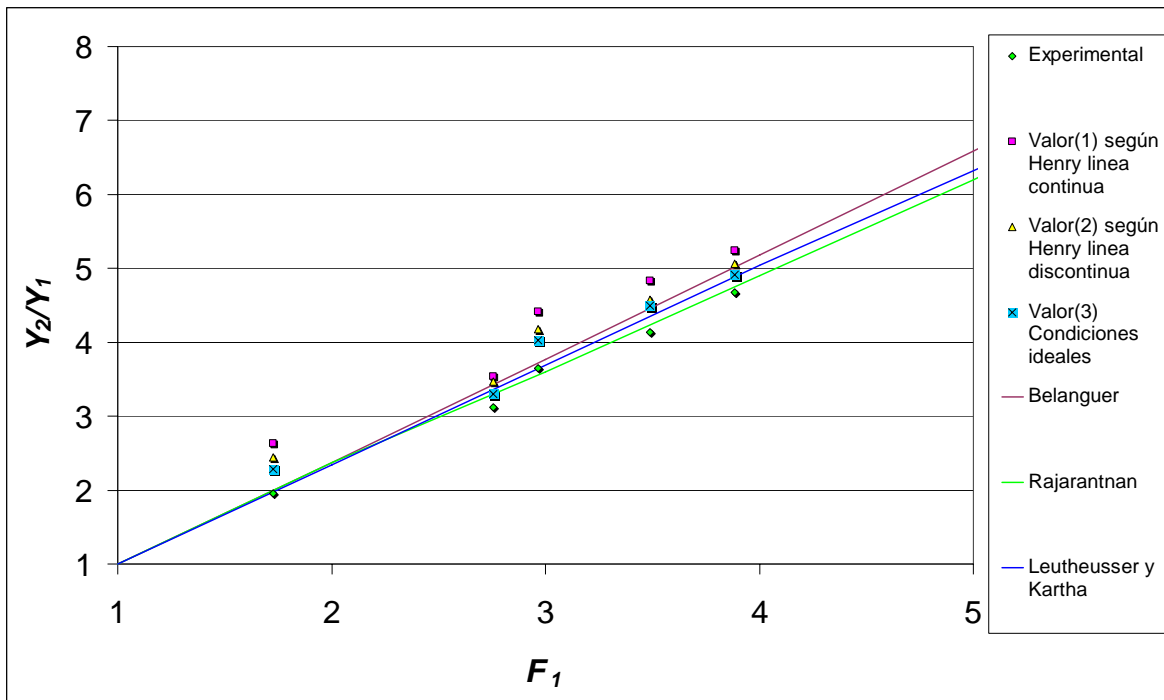


Figura 2.20. Comparación valores teóricos y reales  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

Finalmente podemos afirmar, que los resultados teóricos que mejor se ajustan a los obtenidos experimentalmente son los “teóricos 3”, estando los valores “teóricos 2” más cerca que los “teóricos 1”, pero aún lejos de los experimentales.

▪ **Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos**

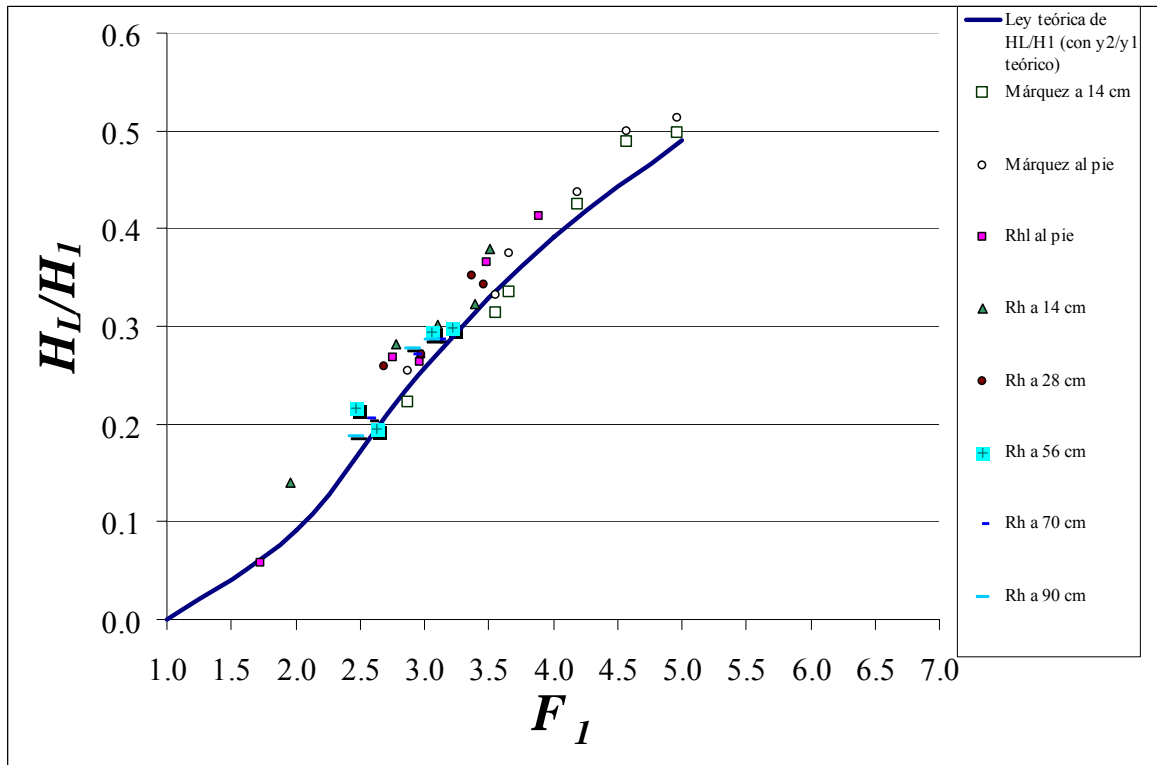
La pérdida de energía  $H_L$  entre el inicio y el final del resalto libre puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$H_L = H_1 - H_2 = (v_1^2 / 2g + y_1) - (v_2^2 / 2g + y_2)$$

Utilizando la ecuación anterior junto con la ecuación de continuidad, la pérdida de energía relativa puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{H_L}{H_1} = \frac{2(1 - \frac{y_2}{y_1}) + (1 - \frac{1}{(\frac{y_2}{y_1})^2})F_1^2}{2 + F_1^2}$$

La relación  $H_L / H_1 = f(F_1)$  se muestra en la figura 2.21:



**Fig. 2.21. Pérdida de energía relativa en resaltos libres**

Analizando la representación de la pérdida de energía relativa en los seis resaltos libres estudiados, en función de los valores de *Froude* considerados, y la relación correspondiente  $y_2/y_1$  según la Ecuación de Bélanger de los calados conjugados, se observa que el resultado de la comparación entre los valores teóricos y los experimentales es satisfactorio, también se recogen los resultados de las mediciones de Márquez (2006).

Aún teniendo en cuenta que para algunos valores, los resultados experimentales se desvían algo más de los teóricos correspondientes.

Es importante tener en cuenta que para el resalto libre formado al pie de la compuerta (R.L.0) ,a 14 cm de la compuerta (R.L.14), a 28 cm (R.L.28) y a 56 cm (R.L.56), considerados no desarrollados, existe una pérdida de energía mayor, que para los resaltos medidos a 70 y 90 cm, considerados desarrollados constituyendo parte de esta diferencia de energía relativa, la pérdida de energía relativa que se produce a través de la curva de remanso  $H_3$  parcialmente desarrollada.

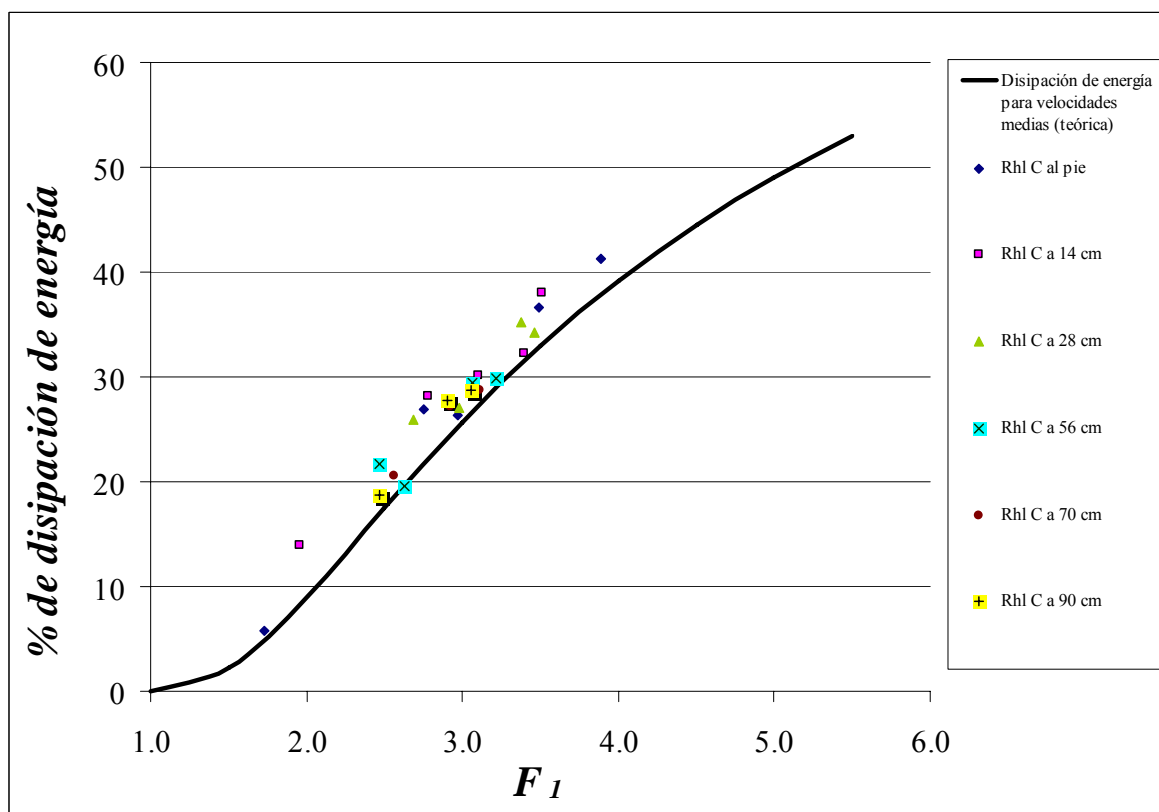
Las siguientes expresiones se utilizaron para calcular la disipación de energía:

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right) \times 100$$

$$\text{donde : } H_1 = (v_1^2 / 2g + y_1) \quad \text{y} \quad H_2 = (v_2^2 / 2g + y_2)$$

En la figura 2.22 se presentan los valores medidos de disipación de energía para  $Re > 25.000$ , junto con los de Márquez (2006), como podemos observar, los resultados experimentales son mayores que los teóricos.

Hemos representado todos los resaltos, es decir, para flujo desarrollado y no desarrollado.



**Figura 2.22. Disipación de energía para velocidades medias,  $Re > 25000$**

En la figura 2.23, se presentan los resultados, para  $Reynolds > 25.000$ , y valores para los flujos no desarrollados (hasta 56 cm) se ha dibujado la ley teórica que mejor se ajusta a estos valores.



Se ha realizado también un ajuste para los valores de flujo desarrollado, con desplazamientos de 70 y 90 cm, y  $Re > 25.000$ , que como se puede observar en la figura 2.24, son ligeramente inferiores a los valores correspondientes a flujo no desarrollado, como ya hemos dicho, ésto es debido a que la energía potencial disponible al comienzo del resalto para estos resaltos, es menor que la energía potencial disponible para resaltos en flujo no desarrollado.

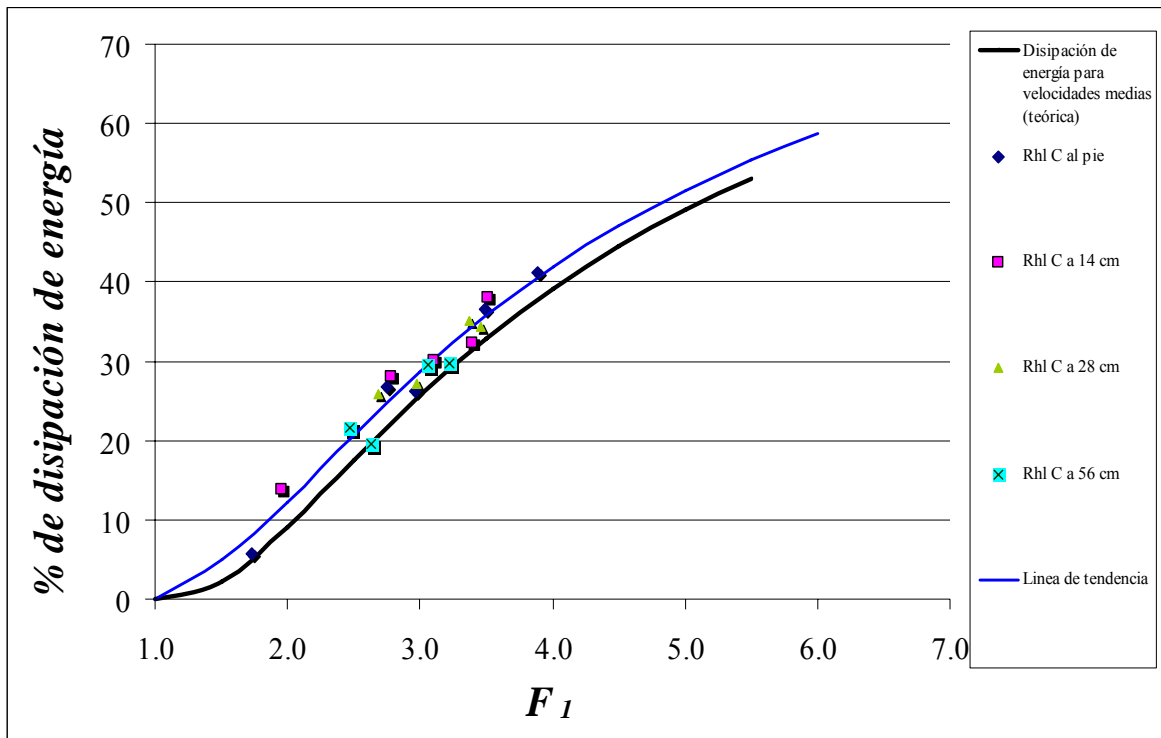
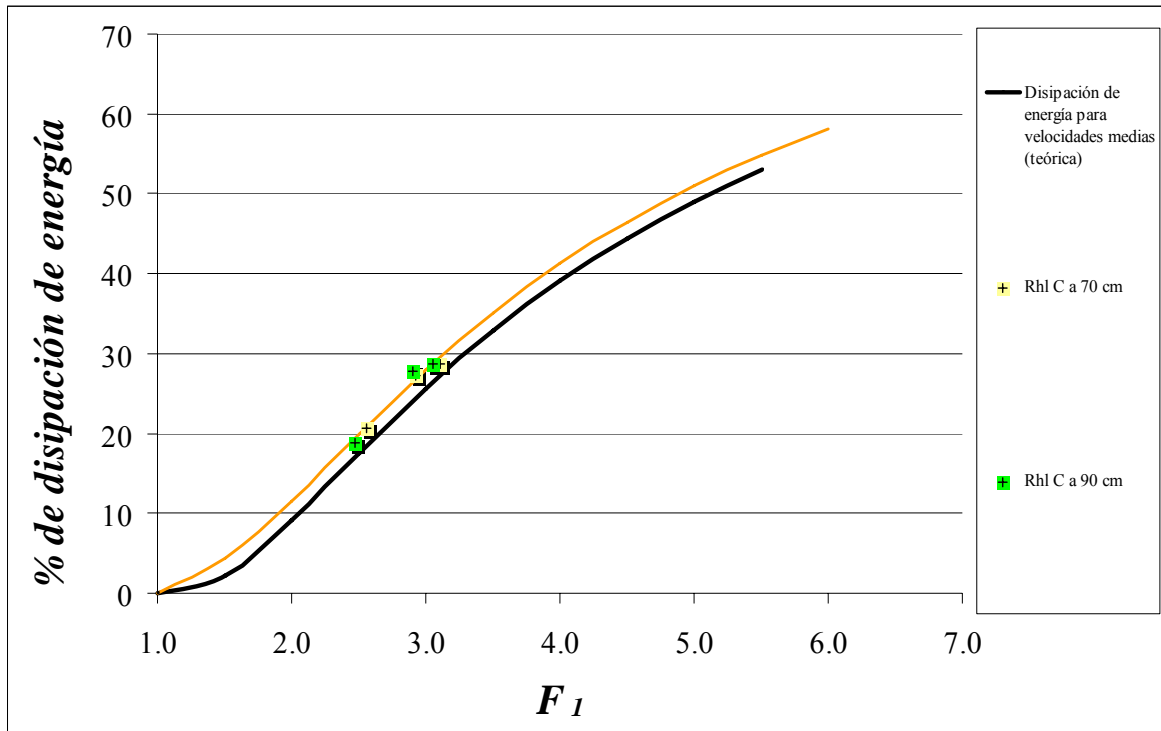


Figura 2.23. Disipación de energía para velocidades medias,  $Re > 25000$ , flujos no desarrollados



**Figura 2.24. Disipación de energía para velocidades medias,  $Re > 25000$ , flujos desarrollados**

Estos resultados para flujos desarrollados y con  $Reynolds > 25.000$ , han sido comparados con las configuraciones similares para el azud, una visualización de los resultados nos permitirá una rápida comprensión en la figura 2.25.

Se concluye que los resultados son totalmente coherentes, encajan a la perfección los valores de disipación de energía, hemos incluido la ley teórica que representan estos valores, por lo que concluimos que hemos logrado configuraciones de resaltes similares.

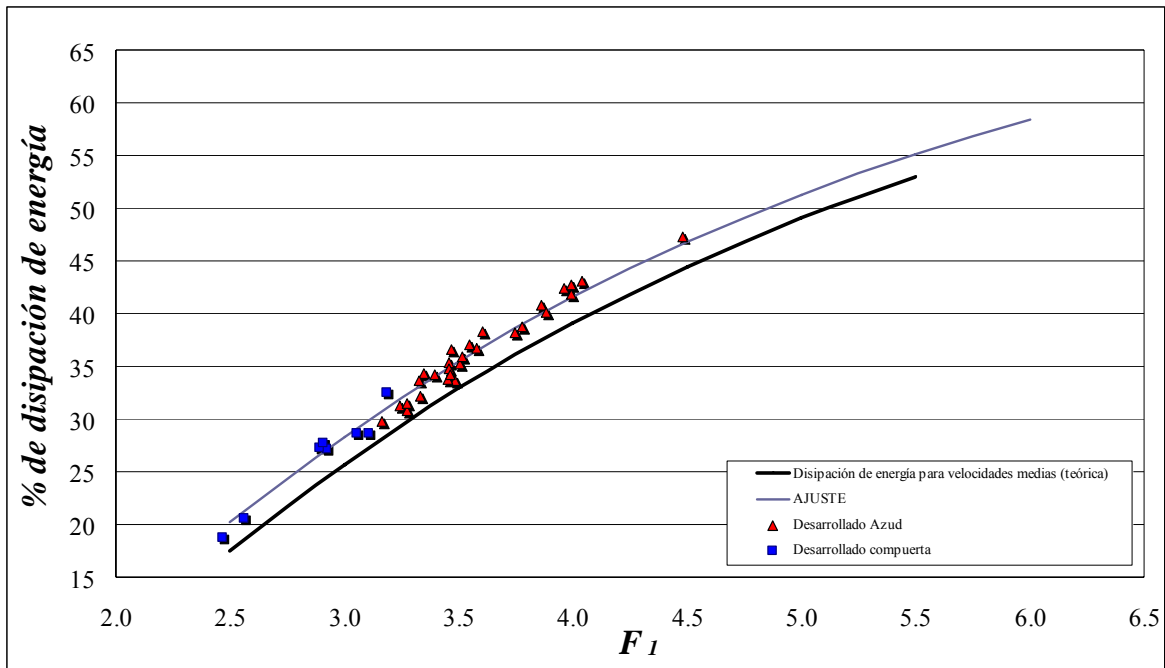


Figura 2.25. Disipación de energía para velocidades medias, flujos desarrollados Azud y Compuerta

- **Longitud del resalto hidráulico**

En la figura 2.26 se representan nuestros resultados experimentales junto con las siguientes ecuaciones:

$$\log_{10} \frac{L_{rj}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,40; \quad \text{para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5)$$

$$\log_{10} \frac{L_j}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,58; \quad \text{para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5) \text{ y } (0,14 \leq H_L/H_1 \leq 0,71)$$

$$\log_{10} \frac{L_i}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,72; \quad \text{para } (2,3 \leq F_1 \leq 9,5)$$

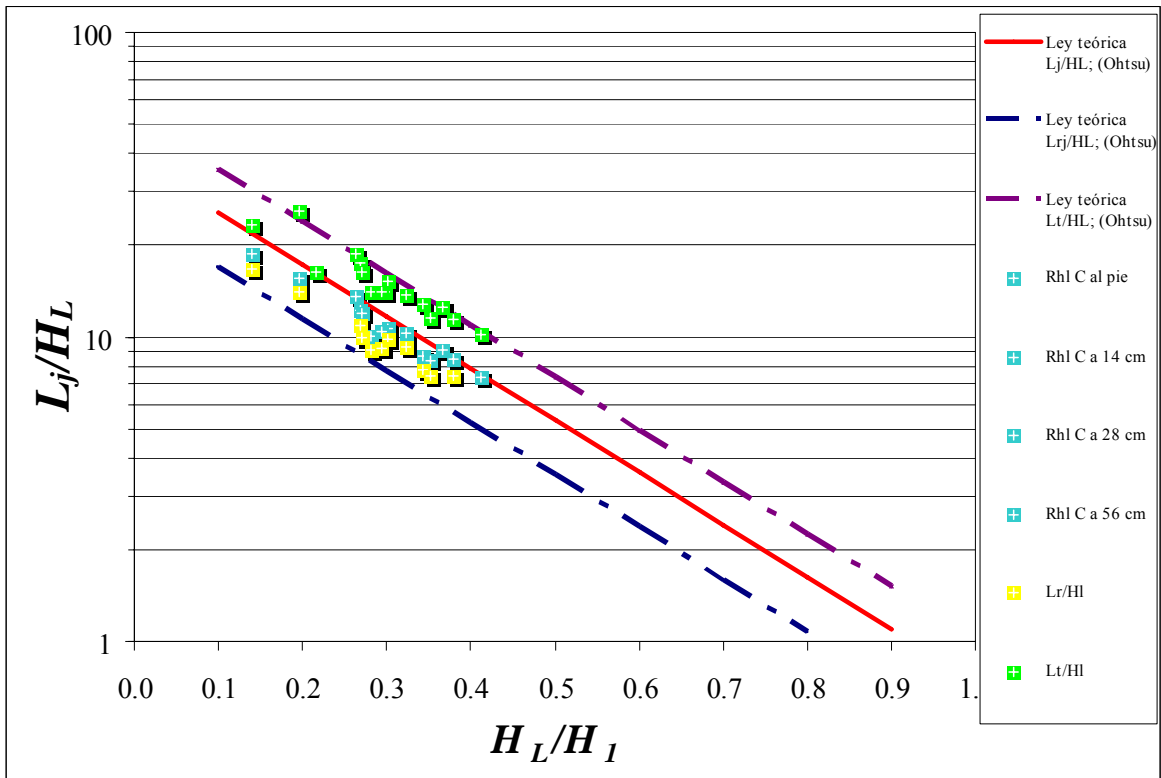


Figura 2.26. Relación entre  $L_j/H_L$  y  $H_L/H_1$

En la figura 2.27, se presentan los valores únicamente de  $L_j$ , descartando aquellos con un número de Reynolds menor de 25000.

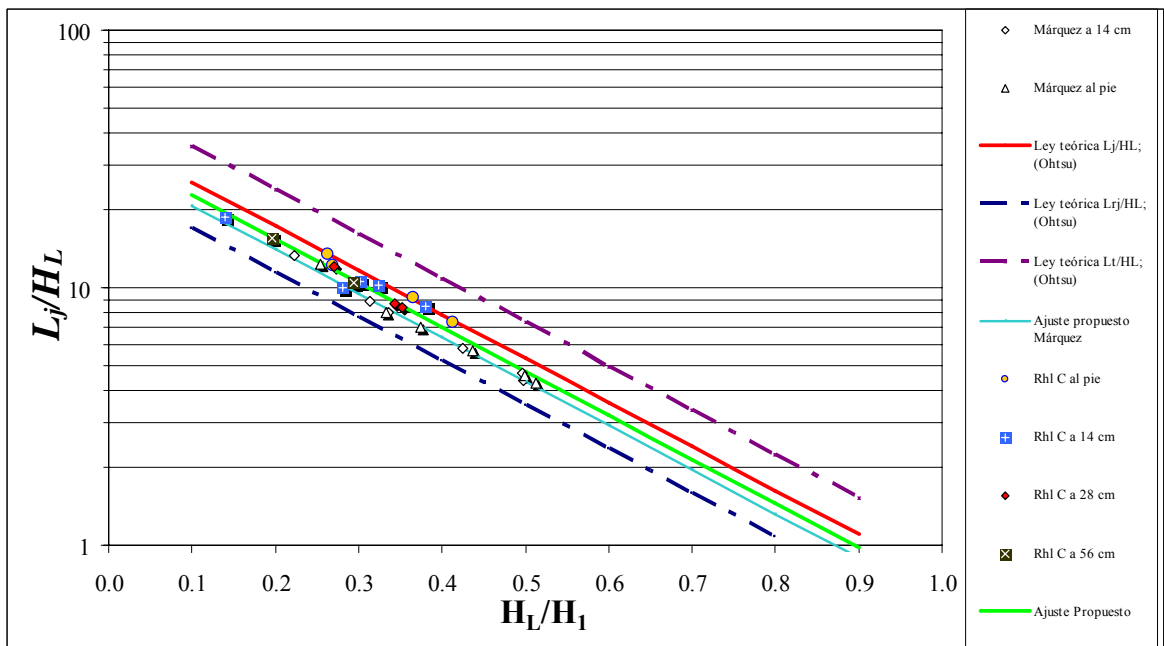


Figura 2.27. Relación entre  $L_j/H_L$  y  $H_L/H_1$

Comparando las leyes teóricas propuestas por Ohtsu et al. (1990) con los resultados experimentales se observa los valores que se han considerado para ambos resaltos ensayados se corresponden con medidas de longitud de resalto  $L_{jc}$  y éstos se encuentran entre la ley teórica para la longitud de resalto  $L_j$  y la ley teórica para la longitud del rulo  $L_{rj}$ , lo que nos indica que la longitud  $L_{jc}$  considerada cumple el criterio establecido. Se propone a continuación una ley de ajuste a nuestros resultados experimentales, al igual que antes, se han analizado y descartado si procedía los valores anómalos:

$$\log_{10} \frac{L_{jc}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,53; \quad \text{para } (1,96 \leq F_1 \leq 5,45)$$

▪ **Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos**

Examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, se encuentra una distribución semejante de velocidades independiente de  $F_1$  y  $x$  dentro del rango  $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$ :

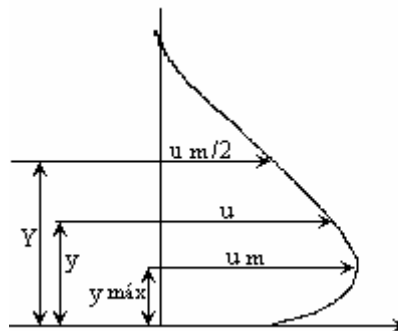


Figura 2.28. Definición esquemática de  $Y$  y  $y_{máx}$

Esta distribución de velocidad se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left( \frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k$$

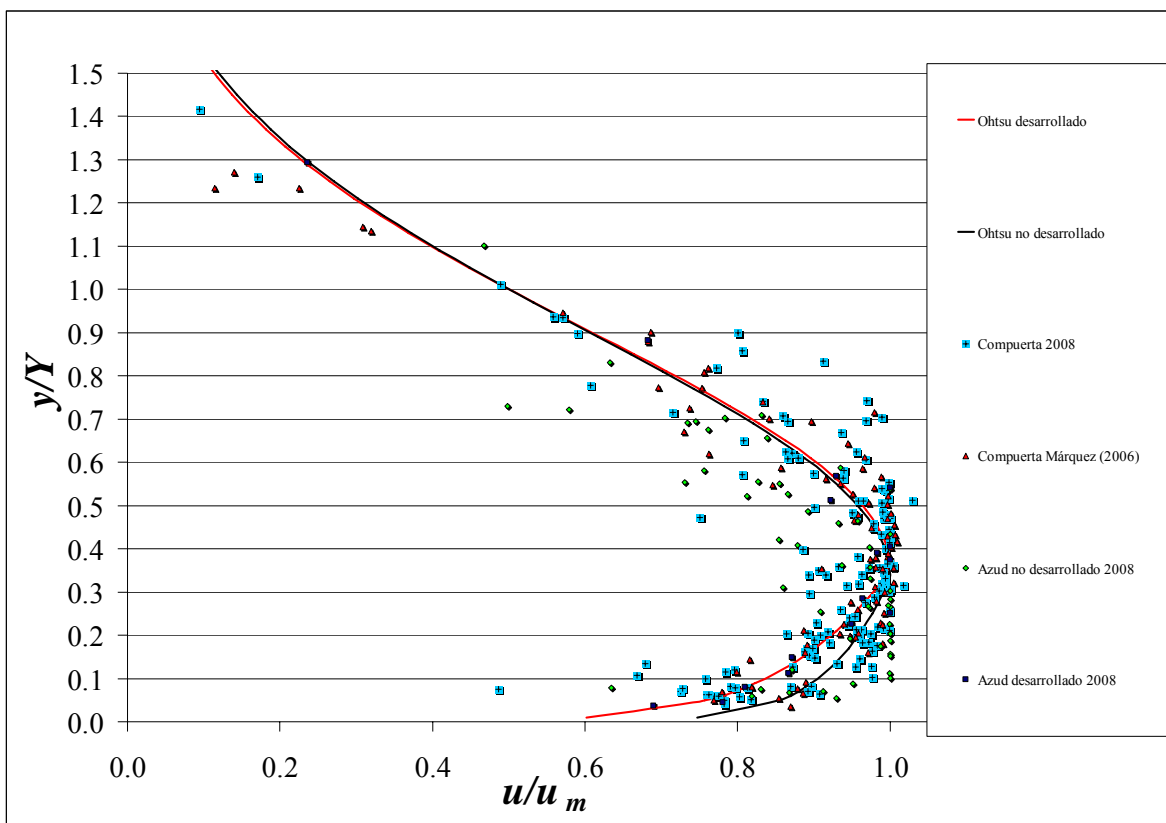
$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{1,177}{1-k} \left( \frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1,5$$

donde  $k = y_{máx} / Y$

A continuación se representan las leyes teóricas obtenidas experimentalmente por Ohtsu para el Caso “a”, flujo parcialmente desarrollado donde  $k=0,333$  y  $n=12$ , y para el Caso “b” flujo totalmente desarrollado, donde  $k=0,351$  y  $n=7$ .

Para cada caudal se han representado los resultados obtenidos experimentalmente para resaltos libres, aunque debido a limitaciones de los medios de medición, ciertos valores han debido ser estimados por extrapolación, ya que la sonda no permite medir con calados muy altos, como máximo hasta un 60 % del calado.

En la figura 2.29, se presentan los resultados obtenidos para todos los caudales y todos los desplazamientos de resalto, no se ha podido hacer ningún cribado entre flujo desarrollado y no desarrollado en cuanto a la compuerta, pues todas las configuraciones de resalto, han sido realizadas y medidas para flujos parcialmente desarrollado (desplazamientos hasta de 56 cm).



**Figura 2.29. Distribución de velocidades para resaltos libres flujos desarrollados y no desarrollados**

En la figura 2.29 también se han representado las leyes propuestas por Ohtsu et al. (1990), los valores experimentales de Márquez (2006) para la compuerta, y los valores del azud tanto para flujo desarrollado como para el no desarrollado.

Se obtiene un buen ajuste teórico-experimental entre las leyes teóricas propuestas por Ohtsu et al. (1990) y los perfiles de velocidad medidos.

Por este motivo se propone una ley universal que mantiene la estructura de la ley propuesta por Ohtsu pero con unos valores distintos de  $k$  y  $n$  para obtener un mejor ajuste de la ley universal, a partir de nuestros resultados experimentales.

Los valores propuestos son  $k=0,397$  y  $n=9,6$ , muy similares a los propuestos por Márquez (2006) para las mismas configuraciones de resalto y con las mismas condiciones, son  $k=0,393$  y  $n=9,9$  y parecidos a los de Ohtsu para el Caso “a”, flujo parcialmente desarrollado donde  $k=0,333$  y  $n=12$ .

Nuestros ajustes se presentan en la figura 2.30, son datos que corresponden a un flujo no desarrollado, también la comparación de nuestra curva con la de Márquez (2006).

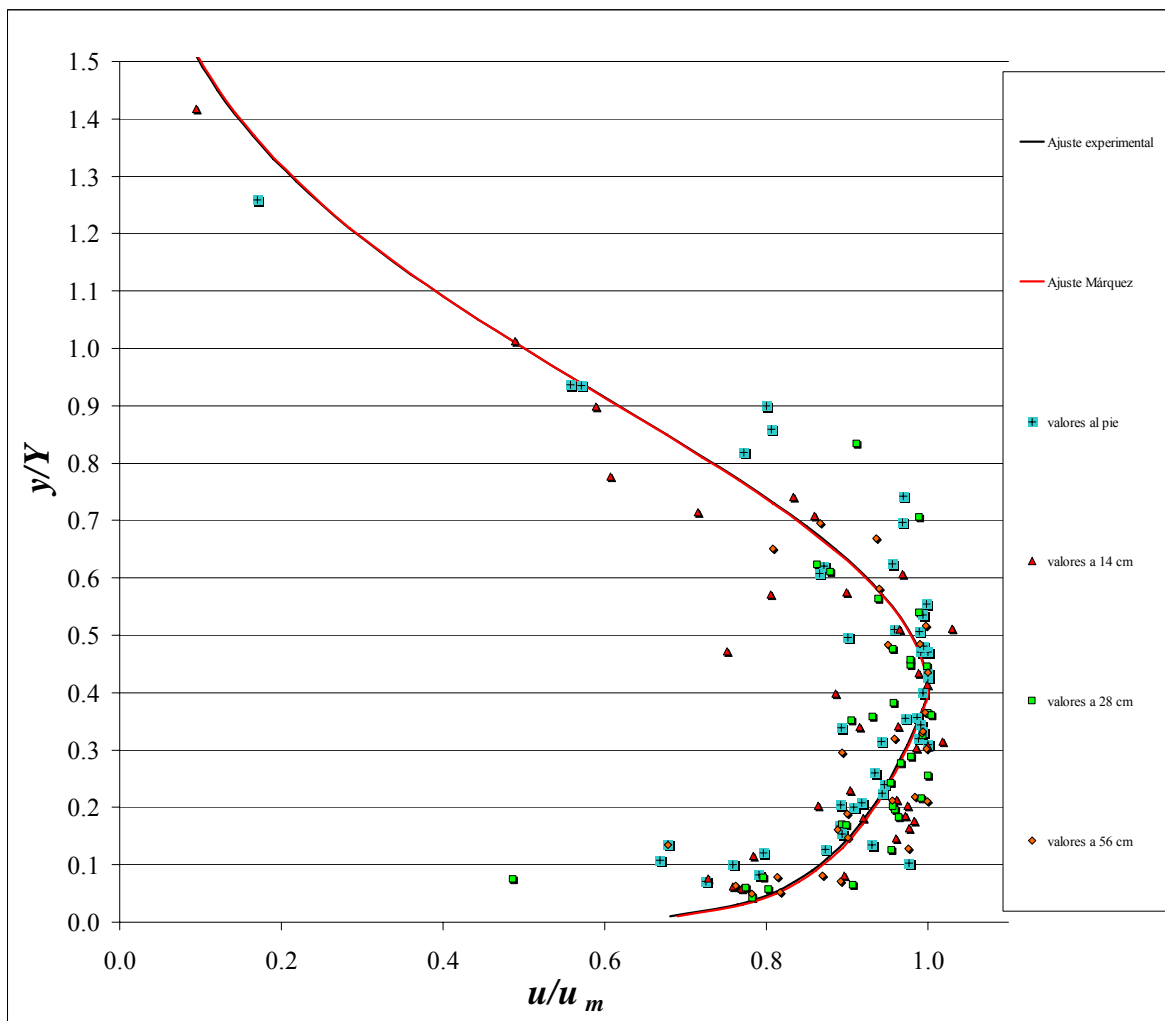
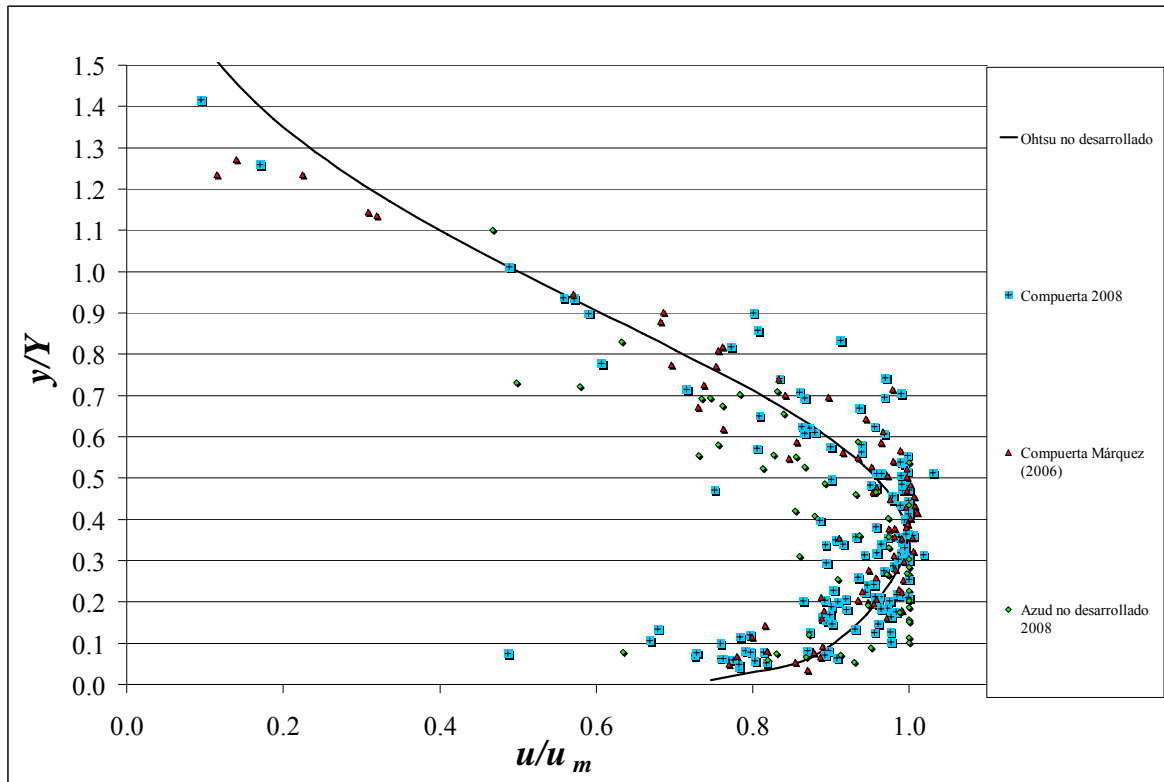


Figura 2.30. Distribución de velocidades para resaltos libres y ajuste experimental “Compuerta 2008”

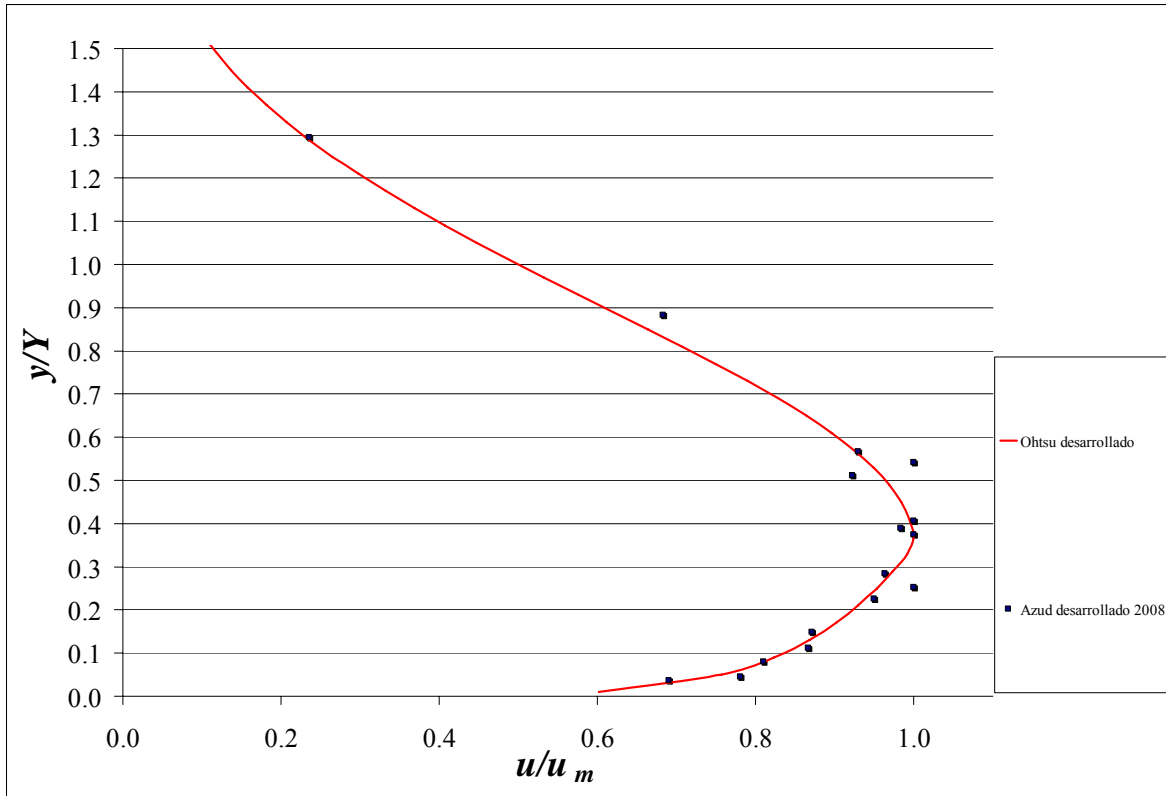
En la figura 2.31 se presentan los valores para flujo no desarrollado, es decir, los datos del estudio “Compuerta 2008”, los de Márquez (2006) y los de “Azud no desarrollado 2008”, junto con la ley de Ohtsu para flujo no desarrollado.



**Figura 2.31. Distribución de velocidades para resaltos libres y flujo no desarrollado**

En la figura 2.32 representamos los valores para flujo desarrollado, el único caso en el que se da esta situación es el “Azud desarrollado 2008”, pero para estas condiciones tenemos muy pocas mediciones, sus valores se ajustan bastante bien a los propuestos por Ohtsu et. al. (1990), por lo que no ha sido necesario realizar ningún ajuste.





**Figura 2.32. Distribución de velocidades para resaltos libres y flujo desarrollado**

En la siguiente tabla se recogen los coeficientes y exponentes correspondientes a las expresiones, ya comentadas anteriormente :

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left( \frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{1,177}{1-k} \left( \frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1,5$$

Distribución de Velocidad	<i>k</i>	<i>n</i>
<b>Resalto libre Compuerta 2008 (no desarrollado, compuerta)</b> $2,5 \leq F_1 \leq 5$ $0,25 \leq x/L_{jc} \leq 0,75$	0,397	9,6
<b>Resalto libre Márquez (2006) (no desarrollado, compuerta)</b> $2,5 \leq F_1 \leq 5$ $0,25 \leq x/L_{jc} \leq 0,75$	0,393	9,9
<b>Resalto libre Azud (no desarrollado, azud)</b> $2,5 \leq F_1 \leq 5$ $0,25 \leq x/L_{jc} \leq 0,75$	0.3	5
<b>Resalto libre (caso “a”) Ohsu et al.</b> $5 \leq F_1 \leq 7,3$ $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$	0,333	12
<b>Resalto libre (caso “b”) Ohsu et al.</b> $5,3 \leq F_1 \leq 7,3$ $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$	0,351	7

Tabla 2.3. Coeficientes correspondientes a los ajustes realizados en la distribución de velocidades

### 3. LABOR EXPERIMENTAL Y FILTRADO DE DATOS

#### 3.1. Trabajo de laboratorio

##### 3.1.1. Configuración de la sonda

El Velocímetro Acústico Doppler de SonTek/YSI (ADV) es un método de medición Doppler en 3D de un único punto, con alta resolución. Las técnicas usadas por el ADV para el proceso de Doppler proporcionan varias ventajas: exactitud, rapidez, medida de velocidad de 3D en un volumen de muestra distante; calibración de fábrica invariable, por lo que no se requiere ninguna calibración periódica; operación simple; cálculo directo de parámetros turbulentos tales como tensión de *Reynolds*; y rendimiento excelente en flujos lentos.

Los principales parámetros de calibración de la sonda ya establecidos en trabajos anteriores, como Márquez (2006), son los siguientes:

##### 1. Rango de velocidad:

Se establece con el objetivo de escoger el menor rango de velocidad posible y así obtener unos resultados de mejor calidad. El valor establecido para este parámetro es de 100 cm/seg.

##### 2. Frecuencia de muestreo:

Se establece con el fin de obtener unas series de velocidad más homogéneas y unos valores de correlación y de SNR mejores. El valor de frecuencia utilizado en la adquisición de datos es de 5 Hz.

##### 3. Salinidad:

Fundamental para el correcto funcionamiento de la sonda es la salinidad. En nuestro caso se dispone de agua potable en el canal, pero para llevar a cabo las mediciones de velocidad es necesario añadir un aditivo que proporciona el propio fabricante, con lo que se altera la salinidad del agua potable. El valor estimado fue de 2 ppt.

##### 4. Intensidad de señal:

La intensidad de señal, registrada para cada receptor de ADV, es una medida de la intensidad de la señal acústica reflejada. La función principal de los datos de intensidad de señal es verificar la existencia de partículas materiales suficientes en el agua. Si el agua está demasiado clara, la señal retornada puede no ser más fuerte que el nivel de ruido ambiente de la electrónica. Sin intensidad de señal suficiente, el ADV no puede realizar medidas de velocidad exactas. Cuando la SNR disminuye, el ruido en las medidas de velocidad de velocidad de ADV crece. Para medidas de alta resolución, se recomienda mantener el SNR al menos a 15 dB. Para medidas instantáneas medias (por ejemplo, muestreos a 0.5 Hz, o una vez cada 2 segundos), el ADV puede operar con seguridad con una SNR de hasta 5 dB.

En rojo aparecen los valores para el eje X, el eje que nos interesa pues es en el que estamos midiendo la velocidad del agua.

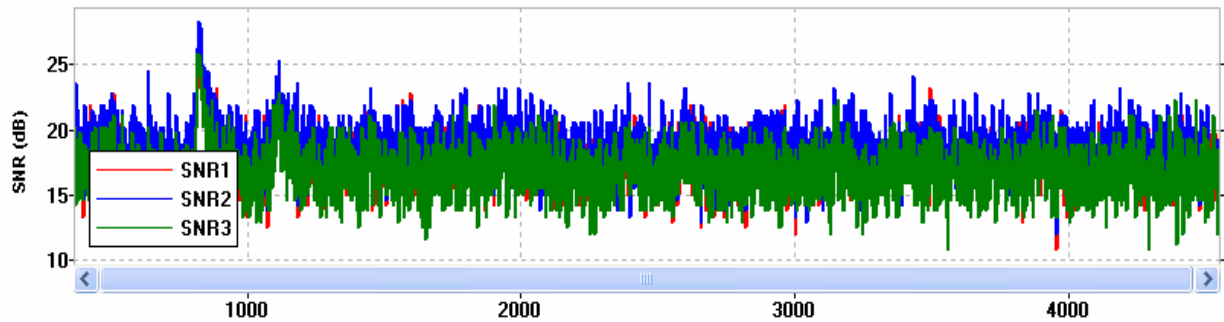


Figura 3.1. SNR (decibelios)

### 5. Coeficiente de Correlación:

El ADV calcula tres valores de correlación, un para cada recipiente acústico, con cada muestra de velocidad. La correlación es expresada como un porcentaje: la correlación perfecta indica una fiabilidad del 100%, en mediciones de velocidad con bajo ruido; la correlación 0% indica que el valor de velocidad de salida está dominado por el ruido (no hay señal coherente).

La correlación puede usarse para revisar la calidad de los datos durante la recopilación y para editar datos en postprocesado.

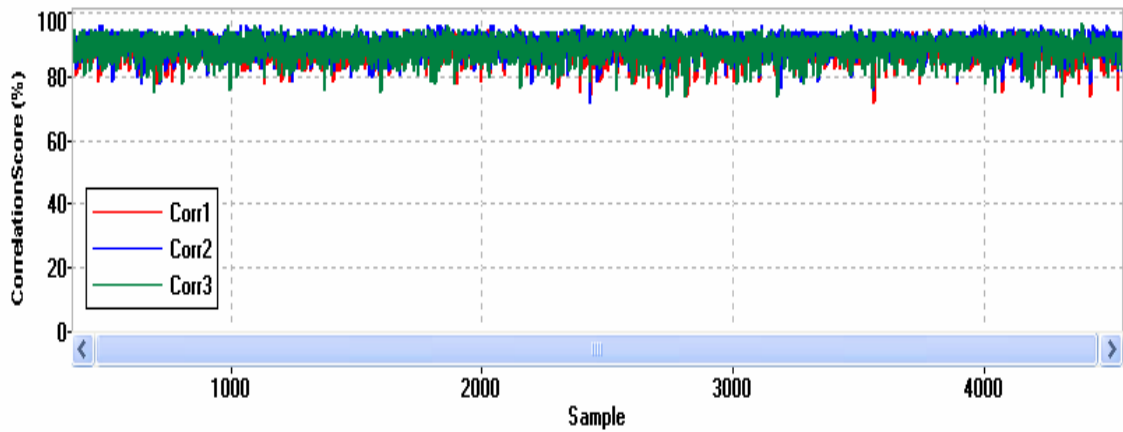
Por ejemplo, si el ADV está siendo usado en sondas donde periódicamente está fuera del agua, los valores de correlación pueden usarse para determinar que parte de los datos pueden ser usadas.

Idealmente, los valores de correlación deben estar entre 70 y 100%. Valores por debajo del 70% indican que el ADV esté operando en un régimen de medida difícil, la sonda está fuera del agua, el SNR es demasiado bajo, o que puede pasarle algo al ADV. En ciertos entornos (flujos altamente turbulentos), puede no ser posible lograr altos valores de correlación.

Los valores de correlación bajos afectarán la variabilidad a corto plazo en los datos de velocidad (por ejemplo, aumento del ruido), pero no predisponen las mediciones de velocidad media.

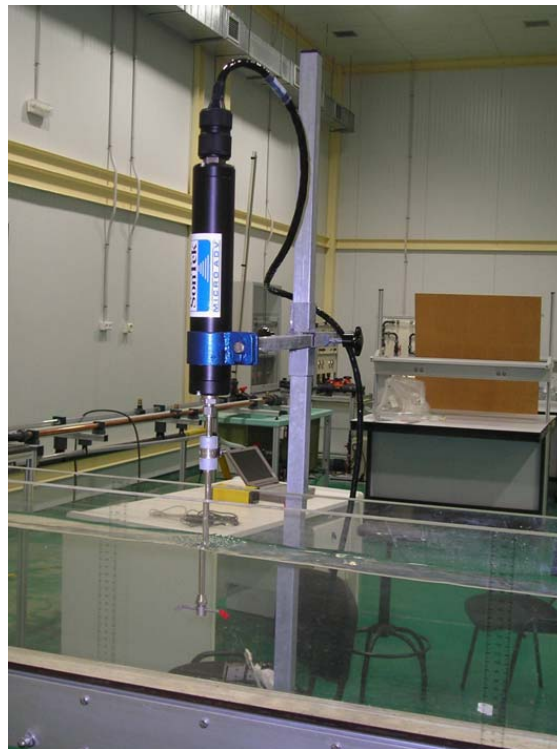
Para mediciones de velocidad media, valores de correlación más bajos de hasta 30 % pueden usarse.

En rojo aparecen los valores de correlación para el eje X, eje en el que estamos midiendo la velocidad del agua.



**Figura 3.2. Coeficiente de Correlación**

En la siguiente fotografía se muestra la situación de trabajo de la sonda en nuestro canal:



**Figura 3.3. Situación de la sonda, Márquez (2006)**

### **3.1.2. Rango de caudales de trabajo:**

A partir de proyectos previos realizados en el canal de estudio se conocía la existencia de un error en el muestreo del caudalímetro analógico del que dispone el canal.

Los caudales que marca el caudalímetro cuando ponemos en marcha la bomba, no son los correctos, tendremos que ajustarlos a los reales, para ello, marcaremos en el

caudalímetro los distintos caudales de trabajo, y aforaremos el caudal, para compararlos y poder establecer una relación para nuestros futuros trabajos.

Por este motivo, se realizó un aforo volumétrico a distintos caudales para obtener un gráfico  $Q_{real} - Q_{caudalímetro}$  que despejara todas las dudas respecto al caudal realmente tras el llenado de un recipiente de 22 litros, tomando el tiempo de la operación, para diversos caudales marcados con el caudalímetro.

De esta forma, se calculó, a partir del volumen de agua recogido en un determinado intervalo de tiempo, el caudal realmente trasegado en cada momento, con la ayuda de una probeta de 1000 mililitros, tal como se muestra en las fotografías, para cada uno de los caudales marcados por la bomba para nuestro proyecto, realizaremos tres mediciones, y trabajaremos con el valor promedio de esas tres mediciones.



**Figura 3.4. Barreño y Probeta**



**Figura 3.5. Probeta**

El caudal que descargaba el canal, no podía ser medido directamente, sino que con la ayuda de un recipiente (barreño), llenábamos un volumen en un tiempo conocido, y determinábamos ese volumen obtenido con la ayuda de la probeta de 1000 ml, obteniendo así unos datos muy precisos, aunque se haya podido cometer algún error accidental en la medida.

Una vez tenemos los caudales reales aforados y los que marca el caudalímetro, podemos conocer la relación que guardan mediante una recta de regresión.

Nos hemos basado en los datos obtenidos en el proyecto anterior, muy similares a los nuestros, pero además hemos añadido un caudal de 2,5 m<sup>3</sup>/h, para tener un punto más con el que graficar la recta.

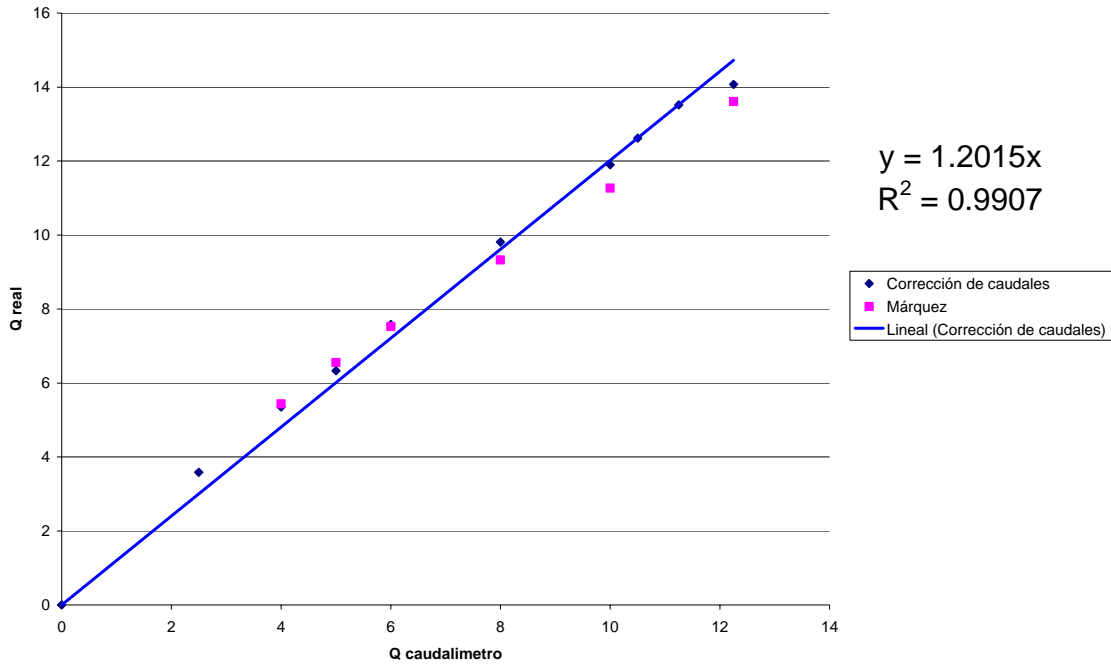


Figura 3.6. Corrección de caudales

(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /h)	
Q caudalímetro	Q real (media)	Q real (l/s)
0	0	0
2.5	3.584742785	0.99576188
4	5.351199689	1.48644436
5	6.329804104	1.75827892
6	7.581041352	2.10584482
8	9.810951255	2.72526424
10	11.89897239	3.30527011
10.5	12.61575	3.504375
11.25	13.516875	3.7546875
12.25	14.07276317	3.90910088

Tabla 3.1. Caudales

Obtenemos un ajuste por regresión lineal entre los valores:

$$Q_{real} = F_c * Q_{caudalímetro}$$

Siendo  $F_c$  el factor de corrección, igual a 1.2015.

Como podemos observar en la tabla, los caudales empleados fueron 2.5, 4, 6, 8, 10, 10.5, 11.25 y 12.25.

Los valores de proyectos anteriores (Márquez,2006) aparecen en el gráfico en color rosa, y nos aportan una comparativa, pero no han sido considerados a la hora de realizar el ajuste lineal.

### 3.1.3. Situación actual del canal:



Figura 3.7. Situación del canal, Márquez (2006)

Observamos que la primera mitad del canal situada en la parte izquierda de la fotografía está perfectamente nivelada y la pendiente del canal es nula en ese tramo.

Pero el canal debido a movimientos, había sido desnivelado, longitudinalmente y transversalmente, por lo que hemos tenido que ajustarlo con la ayuda de un nivel, se consigue ajustando el tornillo regulador de altura incorporado en el soporte del extremo izquierdo del canal hasta conseguir que el canal quede nivelado.

La otra mitad del canal situada en la parte derecha de la fotografía no está totalmente nivelada porque la estructura del canal no lo permite al no disponer en este extremo de un tornillo regulador de altura.

Dado el resultado de la nivelación del canal la parte útil considerada para nuestros ensayos es la primera mitad situada a la izquierda de la fotografía.





El medidor del nivel situado en la mitad del canal, donde se encuentran las juntas, a partir de aquí la pendiente empieza a crecer.

**Figura 3.8 Nivel en el canal**

Como podemos observar la burbuja se desplaza ligeramente hacia un lado, lo que nos indica que el canal tiene cierta pendiente, esto ocurre en el centro del canal donde la pendiente incrementa.



**Figura 3.9 Medidor de nivel**



El medidor del nivel al principio del canal, prácticamente no tiene pendiente, que es lo que buscábamos con nuestro ajuste, ya que en esta zona desarrollaremos todos nuestros cálculos.

**Figura 3.10 Nivel al principio del canal**



La imagen nos muestra la enorme inclinación que tiene la sección transversal del canal, la burbuja se encuentra muy desplazada hacia uno de los lados.

**Figura 3.11. Vista transversal del canal**

A continuación se muestran los elementos que actualmente quedan incorporados en nuestro canal [Márquez (2005), Márquez (2006)]:

1. Suplemento del depósito tranquilizador: la elevación de la altura del depósito tranquilizador permite que el agua no rebase la altura del mismo.



**Figura 3.12 Márquez (2006)**

2. Situación de la compuerta: esta colocación de la compuerta nos permite realizar mediciones aguas abajo de la compuerta e inmediatamente detrás de ella con el fin de caracterizar el comportamiento de los resaltos hidráulicos en ese punto.

La distancia desde el depósito tranquilizador de salida del agua hasta la compuerta es de 73 cm.



**Figura 3.13 Compuerta a 73 cm del depósito**

3. Tranquilizadores de flujo: aguas arriba de la compuerta y a la salida del depósito tranquilizador se encuentran los tranquilizadores de flujo cuyo objetivo es facilitar que el flujo llegue tranquilizado aguas arriba de la compuerta y evitar así las oscilaciones que se puedan producir en ese punto.

Al final del canal hay otro tranquilizador de flujo cuyo fin es que no se produzcan ondas de retorno que influyan a los resaltos.



**Figura 3.14. Tranquilizadores de flujo aguas arriba de la compuerta, Márquez (2006)**



**Figura 3.15(a). Tranquilizador de flujo aguas debajo de la compuerta**



**Figura 3.15.(b) Tranquilizador de flujo aguas debajo de la compuerta**

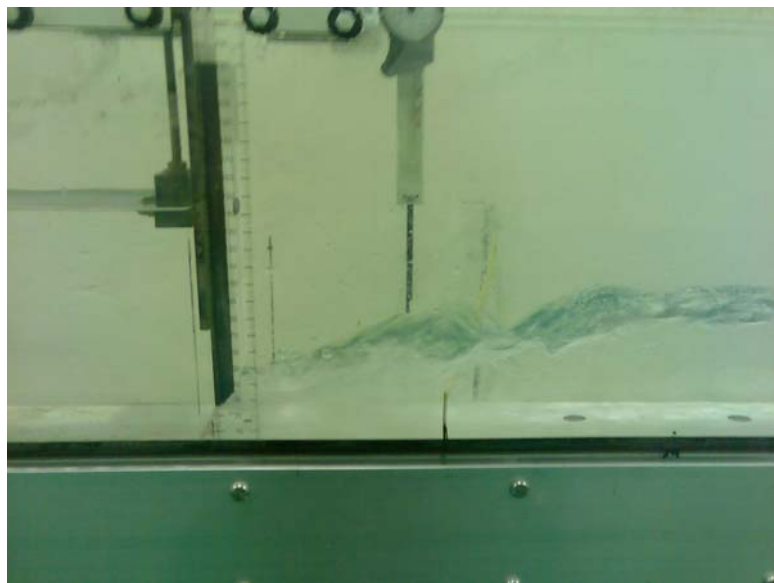
## 3.2. Ensayos de laboratorio

### 3.2.1 Configuración de los resaltos

El proceso de medición de velocidades para cada uno de los caudales (1; 1.49; 1.76; 2.1; 2.72; 3.31; 3.5; 3.75; 3.91 l/s), es el siguiente:

Hemos medido cuatro resaltos para cada uno de los caudales (excepto para uno de los caudales de 3.5 l/s) los cuales hemos establecido en función de la profundidad aguas arriba de la compuerta, siendo los siguientes:

1. Resalto hidráulico libre 0. Estabilizado a al pie de la compuerta. (RHL0).



**Figura 3.16. Resalto hidráulico estabilizado al pie de la compuerta**

2. Resalto hidráulico libre 14. Estabilizado a 14 cm de la compuerta (RHL 14.).



**Figura 3.17. Resalto hidráulico estabilizado a 14 cm de la compuerta**

3. Resalto hidráulico libre 28. Estabilizado a 28 cm de la compuerta (RHL 28.).



**Figura 3.18. Resalto hidráulico estabilizado a 28 cm de la compuerta**

#### 4. Resalto hidráulico libre 56. Estabilizado a 56 cm de la compuerta (RHL56.).



**Figura 3.19. Resalto hidráulico estabilizado a 56 cm de la compuerta**

Por lo tanto, obtenemos cuatro resaltos para cada caudal (excepto para el de 3.5 l/s donde por condiciones de flujo solo hemos sido capaces de medir el resalto al pie de la compuerta y a 14 cm de la compuerta), y tenemos ocho caudales en los que medimos esos cuatro resaltos, y un caudal donde medimos solo dos resaltos, en total tenemos 34 resaltos libres.

Debemos destacar que se midieron dos resaltos adicionales, a 70 cm y 90 cm de la compuerta, pero en ellos no se midieron velocidades, sólo las características principales.

#### **3.2.2. Secciones muestreadas:**

Han sido seis las secciones para cada resalto en las que hemos muestreado su perfil de velocidad, siempre que el calado de dicha sección fuese suficiente para poder hacerlo teniendo en cuenta las limitaciones de nuestra sonda.

La mayoría de las secciones se localizaron en el ámbito del resalto, considerando su longitud como la distancia entre el calado contraído y el punto aguas abajo en que se observó que el perfil del flujo no seguía subiendo considerando las siguientes secciones:

(a) Sección 0: localizada inmediatamente aguas abajo de la compuerta y situada a la distancia calculada, a partir del coeficiente de contracción, para el resalto al pie, para el resto de resaltos fue imposible cualquier medición en esta sección.

(b) Sección 1; localizada a  $1/4L_r$  (un cuarto de la longitud de resalto considerada).

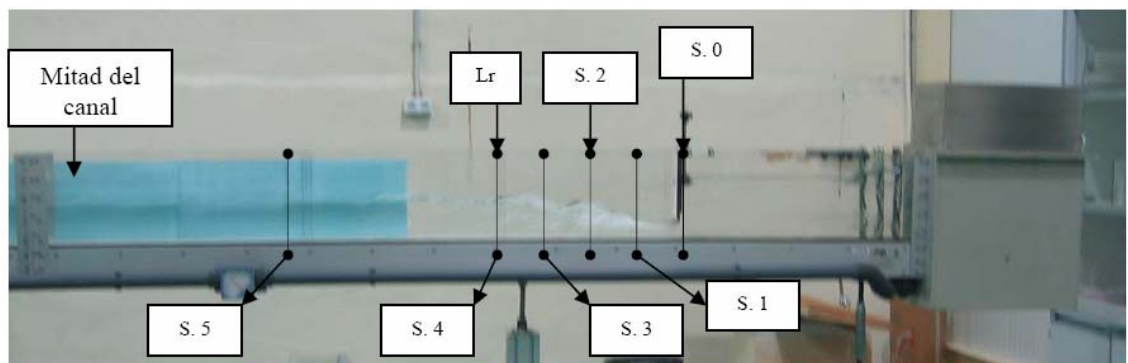
(c) Sección 2; localizada a  $1/2L_r$ .

(d) Sección 3; localizada a  $3/4L_r$ .

(e) Sección 4; localizada a una distancia igual a la longitud del resalto.

(f) Sección 5; localizada a una distancia intermedia entre el final de la longitud de resalto estimada y la mitad del canal (punto hasta el cuál el canal es completamente horizontal).

Para comprender mejor la localización de cada una de las secciones:



**Figura 3.20. Localización de las secciones, Márquez (2006)**



### 3.3. Sontek Horizon ADV. Principales especificaciones

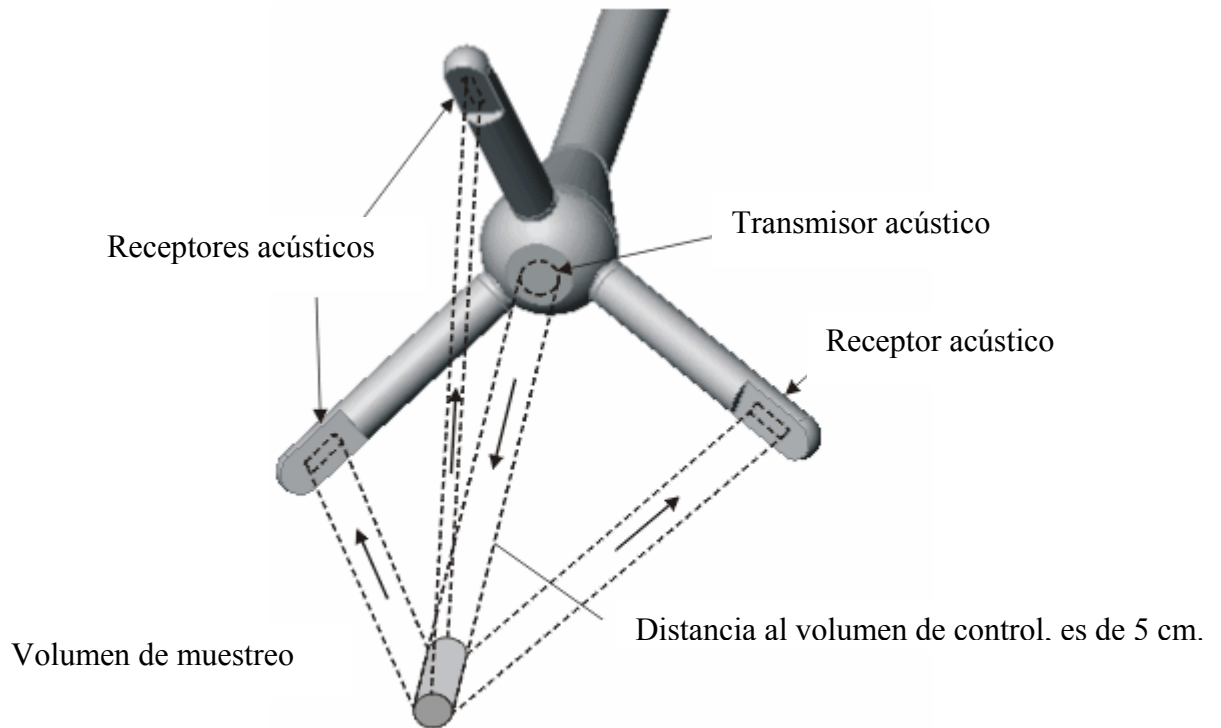


**Figura 3.21. Equipo de medida**

El equipo de medida de velocidades instantáneas ADV necesita estar sumergido, incluso el punto de muestreo, ya que el medio de transmisión fundamental del sonido en dicho equipo es el agua.

Para mantener la sonda estática dentro del flujo de agua, nos ayudamos de un brazo construido anteriormente para la realización de otros proyectos.

Las patillas de la sonda, deben encontrarse a más de 5 cm de la solera del canal, debido a los principios de funcionamiento del aparato, al emitir el sonido, se pueden producir reflexiones en la solera si está a menos de 5 cm, ya que interfiere el sonido reflejado con el emitido, y obtendremos medidas erróneas.



**Figura 3.22. Esquema sonda Adv Sontek 3D**



**Figura 3.23. Sonda Adv Sontek 3D**

Así, en condiciones de aireación, cuando una burbuja de aire de los remolinos del resalto, atraviesa la trayectoria de muestreo deja de medir obteniéndose un valor de velocidad que no es el real.

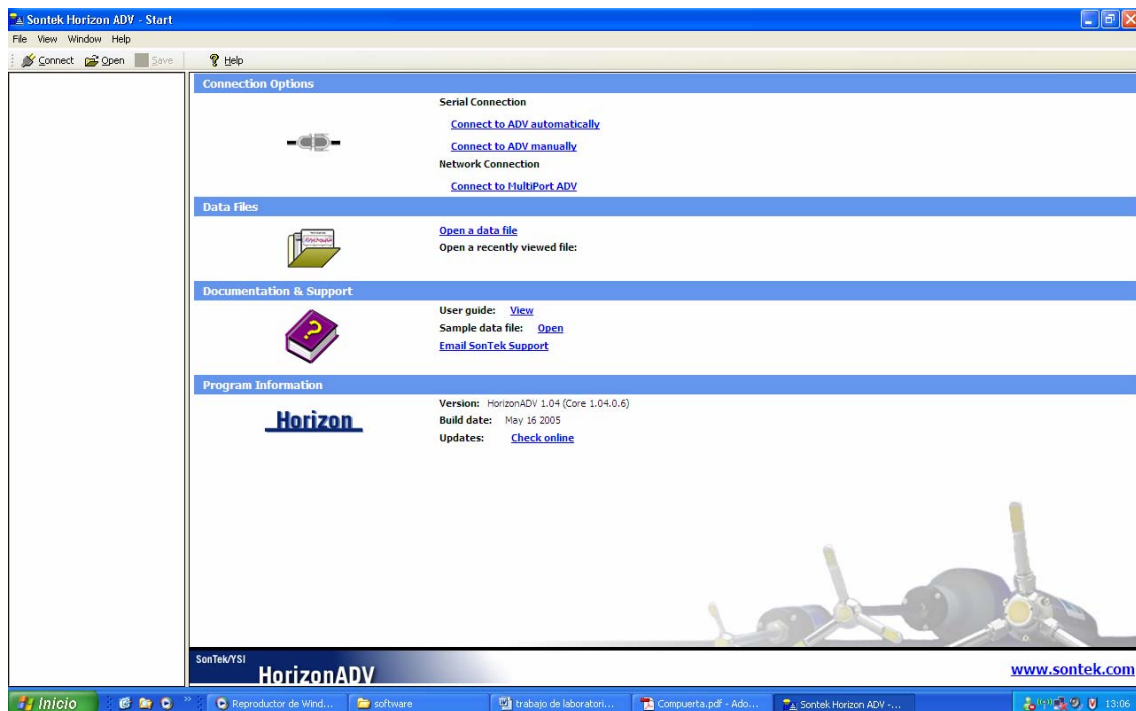
Por esta razón es necesario realizar un filtrado de los datos, con el fin de desechar o paliar las anomalías debidas a dicho fenómeno de aireación.

Cabe destacar también las importantes complicaciones y contratiempos que produjo la instalación del software de la sonda, y la dificultad de configurar acertadamente el equipo, ya que la conexión entre el ordenador y la sonda debía realizarse por medio de un cable adaptador, pues los ordenadores de nueva generación no disponen

de puertos COM, por tanto la ayuda de un cable adaptador de COM a USB era necesaria.

Tuvimos que utilizar el software que traía el cable adaptador de COM a USB, para poder utilizar los puertos USB con el programa Horizon Adv como si fueran puertos COM.

Una vez fueron solucionados los problemas de compatibilidad, iniciamos el programa Horizon Adv, pero con la configuración de la sonda “A819F”.



**Figura 3.24. Ventana Principal del programa Horizon Adv**

Las medidas de velocidad en los resaltos contaron de dos etapas:

1. Una primera etapa, de consolidación y contratación de datos, con otros obtenidos en proyectos anteriores, repitiendo las configuraciones de resalto con los mismos números de *Froude*, para los cuales tomamos 4200 mediciones en cada punto, con una duración estimado de 14 minutos por punto para realizar las 4200 mediciones.

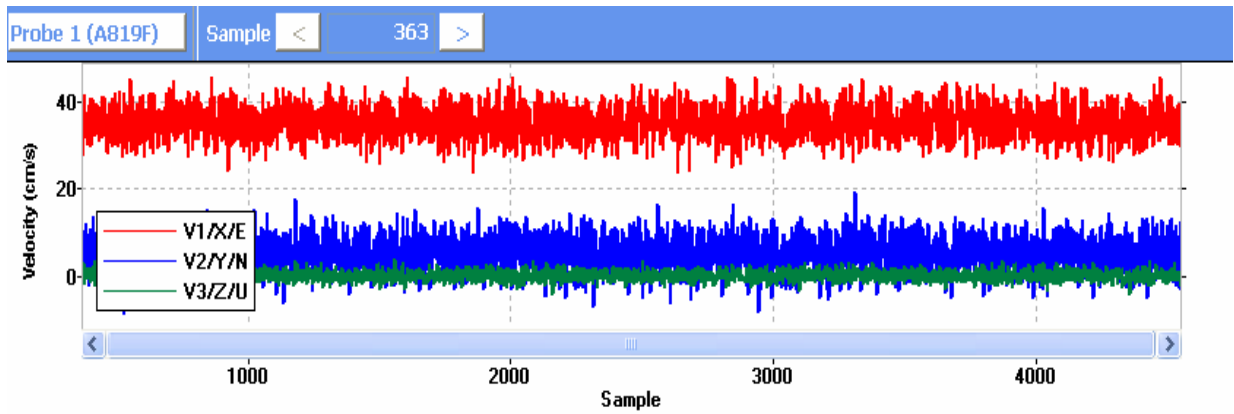


Figura 3.25. 4200 mediciones (en rojo el eje X)

2. Una segunda etapa, con la que tratábamos de ampliar los datos, consistía en completar con números de *Froude* que no hubieran sido medidos previamente, para lo cual se tomaron 2100 mediciones, con una duración estimada de 7 minutos por punto.

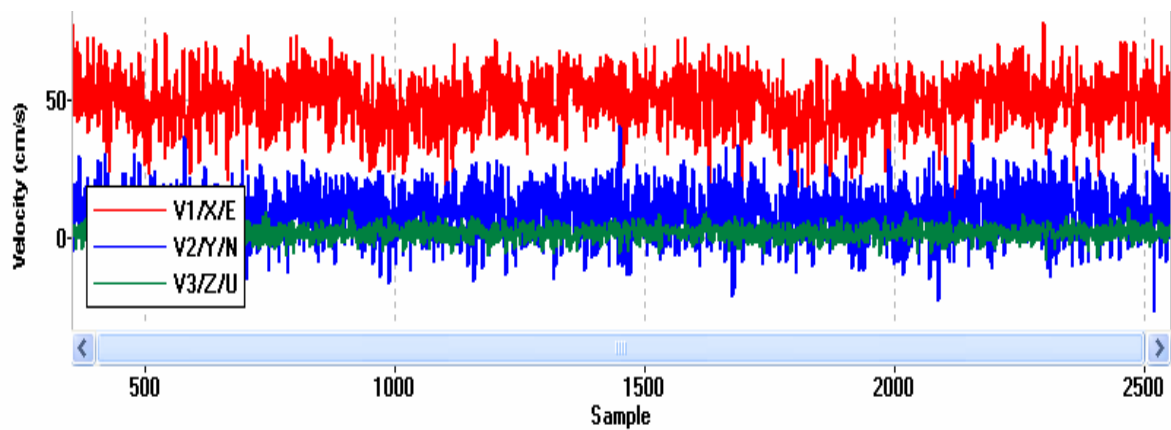


Figura 3.26. 2100 mediciones (en rojo el eje X)

### 3.4. Filtrado de datos

Para dar validez a los datos muestreados, se ha realizado un filtrado digital de datos, con el criterio de cortar los valores de los percentiles 5 y 95%, al igual que realizó Castillo (2008).

Para iniciar el filtrado se exporta la serie temporal desde el programa Sontek Horizon ADV y se obtiene la muestra en formato .dat.

Esto se consigue de la siguiente manera:

1. Abrimos un archivo ya existente. (“Open a data file”).

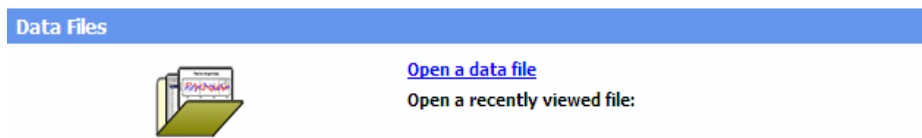


Figura 3.27

2. Seleccionamos el comando “Export”, marcada la opción “Tab delimited”.

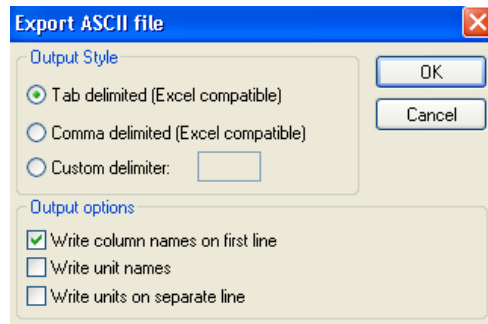


Figura 3.28

3. Hemos creado una tabla Excel con todas las mediciones.

Para poder tratar la muestra con Excel abrimos el archivo .dat con dicho programa, cortamos la serie obtenida hasta 2048 datos para los archivos de 2100 mediciones y 4096 datos para los archivos de 4200 mediciones, así se obtiene la serie requerida para realizar el filtrado.

Las fases fundamentales para el tratamiento de datos son las siguientes:

- Dada la serie inicial de 2048 o 4096 valores medidos de velocidad  $V_x$ , para cada uno de los puntos de muestreo considerados en los resaltos hidráulicos se obtiene el valor medio  $X_{media}$ .

- Se obtiene el valor máximo de la serie inicial, al que denominamos  $X_{\text{máx}}$ , y un valor  $A_1$  que se define como la diferencia entre el valor máximo  $X_{\text{máx}}$  y el valor medio  $X_{\text{media}}$  de la serie inicial, de modo que:

$$A_1 = X_{\text{máx}} - X_{\text{media}}$$

- Posteriormente se halla un valor  $X_{\text{mín}}$  obtenido de la diferencia entre la media de la serie inicial y el valor  $A_1$  hallado anteriormente,  $X_{\text{mín}} = X_{\text{media}} - A_1$ , para después obtener la amplitud  $A$ , de la diferencia entre los valores  $X_{\text{máx}}$  y  $X_{\text{mín}}$ , tal que:

$$A = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$$

- Por último se obtienen los valores de corte de la serie inicial que se hallan de la siguiente manera:

El valor de corte superior será un valor  $X_{\text{máx},c}$  que se define como el valor máximo de la serie inicial  $X_{\text{máx}}$  una vez reducido por el valor de amplitud  $A$  multiplicado por un factor de porcentaje considerado como 0,05 (percentil 95%):  
 $X_{\text{máx},c} = X_{\text{máx}} - (A * 0,05)$  .

Este valor de corte superior pone un límite a la serie inicial de modo que los valores obtenidos mayores a este valor de corte quedan reducidos al límite  $X_{\text{máx},c}$ . La serie inicial ha quedado así restringida a un límite superior menor que el valor  $X_{\text{máx}}$  inicial.

El valor de corte inferior  $X_{\text{mín},c}$  se obtiene a partir del valor  $X_{\text{mín}}$  mayorado por el valor de la amplitud  $A$  multiplicado por 0,05 (percentil 5%):  
 $X_{\text{mín},c} = X_{\text{mín}} + (A * 0,05)$  .

Igualmente este valor de corte inferior pone un límite a la serie inicial de modo que los valores menores a este valor de corte quedan reducidos al límite  $X_{\text{mín},c}$ .

La serie inicial queda así restringida a un límite inferior mayor que el valor  $X_{\text{mín}}$  inicial.

Esquema general:

- Si (valor medido  $V_x$ )  $> X_{\text{máx},c}$  → valor medido está fuera del límite superior → valor medido se sustituye por  $X_{\text{máx},c}$  en la serie.
- Si (valor medido  $V_x$ )  $< X_{\text{máx},c}$  → valor medido está dentro del límite superior → valor medido permanece en la serie.
- Si (valor medido  $V_x$ )  $< X_{\text{mín},c}$  → valor medido está fuera del límite inferior → valor medido se sustituye por  $X_{\text{mín},c}$  en la serie.
- Si (valor medido  $V_x$ )  $> X_{\text{mín},c}$  → valor medido está dentro del límite inferior → valor medido permanece en la serie.

Primero se obtiene una columna con la serie inicial transformada aplicándole únicamente el valor de corte superior y luego a esa serie ya restringida por el límite superior se le aplica la transformación debida al valor de corte inferior de modo que al final de este proceso denominado como PRIMER FILTRADO se obtiene una serie con un límite superior más bajo y un límite inferior más alto, con lo que el rango de la serie de datos ha disminuido y por tanto queda una serie más homogénea que la serie inicial.

De esta serie hallada tras el primer filtrado se obtienen de nuevo los valores de  $X_{media}$ ,  $X_{máx}$ ,  $A_1$ ,  $X_{mín}$  y  $A$  del mismo modo que antes, y nuevos valores de corte  $X_{máx,c}$  y  $X_{mín,c}$  que servirán para realizar un segundo filtrado a esta serie siguiendo los mismos pasos descritos anteriormente.

Se han llegado a realizar varios filtrados a una misma muestra dependiendo de los requerimientos de cada muestra, aunque algunas de las muestras solo han necesitado un filtrado para obtener una serie lo suficientemente homogénea.

Ninguna muestra se ha filtrado más de cuatro veces para no alterar la serie inicial y distorsionar excesivamente la señal.

A continuación, en la tabla 3.2 se indica un registro virgen (sin filtrar). En este caso solo se ha necesitado un filtrado (lo indica el dato en negrita) para eliminar los valores negativos y para homogeneizar la muestra.

			1° Filtrado		2° Filtrado		3° Filtrado		4° Filtrado
Sample	V1/X/E	L sup.	L inf.	L sup.	L inf.	L sup.	L inf.	L sup.	L inf.
1	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79	35.79
2	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84	22.84
3	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82	18.82
4094	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69	31.69
4095	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01	27.01
4096	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17	27.17
Xmedia =	30.03		<b>30.03</b>		30.04		30.06		30.08
Xmax= =	57.64		54.88		52.39		50.16		48.15
A1= =	27.61		24.84		22.35		20.10		18.07
Xmin= =	2.41		5.19		7.69		9.96		12.01
A= =	55.23		49.69		44.70		40.20		36.13
A*0,05 =	2.76		2.48		2.23		2.01		1.81
Xmax c= =	54.88		52.39		50.16		48.15		46.34
Xmin c= =	5.17		7.68		9.93		11.97		13.82

**Tabla 3.2. Modelo de tratamiento de datos**

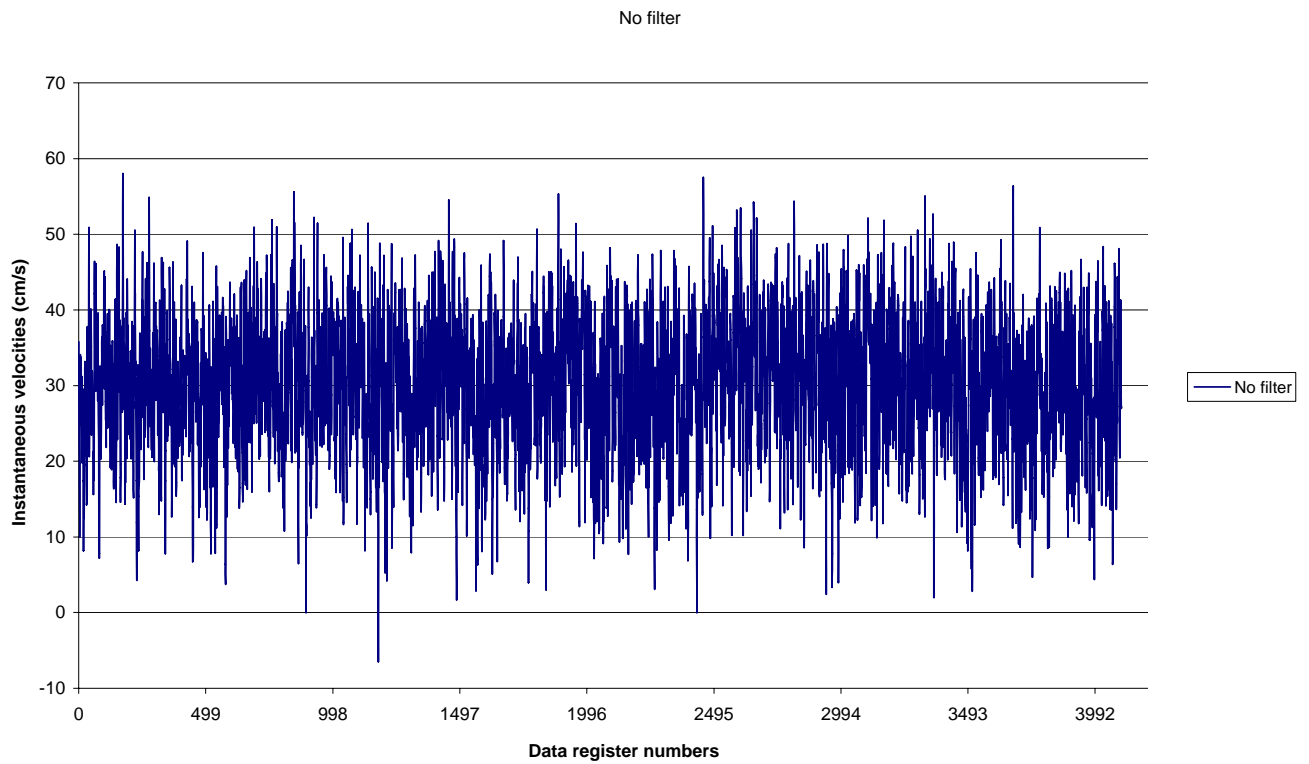
El registro sin filtrar se muestra en la figura 3.29 y a continuación se representa la muestra después de un primer filtrado en el figura 3.30.

Posteriormente se representan un segundo, tercer y cuarto filtrado (Figuras 3.31, 3.32 y 3.33 respectivamente) y se puede observar que los datos anómalos de esta muestra se eliminan únicamente con un primer filtrado, con lo que los filtrados posteriores podrían ser excesivos y alterar la serie inicial.

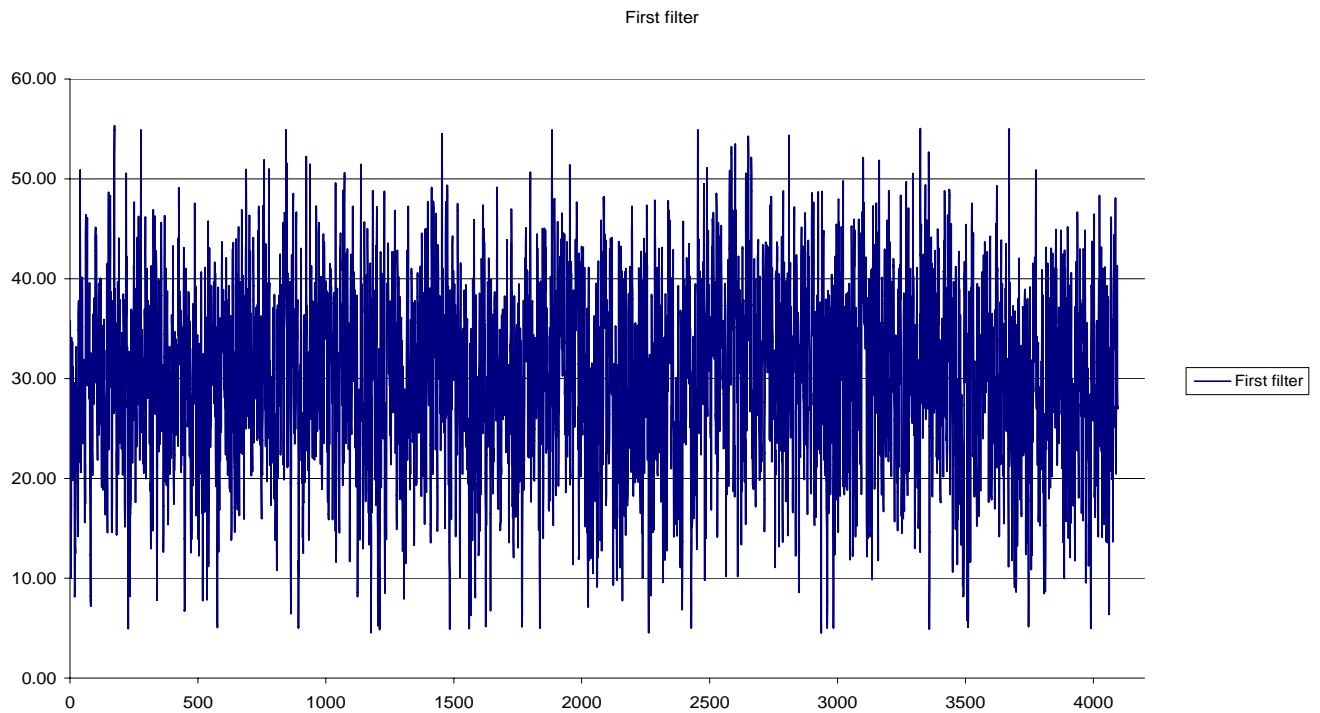
Por esta razón la serie definitiva que utilizaremos será la que se obtiene tras un primer filtrado.



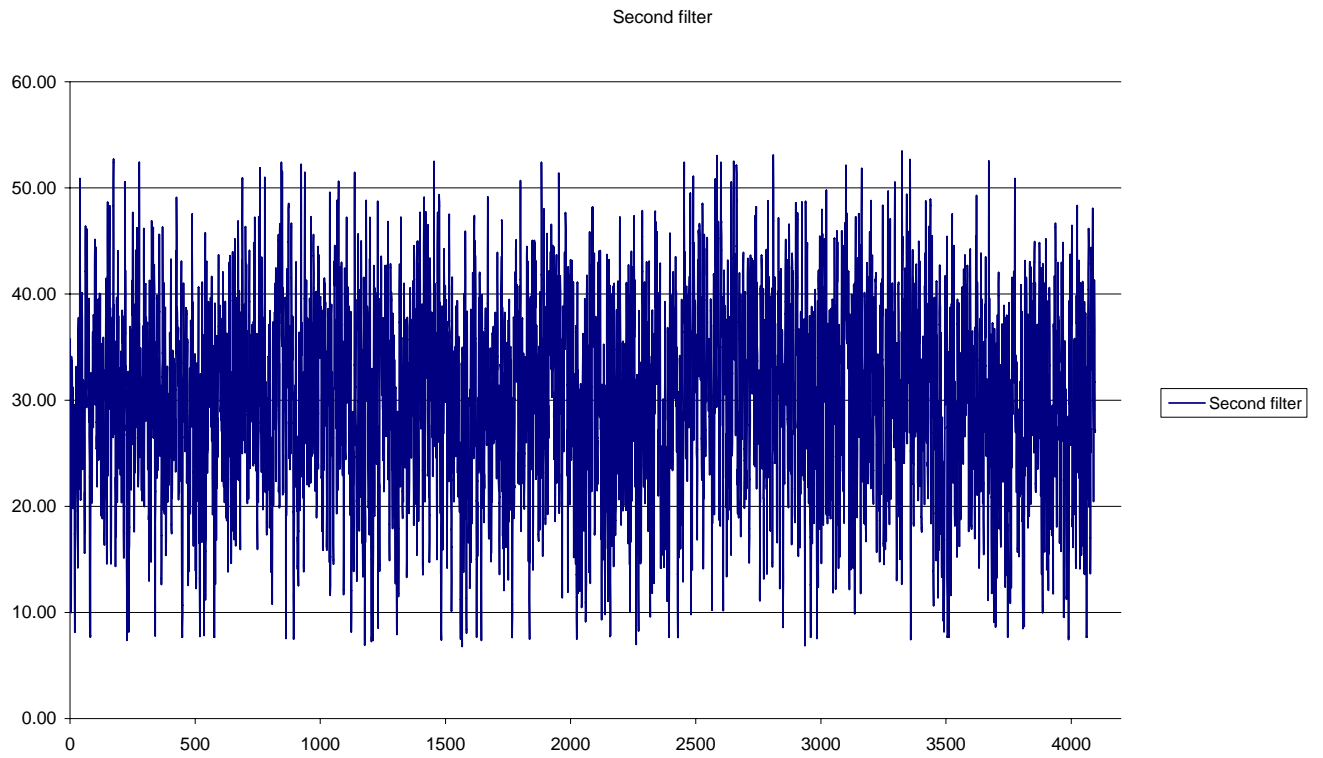
Los valores negativos que aparecen en la serie inicial son eliminados en el primer filtrado.



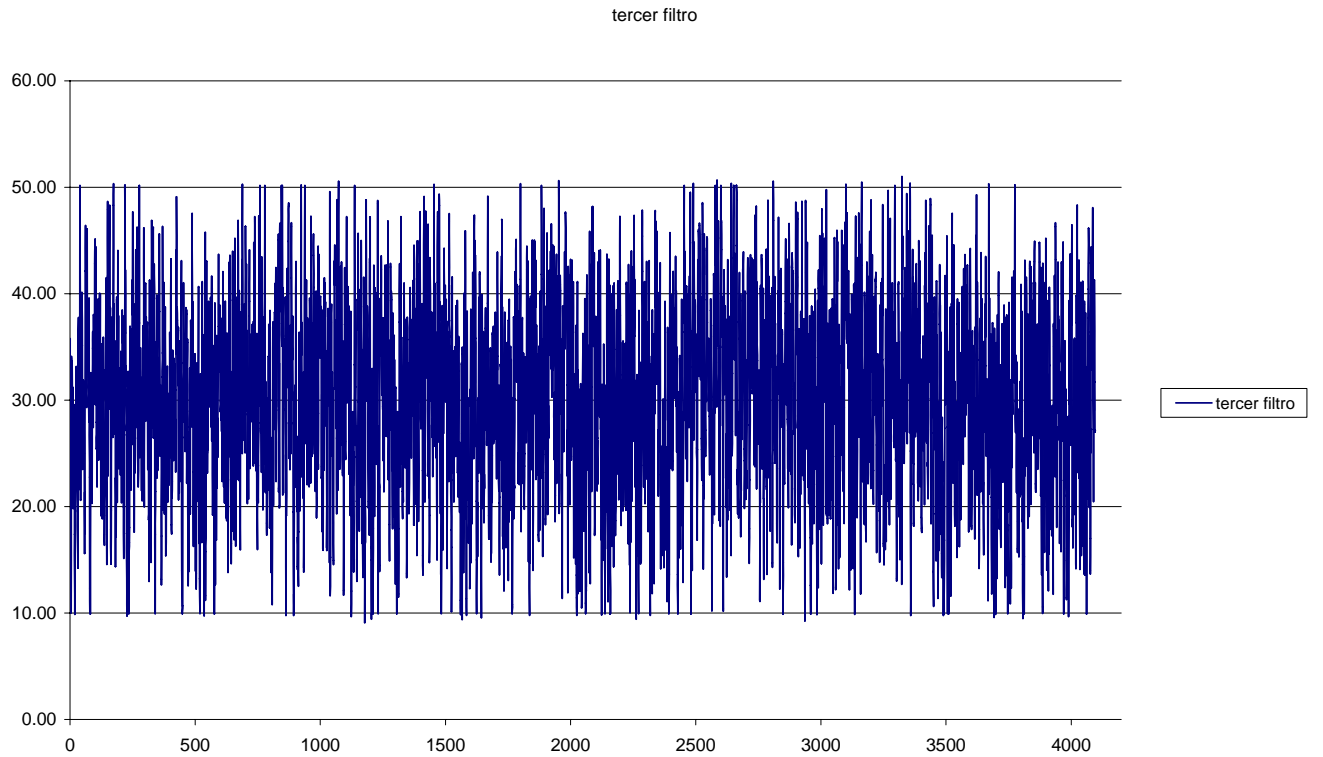
**Figura 3.29. Datos sin filtrar**



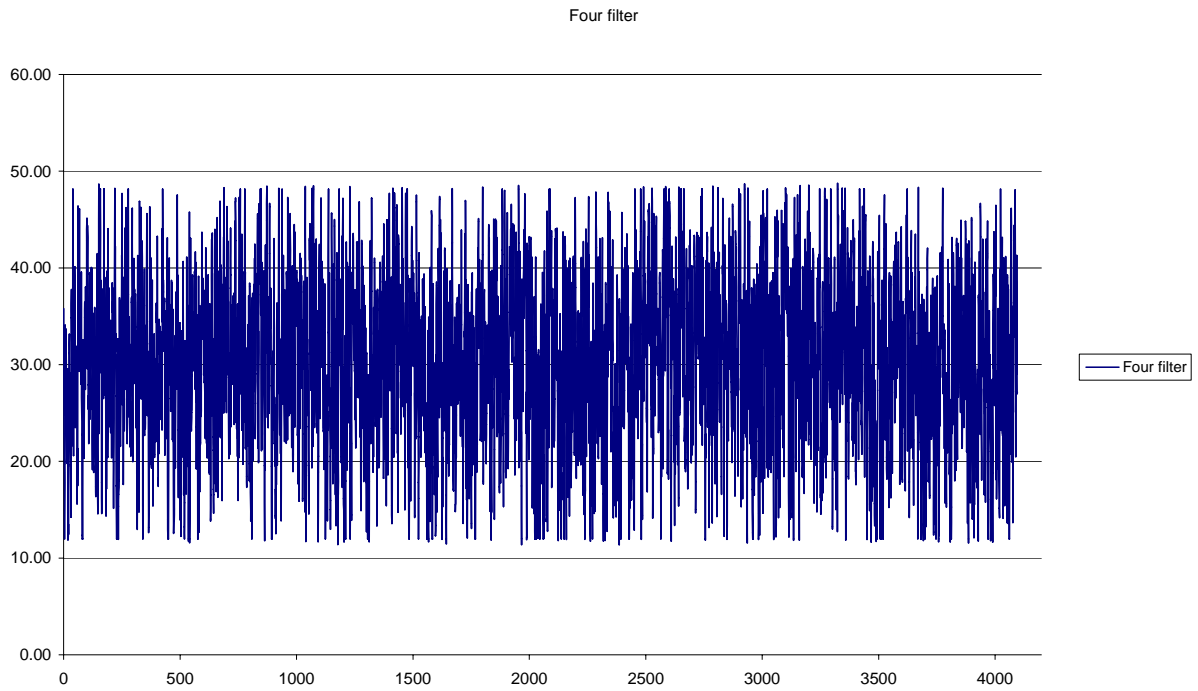
**Figura 3.30. Después del primer filtrado**



**Figura 3.31. Datos después del 2° filtrado**



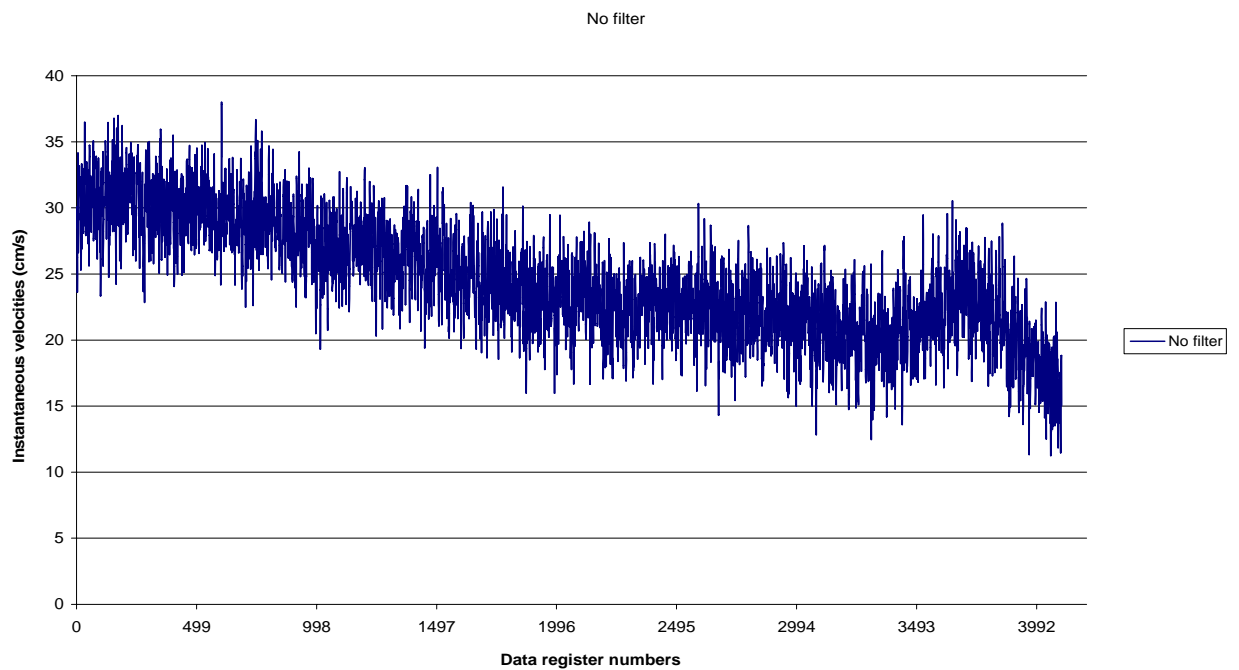
**Figura 3.32. Datos después del 3° filtrado**



**Figura 3.33. Datos después del 4º filtrado**

Cabe destacar que durante las mediciones, si se ha producido algún error o anomalía, aunque filtremos, la serie no será válida, pues no ha sido bien medida, hay alteraciones en la serie.

Estas mediciones deberán ser repetidas.



**Figura 3.34. Serie no válida**

Una vez hemos filtrado las mediciones, y hemos obtenido las velocidades medias, el siguiente paso será obtener la distancia desde el volumen de control hasta la solera del canal, la cual hemos anotado a mano en nuestras mediciones, y nos sirve para contrastarla, pues deberemos buscarla dentro del archivo.

Para ello abriremos el programa WinADV32.

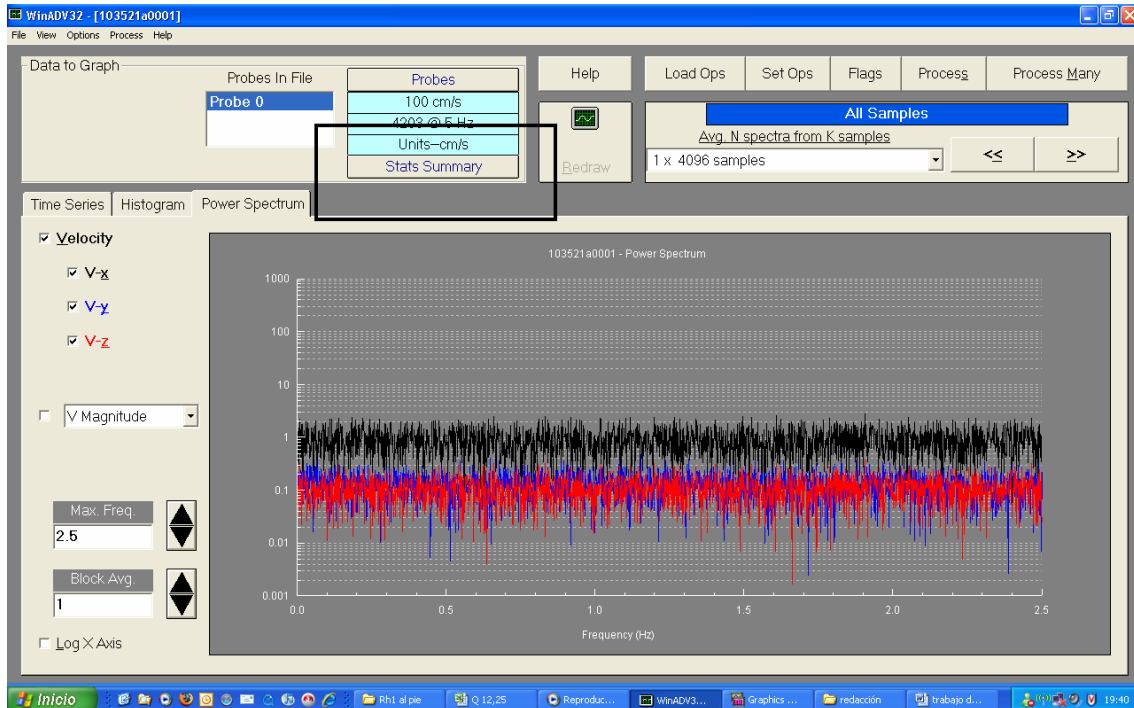


Figura 3.35. Ventana principal del programa WinADV32

### WinADV. Programa de conversión de datos ADV.

Este programa de post-procesamiento de datos fue diseñado por Tonito Wahl del U.S. Bureau of Reclamation. WinADV proporciona un entorno integrado para ver, repasar, y procesar los datos reunidos usando un ADV. Además, sirve para ver de forma gráfica serie-tiempo, los histogramas o Transformada rápida de Fourier (FFTs) de los datos de velocidad registrados.

Existen tres vistas primarias de los datos de ADV: serie cronológica, histograma, y espectro de potencia. Cada gráfica aparece por separado en pantalla principal del WinADV.

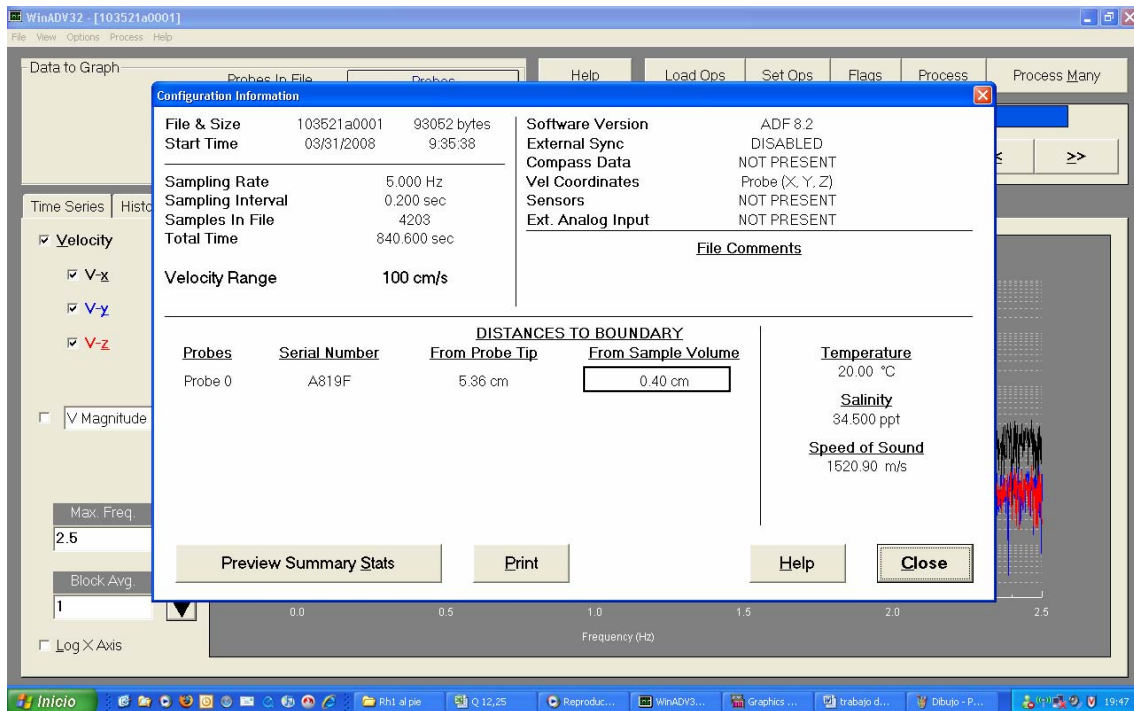
La gráfica de serie cronológica puede mostrar las componentes y magnitudes de velocidad, amplitud de la señal, relación de la señal de ruido, y resultado de la correlación.

Además, las marcas introducidas dentro del archivo para identificar puntos de interés anotados durante la recopilación de datos pueden verse en la gráfica usada para mostrar la serie cronológica de SNR y COR.

El usuario puede optar por visualizar los valores medios o mínimos de los parámetros de SNR y COR, desde valores múltiples registrados dentro del archivo ADV (uno para cada receptor acústico).

Pincharemos en el comando “File” y “Open new ADV file”.

Posteriormente en la parte superior del programa, una vez hallamos cargado el archivo que queremos tratar, pinchamos en la opción “Stats Summary” la cuál nos proporciona un informe completo del punto al que está referido ese archivo.



**Figura 3.36. Información de la configuración de la sonda**

El apartado “From Sample Volume” nos indica la distancia desde el punto del agua en el que hemos medido la velocidad hasta la solera del canal.

Una vez hemos obtenido todos estos datos de cada punto, velocidad, parámetros de turbulencia, distancia al punto de control... y con las medidas de los calados, estamos en disposición de realizar nuestras gráficas de velocidad.

### 3.5. Esquema de trabajo

Se presentan en la siguiente tabla 3.3, los principales valores de los resaltos en los que hemos medido velocidades, se incluye el caudal marcado por el caudalímetro, la apertura de compuerta para cada caudal, que determinará el nº de *Froude* y el tipo de flujo, el calado contraído, el calado conjugado calculado mediante la ecuación de Belanguer, la velocidad teórica en la sección 1, el número de *Froude* y el de *Reynolds*.

Características asociadas a cada caudal de trabajo						
Q Caudalímetro	Apertura	$y_0$ calado contraído	$y_2$ calado conjugado Bélanguer	$V_1$ teorica	Froude	Reynolds
m <sup>3</sup> /h	a (cm)	cm		m/s		
4	1.71	1.05	8.10	1.747	5.44	14616
5	2.2	1.43	8.22	1.518	4.05	16090
6	2.4	1.54	9.49	1.688	4.34	18892
8	3.1	2.01	10.76	1.674	3.76	22553
10	3.5	2.24	12.36	1.822	3.88	26352
10.5	4.6	2.93	11.50	1.477	2.75	25178
10.5	5.6	4.00	9.96	1.082	1.72	21831
11.25	4	2.62	12.99	1.769	3.48	28230
12.25	4.5	3.00	12.67	1.609	2.96	27807

Tabla 3.3. Características principales de los resaltos

También hemos incluido en las siguientes tablas, las principales características medidas para cada resalto:

- En la 1ª columna el caudal que marca el caudalímetro, no es el caudal real.
- En la 2ª, el caudal real obtenido a partir del factor de corrección calculado.
- En la 3ª, la velocidad teórica del agua al pie del resalto.
- En la 4ª, la velocidad teórica del agua al final del resalto.
- En la 5ª, el número de *Froude* correspondiente al pie del resalto.
- En la 6ª, el calado  $y_1$  al principio del resalto.
- En la 7ª, el calado  $y_2$  al final del resalto.
- En la 8ª, la carga de agua,  $H$ , aguas arriba de la compuerta.
- En la 9ª, la longitud del resalto  $L_j$ .
- En la 10ª, el  $Re$  correspondiente, los datos más importantes son los que tengan un  $Re > 25.000$ .

Clasificamos las tablas según la distancia del inicio del resalto a la compuerta, por tanto obtenemos cuatro tablas para los cuatro resaltos en los que hemos medido las velocidades, y dos tablas más que recogen los resaltos a 70 y 90 cm, resaltos en los que no hemos medido velocidades, sólo características principales.

Por este motivo, en los resaltos a 70 y 90 cm, sólo hemos medido los caudales más grandes, los que mayor  $Re$  poseen, pues para pequeños caudales, las fuerzas viscosas son muy importantes y alteran las medidas.

<b>Resaltos al pie</b>									
<b>Caudalímetro</b>	<b>Real</b>	<b><math>V_1</math></b>	<b><math>V_2</math></b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>Y_1</math></b>	<b><math>Y_2</math></b>	<b><math>H_{total}</math></b>	<b><math>L_j</math></b>	<b>Reynolds</b>
<b><math>m^3/h</math></b>	<b><math>m^3/s</math></b>	<b>m/s</b>	<b>m/s</b>		<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	
4	0.00148644	1.75	0.26	5.45	1.05	7.06	19.4	39	14617
5	0.00175828	1.52	0.32	4.05	1.43	6.82	13.49	37	16091
6	0.00210585	1.69	0.33	4.34	1.54	7.9	15.8	42.5	18892
8	0.00272526	1.67	0.37	3.77	2.01	9.06	16.7	48	22553
10	0.00330527	1.82	0.39	3.89	2.24	10.48	19.6	58	26353
10.5	0.00350438	1.48	0.47	2.75	2.93	9.13	14.2	46	25178
10.5	0.00350438	1.08	0.55	1.73	4	7.83	10.81	36	21832
11.25	0.00375469	1.77	0.43	3.49	2.62	10.84	19.2	62	28231
12.25	0.0039091	1.61	0.44	2.97	3	10.94	19.1	57.5	27807

Tabla 3.4. Características principales para los resaltos al pie de la compuerta

<b>Resaltos a 14 cm</b>									
<b>Caudalímetro</b>	<b>Real</b>	<b><math>V_1</math></b>	<b><math>V_2</math></b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>Y_1</math></b>	<b><math>Y_2</math></b>	<b><math>H_{total}</math></b>	<b><math>L_j</math></b>	<b>Reynolds</b>
<b><math>m^3/h</math></b>	<b><math>m^3/s</math></b>	<b>m/s</b>	<b>m/s</b>		<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	
4	0.00148644	1.52	0.27	4.40	1.21	6.78	17.1	35.3	14172
5	0.00175828	1.38	0.32	3.52	1.57	6.73	12.49	33.5	15690
6	0.00210585	1.49	0.34	3.62	1.74	7.68	15.3	37.5	18240
8	0.00272526	1.63	0.38	3.61	2.07	8.84	15.6	43.5	22332
10	0.00330527	1.67	0.39	3.40	2.45	10.45	19.8	55	25501
10.5	0.00350438	1.49	0.48	2.78	2.91	9.01	13.5	40	25251
10.5	0.00350438	1.18	0.57	1.96	3.68	7.56	10.37	28	22735
11.25	0.00375469	1.78	0.44	3.51	2.61	10.62	18.8	60	28273
12.25	0.0039091	1.66	0.45	3.10	2.91	10.82	18	54	28167

Tabla 3.5. Características principales para los resaltos a 14 cm de la compuerta

<b>Resaltos a 28 cm</b>									
<b>Caudalímetro</b>	<b>Real</b>	<b><math>V_1</math></b>	<b><math>V_2</math></b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>Y_1</math></b>	<b><math>Y_2</math></b>	<b><math>H_{total}</math></b>	<b><math>L_j</math></b>	<b>Reynolds</b>
<b><math>m^3/h</math></b>	<b><math>m^3/s</math></b>	<b>m/s</b>	<b>m/s</b>		<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	
4	0.0014864	1.56	0.28	4.57	1.18	6.56	16.70	31.10	14253
5	0.0017583	1.43	0.32	3.70	1.52	6.72	13.24	33.00	15831
6	0.0021058	1.56	0.34	3.85	1.67	7.60	15.60	35.50	18463
8	0.0027253	1.60	0.38	3.53	2.10	8.76	16.00	39.00	22223
10	0.0033053	1.69	0.40	3.46	2.42	10.32	19.30	50.00	25620
10.5	0.0035044	1.45	0.48	2.69	2.98	8.99	13.70	35.00	24999
11.25	0.0037547	1.73	0.43	3.37	2.68	10.66	18.80	53.00	27979
12.25	0.0039091	1.61	0.44	2.98	2.99	10.85	17.50	53.00	27847

Tabla 3.6. Características principales para los resaltos a 28 cm de la compuerta

Resaltos a 56 cm									
<i>Caudalímetro</i>	<i>Real</i>	$V_1$	$V_2$	$F_1$	$Y_1$	$Y_2$	$H_{total}$	$L_j$	<i>Reynolds</i>
$m^3/h$	$m^3/s$	$m/s$	$m/s$		$cm$	$cm$	$cm$	$cm$	
4	0.0014864	1.31	0.30	3.54	1.40	6.21	16.90	26.30	13678
5	0.0017583	1.25	0.33	3.02	1.74	6.60	12.69	28.50	15229
6	0.0021058	1.41	0.35	3.30	1.85	7.43	15.10	34.50	17900
8	0.0027253	1.45	0.39	3.04	2.32	8.61	15.70	36.00	21456
10	0.0033053	1.61	0.40	3.22	2.54	10.20	19.20	39.00	25153
10.5	0.0035044	1.37	0.49	2.47	3.15	8.76	13.24	30.00	24409
11.25	0.0037547	1.62	0.44	3.06	2.86	10.46	18.70	50.00	27250
12.25	0.0039091	1.48	0.46	2.63	3.25	10.60	17.80	44.00	26855

Tabla 3.7. Características principales para los resaltos a 56 cm de la compuerta

Resalto a 70 cm									
<i>Caudalímetro</i>	<i>Real</i>	$V_1$	$V_2$	$F_1$	$Y_1$	$Y_2$	$H_{total}$	$L_j$	<i>Reynolds</i>
$m^3/h$	$m^3/s$	$m/s$	$m/s$		$cm$	$cm$	$cm$	$cm$	
8	0.0027253	1.50	0.40	3.18	2.25	8.40	16.00	34.00	21694
10	0.0033053	1.57	0.41	3.11	2.60	9.95	19.10	36.00	24926
11.25	0.0037547	1.57	0.45	2.92	2.95	10.28	18.90	34.00	26900
12.25	0.0039091	1.46	0.48	2.56	3.31	10.06	17.50	30.00	26636

Tabla 3.8. Características principales para los resaltos a 70 cm de la compuerta

Resalto a 90 cm									
<i>Caudalímetro</i>	<i>Real</i>	$V_1$	$V_2$	$F_1$	$Y_1$	$Y_2$	$H_{total}$	$L_j$	<i>Reynolds</i>
$m^3/h$	$m^3/s$	$m/s$	$m/s$		$cm$	$cm$	$cm$	$cm$	
8	0.0027253	1.40	0.41	2.89	2.40	8.17	16.10	29.00	21189
10	0.0033053	1.55	0.42	3.05	2.63	9.73	19.20	34.00	24814
11.25	0.0037547	1.57	0.46	2.91	2.96	10.09	19.00	29.00	26861
12.25	0.0039091	1.42	0.49	2.47	3.39	9.95	17.50	28.00	26350

Tabla 3.9. Características principales para los resaltos a 90 cm de la compuerta

Debemos recordad, que para el caudal de 10.5 y apertura de compuerta de 5.6 cm, obtuvimos un *Froude* tan bajo, que el resalto era muy inestable, y al introducir el equipo de medida en el flujo, las condiciones variaban totalmente, por lo que a 28 y 56 cm se hizo imposible medir.



## **4. FUNDAMENTOS Y ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL**

### **4.1. Introducción**

El resalto hidráulico es un fenómeno bien conocido como método útil para disipar el exceso de energía de flujos de alta velocidad.

Los saltos hidráulicos ocurren cuando hay un conflicto entre los controles que se encuentran aguas arriba y aguas abajo, los cuales influyen en la misma extensión del canal.

Por ejemplo, si el control de aguas arriba causa un flujo supercrítico cuando el control aguas abajo dicta un flujo subcrítico, entonces hay un conflicto que puede resolverse únicamente si existe algún medio por el cual el flujo pase de un régimen a otro.

La evidencia experimental sugiere que el cambio del flujo de un régimen supercrítico a uno subcrítico puede ocurrir muy abruptamente mediante un fenómeno conocido como salto hidráulico.

El salto hidráulico puede tener lugar ya sea, sobre la superficie libre de un flujo homogéneo o en una interfase de densidad de un flujo estratificado.

Este proyecto corresponde a una continuación del ya iniciado por Márquez, 2006, en el cuál se realizaron estudios de resaltos sumergidos y libres.

Los resaltos hidráulicos pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de canal en los que ocurren, como resaltos hidráulicos en canales rectangulares y no rectangulares, resaltos hidráulicos en canales horizontales e inclinados y resaltos hidráulicos forzados.

Los resaltos hidráulicos pueden ser clasificados también dependiendo del desplazamiento del inicio del resalto, así podremos obtener flujos desarrollados y no desarrollados.

En este proyecto se presenta un estudio sistemático de las formas más fundamentales de resaltos hidráulicos libres en canales rectangulares, variando el desplazamiento a la estructura de control, en este caso una compuerta plana, aunque también se ha realizado un proyecto conjunto basado en el estudio del resalto hidráulico libre tras un azud, así se procederá finalmente a la comparación de los valores de ambas estructuras.

Se aclaran las propiedades fundamentales, comprobándose y proponiéndose nuevas formulaciones de los resaltos libres, la longitud de los mismos, la relación entre las profundidades inicial y final, la energía disipada y las condiciones para la formación de los resaltos libres tras la compuerta, variando la distancia del inicio del resalto a la compuerta, las características de la caída de velocidad y la distribución de velocidades de dichos resaltos.

Estos resultados serán comparados y analizados con los obtenidos en el estudio del resalto hidráulico tras un azud, para finalmente obtener conclusiones acerca de flujos desarrollados y no desarrollados en el canal objeto de estudio.

#### **4.1.1. Aplicaciones prácticas del resalto hidráulico**

1. Disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas, y prevenir de esta manera la socavación aguas abajo de las estructuras.
2. Recuperar altura o aumentar el nivel del agua en el lado de aguas abajo de una canaleta de medición y mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier estructura para distribución de aguas.
3. Incrementar el peso sobre la zona de aguas abajo de la estructura y reducir la subpresión bajo la misma aumentando la profundidad del agua en su zona de aguas abajo.
4. Aumentar el caudal por debajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto (este principio lo aplicó Saugey a un aparato interesante conocido como incrementador de caída. El aparato se utiliza para incrementar la altura efectiva en una planta de generación hidroeléctrica durante los períodos de creciente manteniendo alejado el nivel de agua del lado de aguas abajo de la salida del tubo de aspiración mediante un resalto hidráulico).
5. La mezcla de sustancias químicas usadas para la purificación o el tratamiento de agua.
6. La aereación de flujos y el desclorinado en el tratamiento de agua.

7. La remoción de bolsas de aire con flujo de canales abiertos en canales circulares y aireación el agua en sistemas de suministros urbanos.
8. La identificación de condiciones especiales de flujo, como la existencia del flujo supercrítico o la presencia de una sección de control para la medición de la relación efectividad-costo del flujo mediante una estación de aforo.

#### 4.1.2. Tipos de resalto hidráulico

Los resaltos hidráulicos en fondos horizontales se clasifican en varias clases. De acuerdo con los estudios del U. S. Bureau of Reclamation éstos pueden clasificarse convenientemente según el número de *Froude*  $F_1$  del flujo entrante, como sigue:

- Para  $F_1 = 1$ , el flujo es crítico y por consiguiente no se forma resalto.
- Para  $F_1 = 1$  a 1.7, la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el *resalto ondulante*.
- Para  $F_1 = 1.7$  a 2.5, se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta entonces el *resalto débil*.
- Para  $F_1 = 2.5$  a 4.5, existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a lo largo de varios kilómetros causando daños a bancales de tierra y escolleras de protección. Se produce entonces el *resalto oscilante*.
- Para  $F_1 = 4.5$  a 9.0, la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70%. Se presenta entonces el *resalto estable*.

- Para  $F_1 = 9.0$  y mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que discurren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Se produce entonces el *resalto fuerte*.

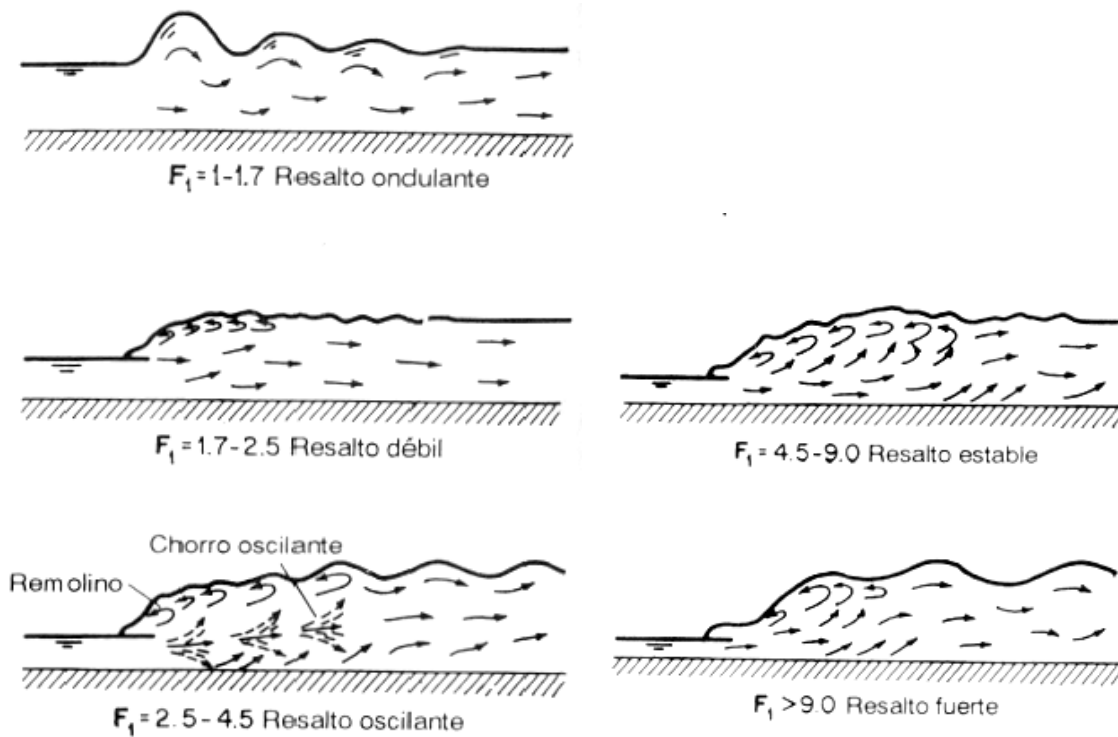


Figura 4.1. Tipos de resalto libre según  $F$

La mayoría de los resaltos de nuestro proyecto, serán oscilantes, aunque también tendremos resaltos débiles y estables.

## 4.2. Condiciones de flujo y características de la longitud del resalto

Con respecto a la longitud  $L$  de los resaltos libres, se interpreta como la longitud de la zona en la que la disipación de energía se lleva a cabo, pudiendo derivarse la siguiente relación general:

$$f(L/H_L, H_L/H_*) = 0 \quad (1)$$

donde  $H_L$  es la pérdida de energía en el resalto, y  $H_*$  es la energía específica total al comienzo del resalto. Basada en esta relación, se comprueba y se propone una ecuación experimental para la longitud de los resaltos libres y sumergidos.

### 4.2.1. Características de la longitud del resalto

Considerando  $F_1$  y  $y_1$  como el número de *Froude* y el calado al comienzo del resalto y  $B$  el ancho del canal, se han establecido diferentes resaltos hidráulicos libres, con el propósito de observar algunas condiciones del flujo y realizar mediciones del perfil y campo de velocidades en este estudio.

Es posible nivelar la pérdida para lograr estabilizar el punto de ubicación del resalto aguas abajo del obstáculo, éste fue el método que utilizamos para obtener distintos desplazamientos.

Se formaron seis tipos de resaltos hidráulicos libres. El primero se refiere a un resalto libre bajo las condiciones del flujo potencial justo al pie de la compuerta (R.L.0). Ver figura 4.2:

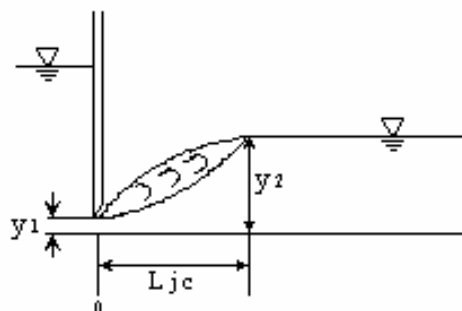


Figura 4.2. Resalto libre estabilizado al pie de la compuerta (R.L.0)

El segundo se refiere al inicio de un resalto libre estabilizado a 14 centímetros de la compuerta bajo condiciones de flujo parcialmente desarrollado (R.L.14). Ver figura 4.3:

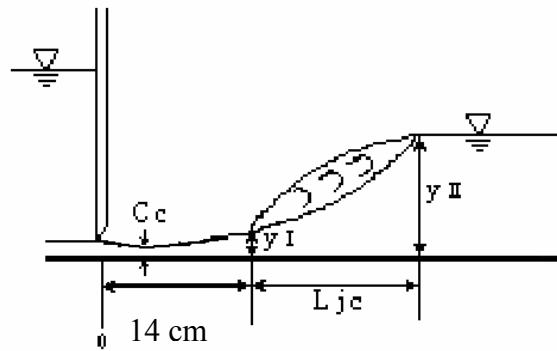


Figura 4.3. Resalto libre estabilizado a 14 cm de la compuerta (R.L.14)

El tercer resalto analizado se trata de un desplazamiento a 28 cm aguas abajo de la compuerta (R.L.28) tal como se muestra en la figura 4.4:

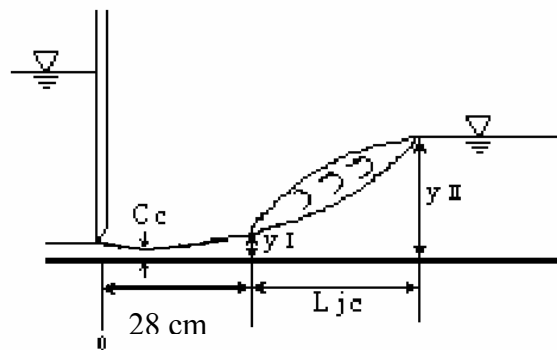


Figura 4.4. Resalto libre estabilizado a 28 cm de la compuerta (R.L.28)

Finalmente, el último resalto en el que hemos medido velocidades mediante nuestro equipo doppler, ha sido a 56 cm aguas abajo de la compuerta (R.L.56) tal como se muestra en la figura 4.5:

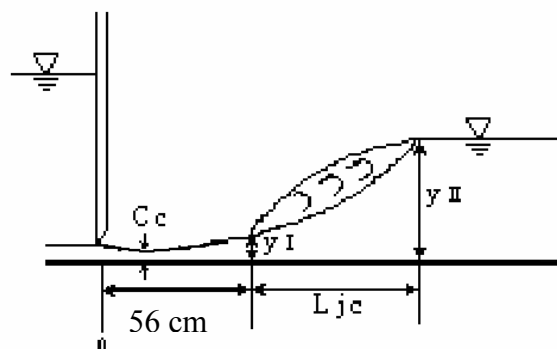
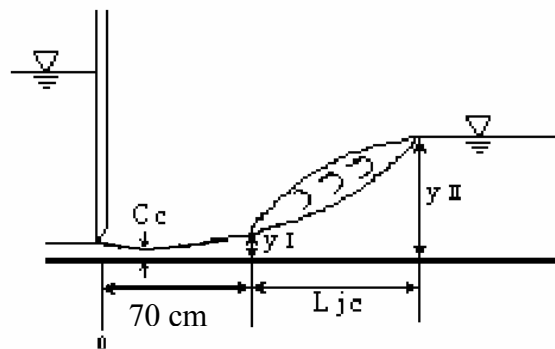


Figura 4.5. Resalto libre estabilizado a 56 cm de la compuerta (R.L.56)

Por último, debemos destacar que se han medido las características de dos resaltos más, desplazados a 70 cm y 90 cm respectivamente de la compuerta, pero en estos resaltos no hemos medido velocidades, sólo sus características principales.

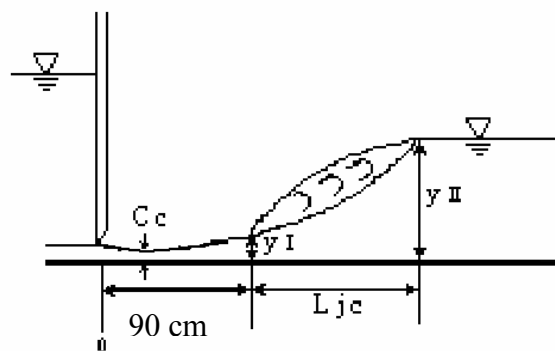
El objetivo de medir estos resaltos era el de comprobar que a una distancia considerable, el flujo era prácticamente desarrollado mediante el análisis de las principales características de esos resaltos.

El resalto a 70 cm se presenta en la figura 4.6 (a):



**Figura 4.6 (a). Resalto libre estabilizado a 28 cm de la compuerta (R.L.70)**

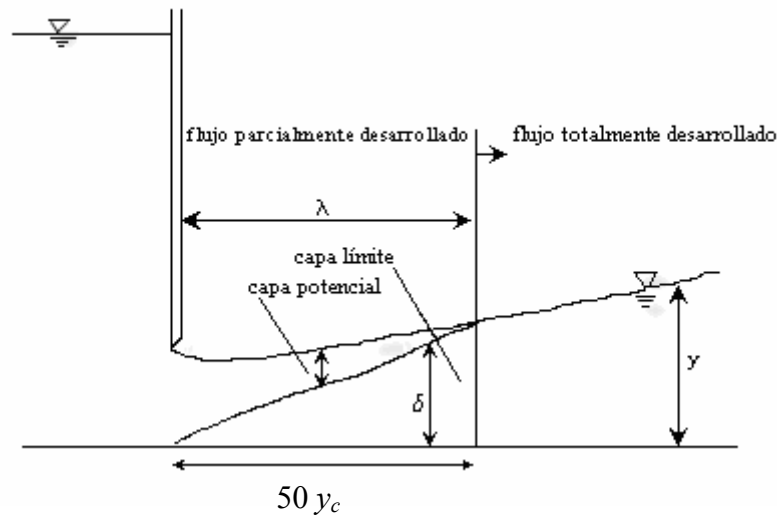
El resalto a 90 cm es el mostrado en la figura 4.6 (b):



**Figura 4.6 (b). Resalto libre estabilizado a 28 cm de la compuerta (R.L.90)**

Al incrementar la distancia desde la compuerta, el espesor de la capa límite aumenta, mientras que la capa potencial decrece. Después de una longitud  $\lambda$  de avance del flujo, el espesor de la capa límite  $\delta$  llega a ser igual a la profundidad del flujo  $y$ , constituyendo en este momento, un flujo totalmente desarrollado.

De acuerdo con Hager (1995), la longitud necesaria para que la capa límite alcance el calado del flujo (flujo totalmente desarrollado), debe ser del orden de 50 veces  $y_c$  (siendo  $y_c$  el calado contraído). Ver figura 4.7:



**Figura 4.7. Desarrollo de la capa límite de flujo supercrítico**

En nuestro proyecto se ha analizado este fenómeno en una primera aproximación. Así se ha comprobado que resaltos desplazados a una distancia de 70 cm desde el calado contraído, ya llegan a ser flujos desarrollados.

Dado que los valores del calado contraído en nuestros ensayos se encuentran entre 2.6 y 3.1 cm., podemos concluir que la distancia a la cual el flujo es desarrollado es de unas 30 veces el calado contraído.

Desde el comienzo del resalto se producen oscilaciones irregulares en la dirección del canal, dicha posición se define como el comienzo del resalto ( $x=0$ ), donde el final del resalto ( $x=L_j$ ) se determina como la primera sección donde casi no existe una variación apreciable en la distribución de velocidades.

De acuerdo con esto,  $L_j$  es la longitud del resalto, siendo  $y_2$  la profundidad del agua donde  $x=L_j$  y siendo  $y_1$  la profundidad del agua al comienzo del resalto (ver figura 4.8).

Además, se confirma que la sección donde  $x=L_j$ , es la superficie del agua que llega a estar nivelada y ya no se observa una alteración del flujo en la superficie.



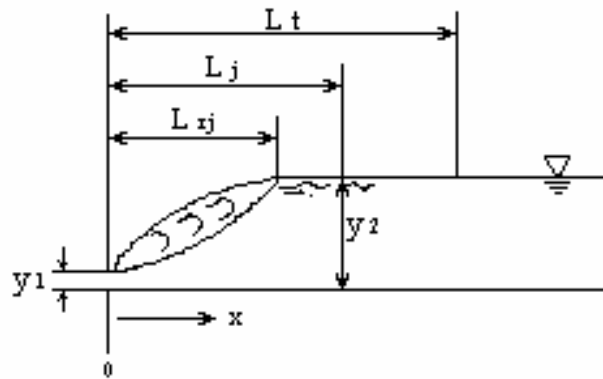


Figura 4.8. Definición esquemática para el resalto libre

En la sección ( $x=L_{rj}$ ) se define el final del rulo del resalto,  $L_{rj}$ . También indica el final de la zona de separación entre  $L_{rj}$  y  $L_j$ .

Además, la primera sección donde el cambio del perfil de velocidad en el flujo es despreciable se define como  $x=L_t$ . Así, para  $x<L_t$ , el perfil de velocidad cambia sustancialmente con  $x$ , pero para  $x>L_t$ , el perfil cambia muy poco en la dirección del flujo.

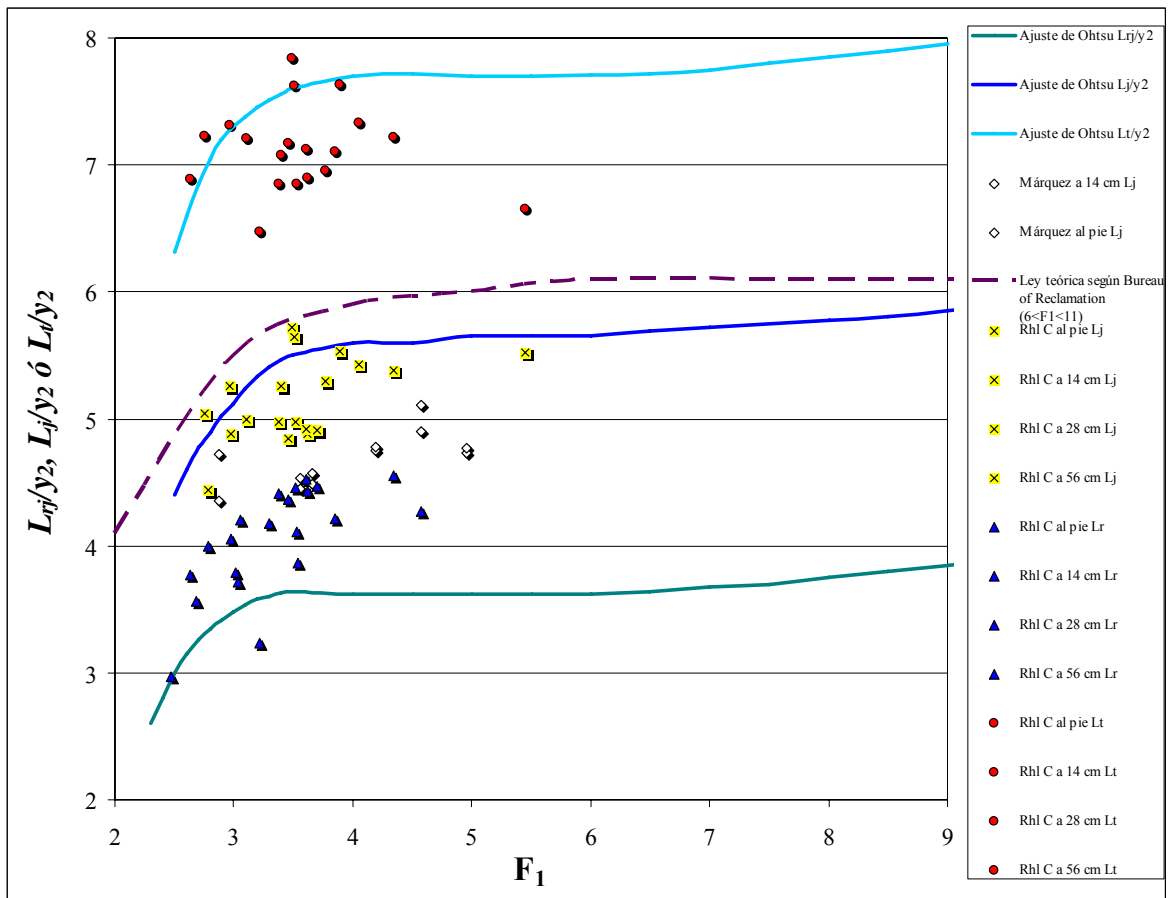
Según estudios experimentales realizados en la Universidad Nihon [Ohtsu et al. (1990)], las cantidades  $L_{rj}/y_2$ ,  $L_j/y_2$ ,  $L_t/y_2$  medidas en función de  $F_1$  para un Caso “a” (referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo potencial) y un Caso “b” (referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo totalmente desarrollado), se indican en la Figura 4.9.

Hemos descartado aquellas medidas anómalas o que se alejaban mucho de los resultados esperables, pues al ser la medición de la longitud del resalto un criterio de medida subjetivo, se pueden producir algunas mediciones incoherentes que no deben ser tomadas en cuenta.

Como se puede apreciar los valores de  $L_{rj}/y_2$ ,  $L_j/y_2$ , y  $L_t/y_2$  cambian considerablemente en el rango  $2,3<F_1<3,5$ , pero los valores llegan a ser aproximadamente constantes para  $F_1>5$  ( $L_{rj}/y_2=3,7$ ;  $L_j/y_2=5,5$  y  $L_t/y_2=7,6$ ). (figura 9).

En esta figura también se han incluido nuestros resultados experimentales en los resaltos libres establecidos,  $L_j$ ,  $L_r$  y  $L_t$ , así como también, la ley teórica según el Bureau of Reclamation para resaltos libres, ecuación (2):

$$L_j = 6,1 y_2; \text{ para } (6 < F_1 < 11) \quad (2)$$

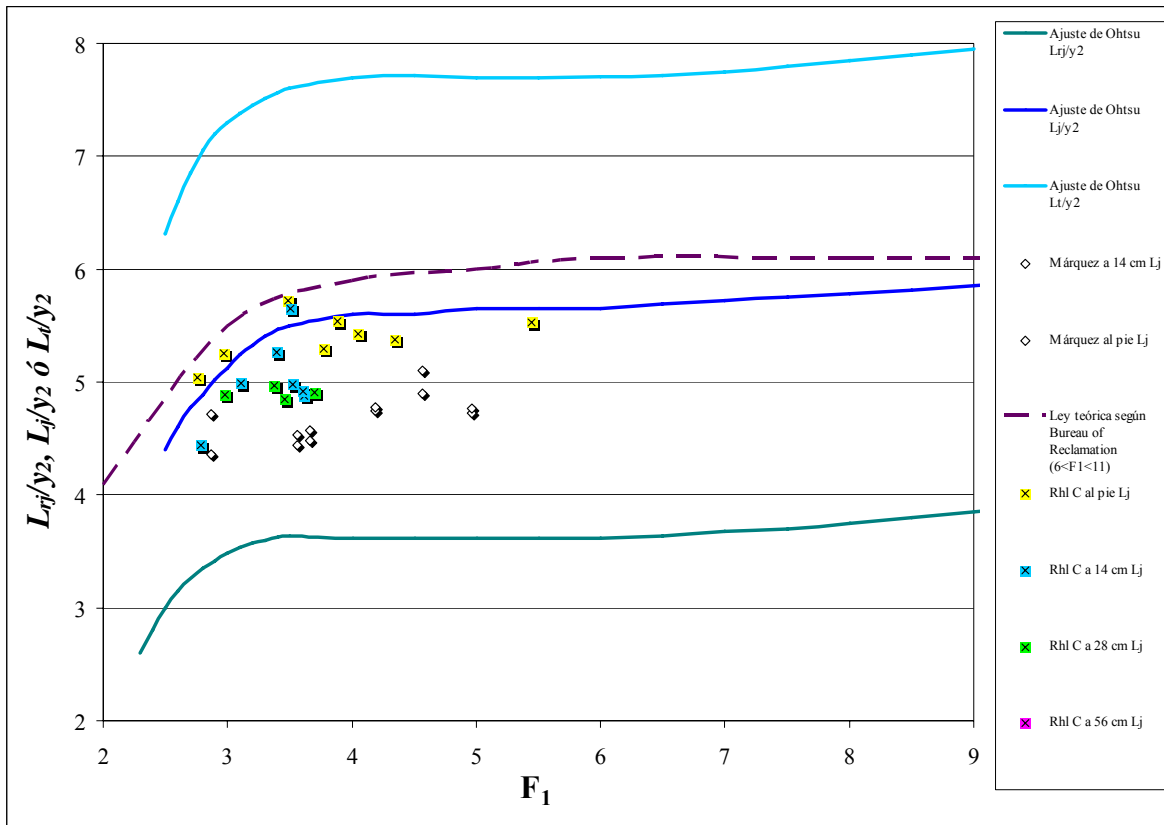


**Figura 4.9.** Características de longitud del resalto libre  $L_{rj}/y_2$ ,  $L_j/y_2$ ,  $L_t/y_2$ .

Se puede observar que los resultados experimentales obtenidos en nuestro trabajo se encuentran en un rango  $[ 2 < F_1 < 6 ]$  y la longitud de resalto medido se encuentra entre los valores  $L_{rj}$  y  $L_j$  establecidos por Ohtsu et al. (1990).

Esto está totalmente de acuerdo con el criterio que fue establecido para medir la longitud de resalto hidráulico en nuestro laboratorio y que se discute más adelante.

En la siguiente figura, presentamos únicamente los valores de  $L_j$  obtenidos en nuestro proyecto, comparados con los de Márquez (2006) hemos de destacar que tanto en nuestro proyecto, como en el que realizó Márquez, el flujo era parcialmente desarrollado, por tanto los valores de Ohtsu que nos afectan son los del caso “a”:



**Figura 4.10. Características de la longitud del resalto libre  $L_j$**

En la figura 4.11, análogamente a cómo se ha realizado en la figura 4.12, se han representado los valores de  $L_r/y_1$ ,  $L_t/y_1$ , y  $L_j/y_1$ , se puede observar que los valores de  $L_t$  son superiores a los de  $L_j$ , y éstos superiores a los de  $L_r$ , al igual que hemos realizado anteriormente, analizamos y descartamos si procede los valores que alteran la serie.

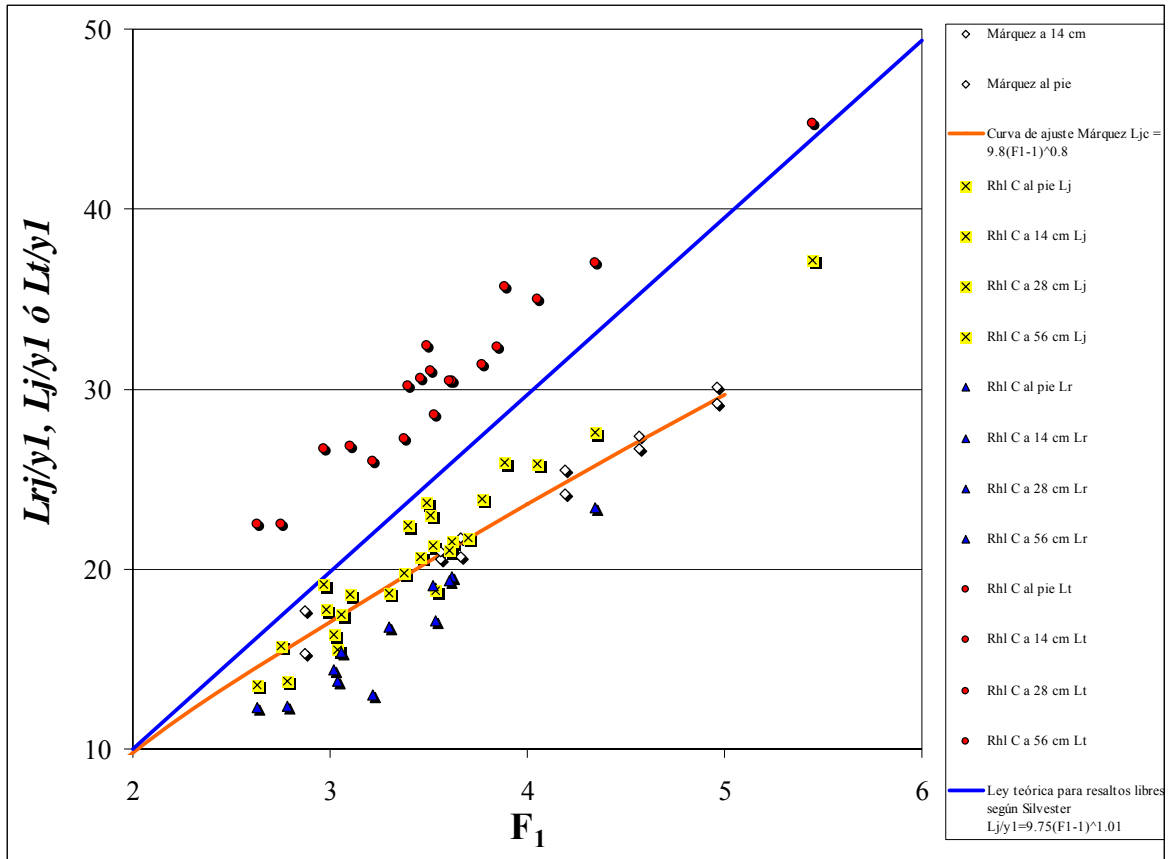


Figura 4.11. Características de la longitud del resalto libre  $Lr/y_1$ ,  $Lt/y_1$ , y  $Lj/y_1$ .

En la figura 4.12 se representa la relación  $L_j/y_1$  medida en función del número de *Froude* junto con la ecuación (3) propuesta por Silvester (1964):

$$L_j / y_1 = 9,75(F_1 - 1)^{1,01} \quad (3)$$

La curva de ajuste a nuestros datos experimentales, similar a la de Silvester, es la siguiente:

$$L_{jc} / y_1 = 9,51(F_1 - 1)^{0,879} \quad (4)$$

Podemos observar que para valores bajos de *Froude* ( $F_1 < 3$ ), los valores de  $L_{jc} / y_1$  son similares, pero a medida que se aumenta el *Froude* nuestros valores experimentales son cada vez más pequeños comparados con los de Silvester.

Algo similar a lo que observó Márquez (2006) en su proyecto, la curva de ajuste para sus resultados es:

$$L_{jc} / y_1 = 9,8(F_1 - 1)^{0,80} \quad (5)$$

Este resultado también es concordante con el criterio definido para medir la longitud de resalto hidráulico que se encuentra entre la longitud del rulo del resalto  $L_{rj}$  y la longitud  $L_j$  definida por otros autores.

También podemos observar que la curva de tendencia posee una concavidad ligeramente decreciente cuando aumenta el *Froude*; en contraste con la curva de ajuste de Silvester que es prácticamente linealmente creciente.

Se han representado los valores de Márquez (2006), ligeramente inferiores a los nuestros:

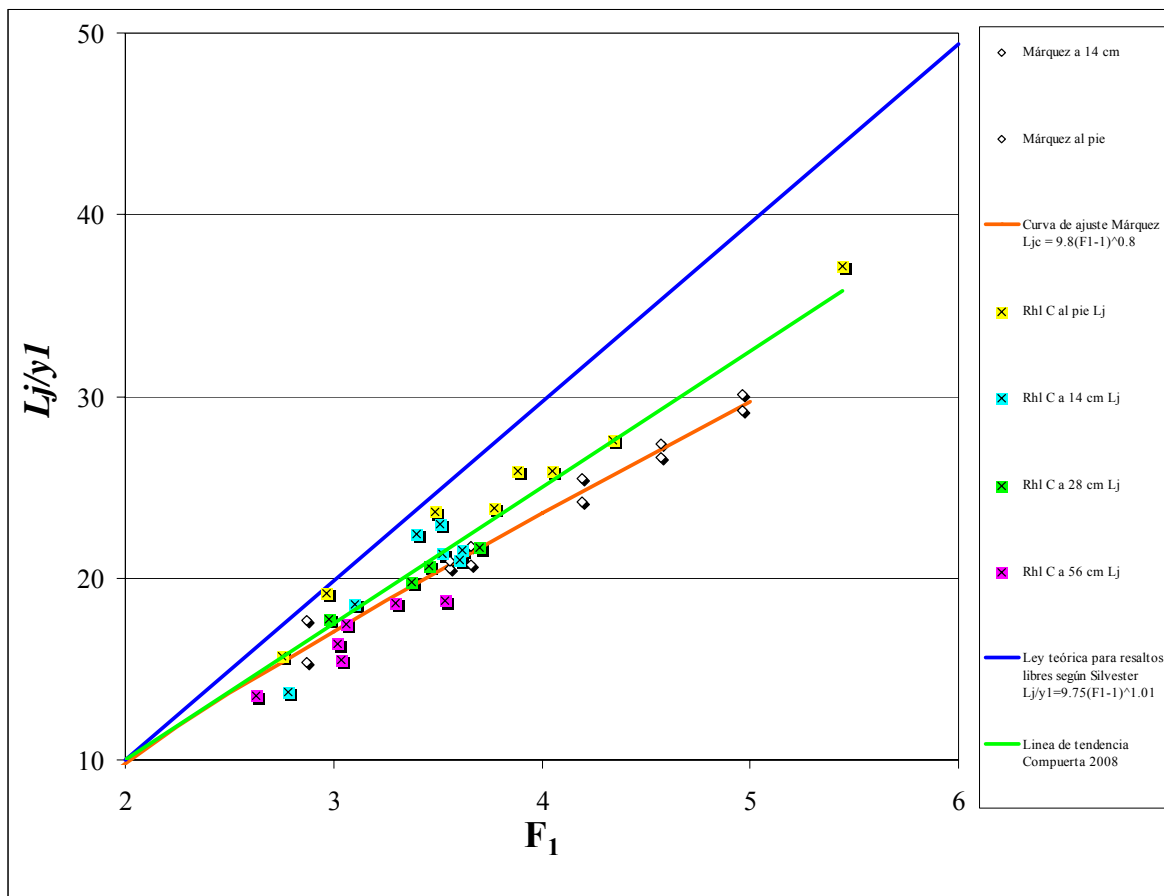


Figura 4.12. Características de longitud del resalto libre

#### 4.2.2. Caída de la velocidad máxima

Los datos experimentales de caída de velocidad máxima  $u_m$  en el resalto, analizados en base a la relación (6), revelan que  $u_m$  decae rápidamente con la longitud  $L_j$  tal como se muestra en la Figura 4.13.

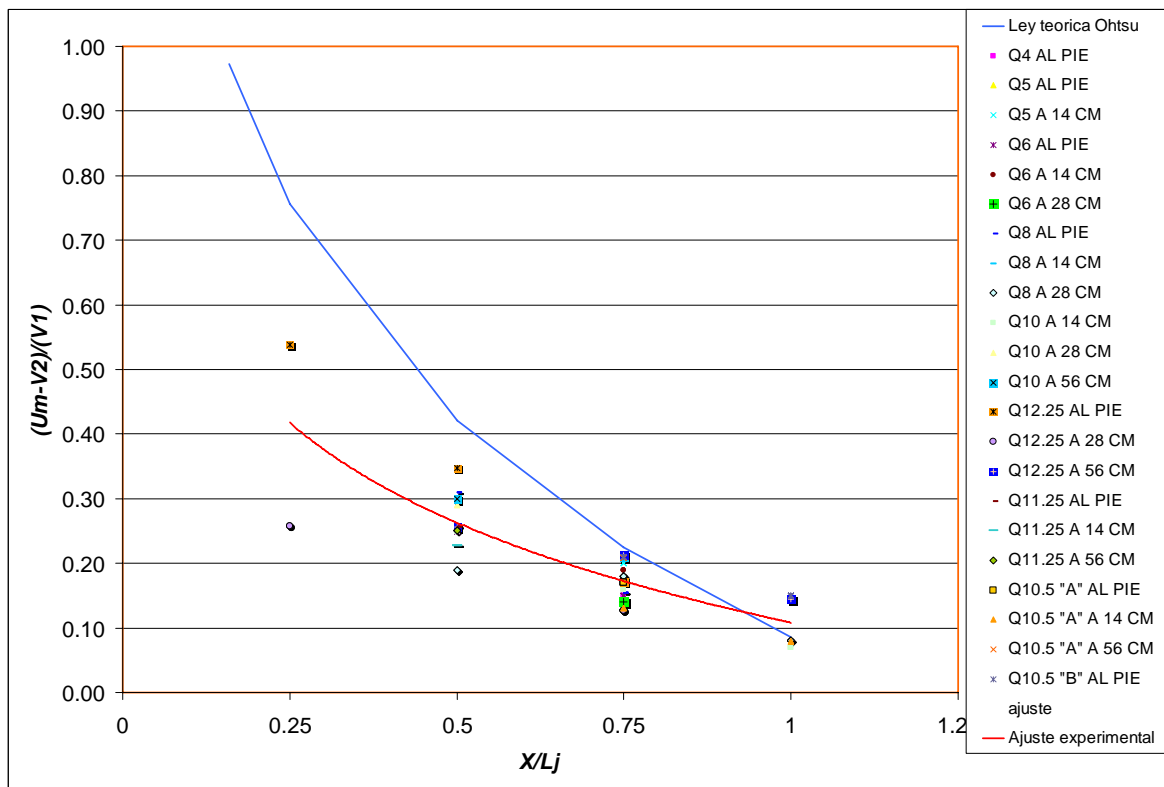
$$f\left(\frac{u_m - v_2}{v_1}, \frac{x}{L_j}\right) = 0 \quad (6)$$

Ohtsu et al. (1990) ajusta la relación empírica siguiente:

$$(u_m - v_2)/v_1 = 0,0855 - 1,114 \log_{10}(x/L_j); \quad \text{para } (0,15 \leq x/L_j \leq 1) \text{ y } (3 \leq F_l \leq 9,5) \quad (7)$$

donde  $v_1 = Q/(B y_1)$  y  $v_2 = Q/(B y_2)$ , siendo  $Q$  el caudal circulante.

De este modo,  $u_m$  cambia sustancialmente para  $x < L_j$ , pero es casi constante para  $x \geq L_j$ .



**Figura 4.13. Caída de velocidad máxima para resaltos libres.**

En la figura 4.13 se representan los resultados experimentales según el número de Froude para el que fueron medidos en este trabajo y según se trate del resalto libre estabilizado a 14 cm de la compuerta (R.L.14), del resalto libre formado al pie de la compuerta (R.L.0), del resalto libre estabilizado a 28 cm de la compuerta (R.L.28) o del resalto libre estabilizado a 56 cm de la compuerta (R.L.56).

Se observa que los datos experimentales obtenidos se ajustan mejor a la ley empírica (ecuación 6) obtenida por Ohtsu et al. (1990) era partir de la mitad del resalto libre ( $x/L_j=0,50$ ), incluida esta sección, pero para los valores medidos en la sección situada a  $1/4$  del resalto desde su inicio, se observa una caída con respecto a la ley teórica representada y el ajuste no es tan bueno, aunque estos datos experimentales siguen manteniendo la tendencia que sigue la ley teórica del ajuste.

La ecuación (8) describiría una ley de ajuste más apropiada a nuestros datos.

$$(u_m - v_2)/v_1 = 0,11 - 0,51 \log_{10}(x/L_{jc}); \text{ para } (0,15 \leq x/L_{jc} \leq 1) \text{ y } (2,5 \leq F_l \leq 5) \quad (8)$$

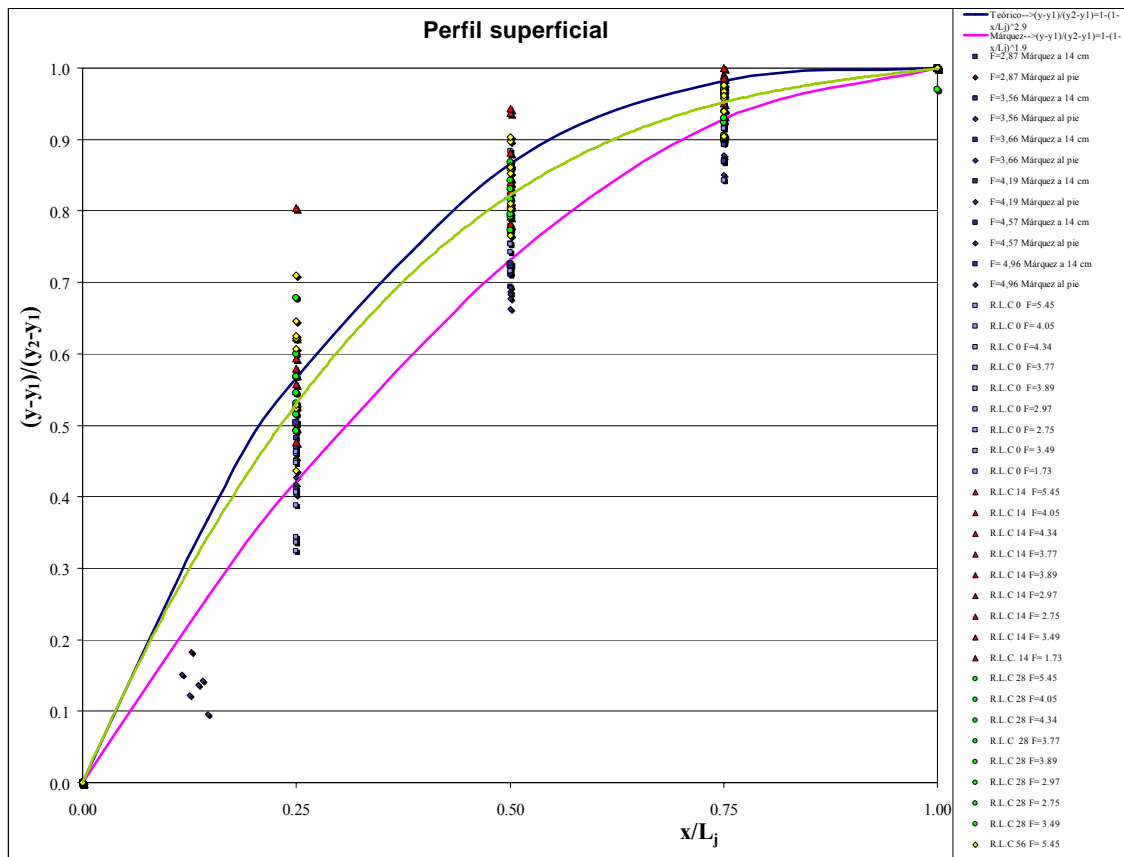
#### 4.2.3. Perfil superficial

Ohtsu analiza los datos experimentales de acuerdo a la relación (9), y propone que el perfil superficial del resalto se puede expresar por las ecuaciones (10) y (11). (Figura 4.14).

$$(y - y_1)/(y_2 - y_1) = f(x/L_j) \quad (9)$$

$$(y - y_1)/(y_2 - y_1) = 1 - (1 - x/L_j)^{2,9}; \text{ para } (2,3 < F_l \leq 3) \quad (10)$$

$$(y - y_1)/(y_2 - y_1) = 1 - (1 - x/L_j)^{1,9}; \text{ para } (3,5 \leq F_l \leq 9,5) \quad (11)$$



**Figura 4.14. Perfil superficial para los resaltos libres.**

La Figura 4.14 indica que la superficie del agua es casi horizontal para  $x/L_j \geq 0,9$ . Una vez comparados nuestros resultados experimentales con ambas leyes teóricas se observa que existe una concordancia satisfactoria entre el perfil superficial teórico y el medido.

Considerando que se ha trabajado con números de *Froude* comprendidos entre 1,96 y 5,45, ambos inclusive, se puede apreciar que los resultados experimentales se ajustan mejor a la ley teórica expresada por la ecuación (11), quedando algunos otros valores comprendidos entre la línea representada por la ecuación (10) y la línea representada por la ecuación (11).

Se ha realizado un ajuste experimental a los resultados obtenido, como podemos observar se encuentra entre la ecuación (9) y (10).



### 4.3. Relación entre profundidades inicial y final

Seleccionando la zona de un resalto libre en un canal horizontal como un volumen de control, la ecuación (13) se puede derivar de la ecuación de momentum (12), que es aplicada en la dirección-x junto con una ecuación de continuidad bajo las siguientes suposiciones:

- 1) el resalto se forma sobre un fondo horizontal de gran anchura,
- 2) la turbulencia es insignificante al comienzo del resalto,
- 3) las tensiones viscosa y turbulenta son insignificantes sobre la superficie libre.

$$\int_S \bar{V}(n_0 \cdot \bar{V}) dS = \int_S n_I \bar{p} dS - \left[ \int_S \mu \frac{\partial \bar{V}}{\partial n_I} dS + \rho \int_S \overline{V' \cdot (n_0 \cdot V')} dS \right] \quad (12)$$

donde  $\bar{V} = \bar{u}i + \bar{v}j$  (velocidad media temporal),  $V' = u'i + v'j + w'k$  (velocidad turbulenta fluctuante),  $\bar{p}$ : intensidad de presión media temporal, S: superficie de control,  $n_0$ : vector unitario normal hacia fuera de  $dS$ ,  $n_I$ : vector unitario normal hacia dentro de  $dS$ .

$$\rho Q(\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1) = \lambda'_1 \gamma(h_g A)_1 - \lambda'_2 \gamma(h_g A)_2 - \int_0^{L_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho(-\overline{u'v'}) \right)_{y=0} dx - \int_0^{y_2} (\rho \overline{u'^2})_{x=L_j} dy \quad (13)$$

donde:

$\rho$ : densidad del agua

$A$ : área de la sección

$y$ : coordenada vertical dirigida hacia arriba empezando desde el fondo del canal

$q$ : caudal unitario ( $q = Q/B$ )

$$\beta = \int_A (\bar{u}/v)^2 dA / A$$

$$\lambda' = 1 + (1/h_g A) \int_A (\Delta p / \gamma) dA$$

$h_g$ : profundidad al centro de gravedad de la sección (en la sección rectangular,  $h_g = y/2$ )

$\gamma$ : peso específico del agua ( $\gamma = \rho \cdot g$ )

( $\Delta p$  indica la desviación de la presión hidrostática)

En forma dimensional, la ecuación (13) se puede expresar como:

$$\lambda^2 (y_2 / y_1)^3 + [2(\gamma_2 - \beta_1)F_1^2 + S_f - \lambda'_1](y_2 / y_1) + 2\beta_2 F_1^2 = 0 \quad (14)$$

donde:

$$S_f = P_f / (\gamma \cdot y_1^2 / 2)$$

$$(P_f = \int_0^{L_j} \tau_0 dx; \text{ donde } \tau_0 \text{ es la tensión de corte en el contorno: } \tau_0 = [\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho(-\overline{u'v'})]_{y=0})$$

$$F_1 = v_1 / \sqrt{gy_1}$$

$$\gamma_2 = \int_0^{y_2} \overline{u'^2} dy / v_1^2 y_1$$

La ecuación (14) se puede expresar también como:

$$F_1^2 = (y_2 / y_1) [\lambda'_2 (y_2 / y_1)^2 + S_f - \lambda'_1] / 2[1 + \Delta\beta_1 - \gamma_2](y_2 / y_1) - (1 + \Delta\beta_2) \quad (15)$$

donde:

$$\beta_1 = 1 + \Delta\beta_1$$

$$\beta_2 = 1 + \Delta\beta_2$$

Cuando  $\lambda'_1 = \lambda'_2 = 1$ ,  $S_f = 0$ ,  $\Delta\beta_1 = \Delta\beta_2 = 0$  y  $\gamma_2 = 0$ , la ecuación (15) se puede reducir a la común relación de profundidad secuente o ecuación de los calados conjugados de Bélanger, ecuación (16):

$$\frac{y_2}{y_1} = (\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1) / 2 \quad (16)$$

Harleman (1958) encontró que los errores debidos a la uniformidad asumida del flujo ( $\beta_1 = \beta_2 = 1$ ) y a no tener en cuenta la turbulencia al comienzo y al final del resalto ( $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ ) son muy pequeños y tienden a cancelarse unos a otros, y que la tensión de corte del fondo integrada  $S_f$  es el único término adicional importante a considerar:

Por esta razón,  $\lambda'_1 = \lambda'_2 = 1$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 1$  y  $\gamma_2 = 0$ , la ecuación (14) se reduce a la ecuación (17):

$$(y_2 / y_1)^3 - [2F_1^2 + 1 - S_f](y_2 / y_1) + 2F_1^2 = 0 \quad (17)$$

Desde la ecuación (17) se puede observar que a mayores valores de  $S_f$  y para un valor de  $F_1$  dado, la relación  $\frac{y_2}{y_1}$ , tiende a ser más pequeña.

Rajaratnam (1965), demostró que los datos obtenidos para diversos experimentos y de diversa procedencia, mostraban mejor concordancia con la ecuación (17) que con la ecuación (16).

De acuerdo con esto, en un supuesto Caso “a” referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo potencial, justo debajo de la compuerta, el valor experimental de  $y_2/y_1$  para un  $F_1$  dado era algo más pequeño que el valor de  $y_2/y_1$  dado por la ecuación (16); pero en un supuesto Caso “b” referido al inicio de un resalto libre bajo las condiciones del flujo totalmente desarrollado, se asumía que el valor experimental podía coincidir con el valor de  $y_2/y_1$  derivado de la ecuación (16).

Esto se explicaba por la suposición de que en el Caso “a”, los efectos de  $S_f$  podrían ser grandes dado que la capa límite no se separa del fondo del canal, mientras que en el Caso “b”,  $S_f \approx 0$ , porque la capa límite podría estar separada del fondo del canal (flujo totalmente desarrollado).

Ohtsu et al.(1990) también encuentran diferencias entre las relaciones de los calados conjugados para los casos “a” y “b”, pero consideran que las diferencias son pequeñas y sugieren que para propósito de diseño práctico, se aplique la ecuación de Bélanger, a los dos resaltos tipo “a” y “b”.

Leutheusser y Kartha (1972) llevaron a cabo un estudio semi-empírico de resaltos hidráulicos rechazados aguas abajo de una compuerta.

Sus ensayos corresponden a flujos totalmente desarrollados.

Propusieron la siguiente relación de los calados conjugados, ecuación (18):

$$F_1^2 = \frac{\frac{y_2}{y_1} \left[ \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2 - 1 \right]}{2.06 \left[ \frac{y_2}{y_1} - 1 \right] - 0.0244 \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2} \quad (18)$$

Presentamos en la figura 4.15 los valores de  $y_2/y_1$  para todos los resaltos con todos sus desplazamientos, a priori no podemos notar ninguna diferencia, pero estos valores no son correctos, pues están afectados por fenómenos de escala, y además, se representan sin distinción alguna valores para flujo “no desarrollado y desarrollado”, así que tendremos que tratar estos datos para obtener unos resultados coherentes.

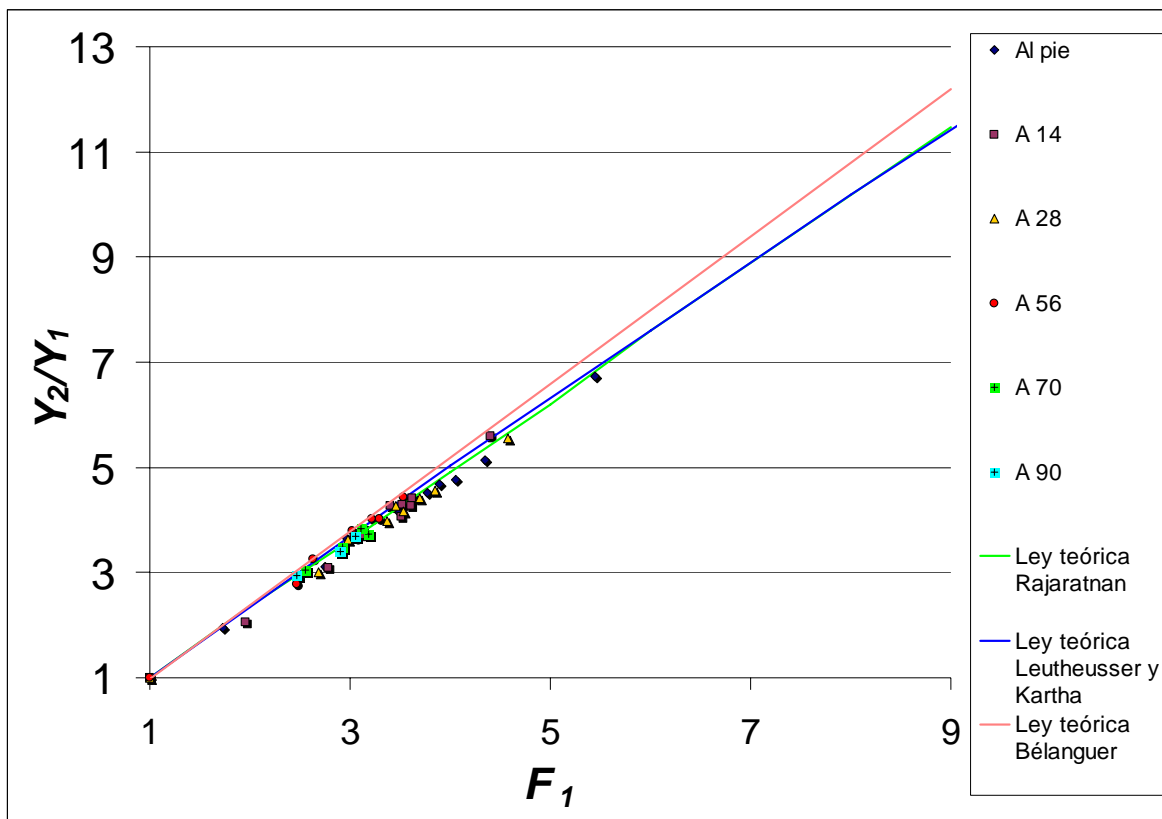


Figura 4.15. Flujos no desarrollado y desarrollado. Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

El criterio que hemos seguido para clasificar los flujos es similar al de Chanson (2005), en sus proyectos, el cual comprobó que para  $Reynolds > 21.000$  ya no se producen efectos de escala, nosotros consideraremos  $Re > 25.000$ .

Debemos recordar que el número de *Reynolds* se calculaba de la siguiente forma, ecuación (19) :

$$Re = v * R_h / \nu \quad \text{siendo} \quad (19)$$

$v$ : velocidad del fluido

$R_h$  : Radio hidráulico

$\nu$  : viscosidad cinemática del agua de  $1,003 \times 10^{-6}$  para una temperatura de 20°C.

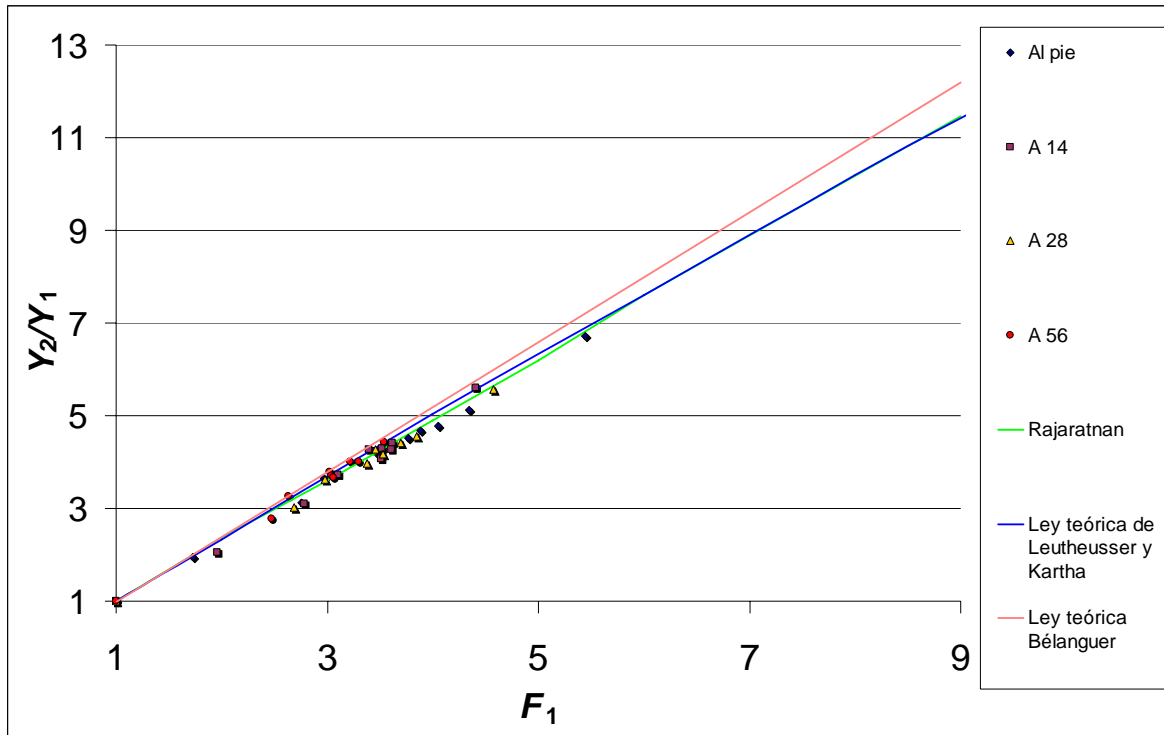
Al tratarse todos los *Reynolds* del proyecto de números mayores de 14.000, concluimos que se trata de un flujo inequívocamente turbulento, pues son números mayores de 4.000.

En nuestro proyecto, como se explicará más adelante, los efectos de escala afectan hasta valores de *Reynolds* de al menos 30.000, sin embargo, para nuestros estudios, consideraremos que valores superiores a 25.000 serán aceptables.

Cómo observamos en las figuras, tanto Rajaratnan (1965) como Leutheusser y Kartha (1972) , en sus estudios semi-empíricos obtuvieron unos resultados menores que los de Bélanger, pues se supone que ellos ya habían considerados todos estos fenómenos de pérdidas de energía.

La figura 4.16 muestra los datos de la figura 4.15 después de filtrarlos con los criterios de que el flujo es no desarrollado para distancias a la compuerta menores de 30 veces el calado contraído, medidas desde el inicio del resalto.

Aquí aparecen los datos para flujos no desarrollados, muy afectados por fenómenos de escala, por lo que en lugar de tender a Bélanger como se esperaría, tienden a Rajaratnan , al igual que los flujos desarrollados.



**Figura 4.16. Flujo no desarrollado. Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$**

Los resultados experimentales para los resaltos menores de 56 cm caen sistemáticamente por debajo de los esperados debido, sin duda a los efectos de escala que se producen en el canal.

En la figura 4.17 se presentan los resultados experimentales para los resaltos más desarrollados, pues se han medido a 70 cm y 90 cm de la compuerta.

Estos resultados tienden a la ley de Rajaratnan, algo esperable, pues ya se encuentran libres de efectos de escala.

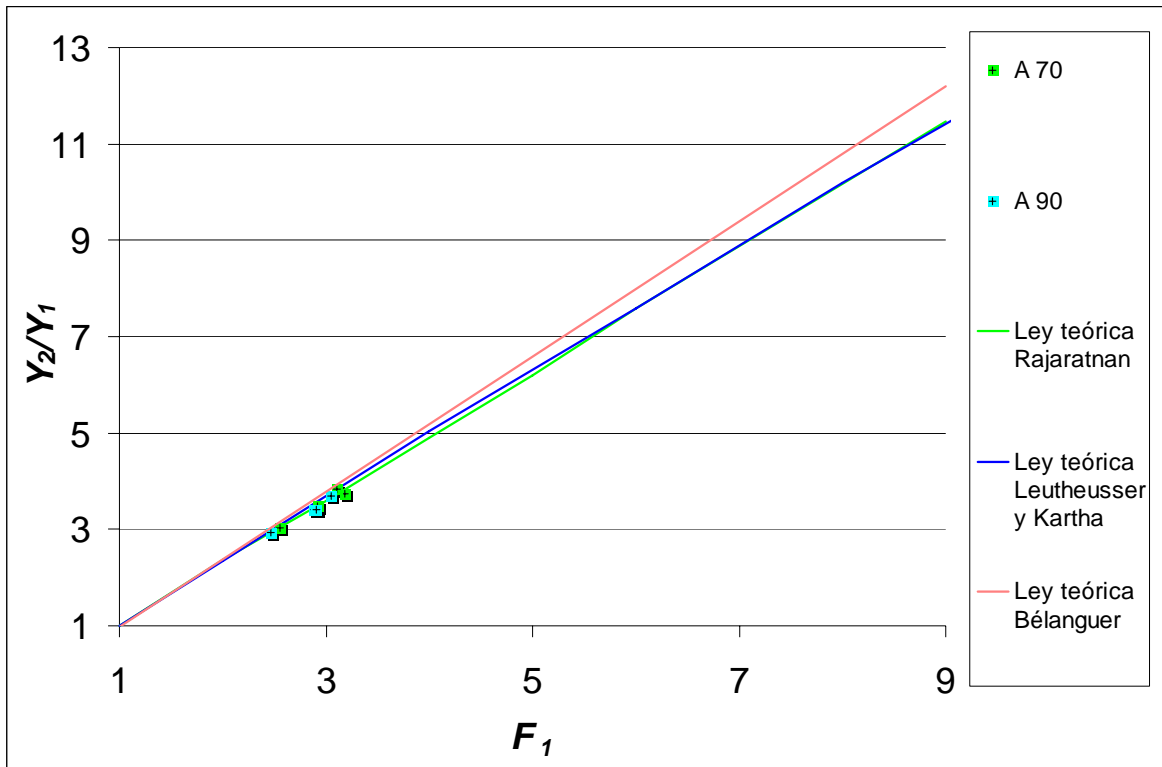


Figura 4.17. Flujo desarrollado. Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

En la figura 4.18 se presentan todos los desplazamientos una vez se han filtrado con el criterio de Chanson (2005), es decir, sólo se presentan los datos que tiene un  $Re > 25.000$  considerado como umbral a partir del cual, los efectos de escala son mucho menores.

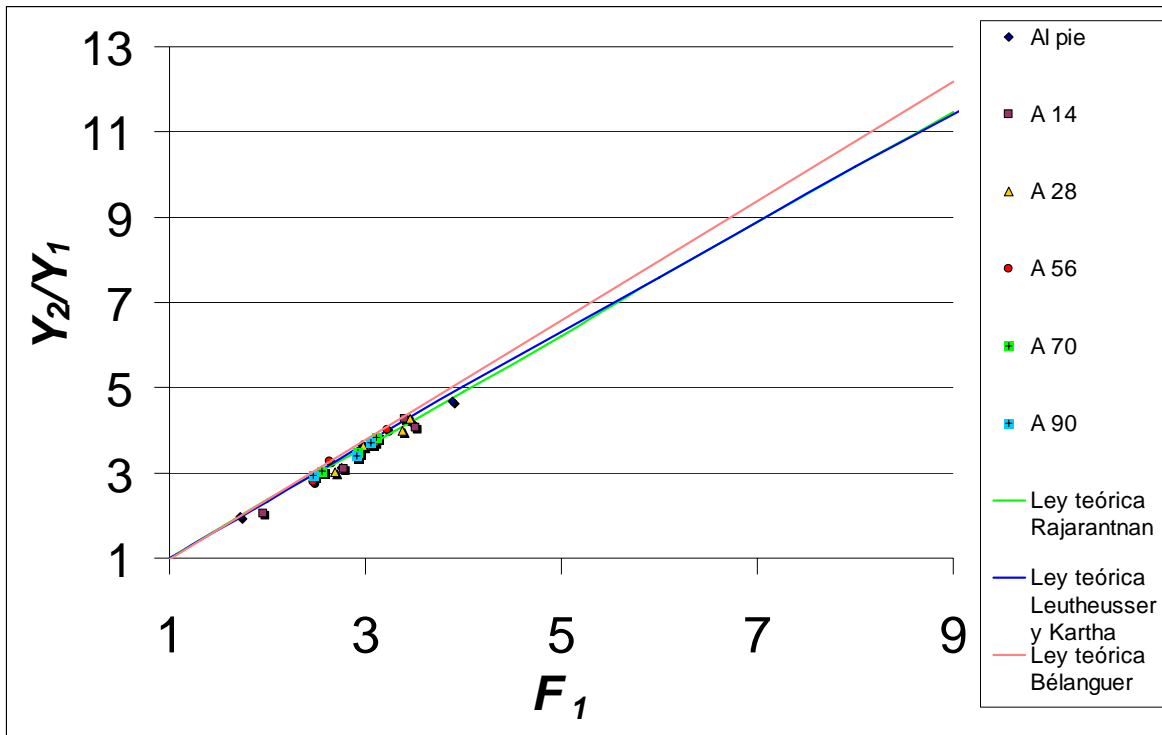


Figura 4.18. Flujos no desarrollado y desarrollado para  $Re > 25.000$ . Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

Al igual que hemos realizado anteriormente, distinguimos entre flujos “desarrollados” y “no desarrollados”, en la figura 4.19 presentamos los valores para desplazamientos de hasta 56 cm donde el flujo todavía no se ha desarrollado en nuestro canal, mantienen una buena coherencia entre ellos, sin embargo, aún siguen muy alejados de los valores teóricos de Bélanger, debido cómo ya se ha dicho, a la incidencia de los efectos de escala.



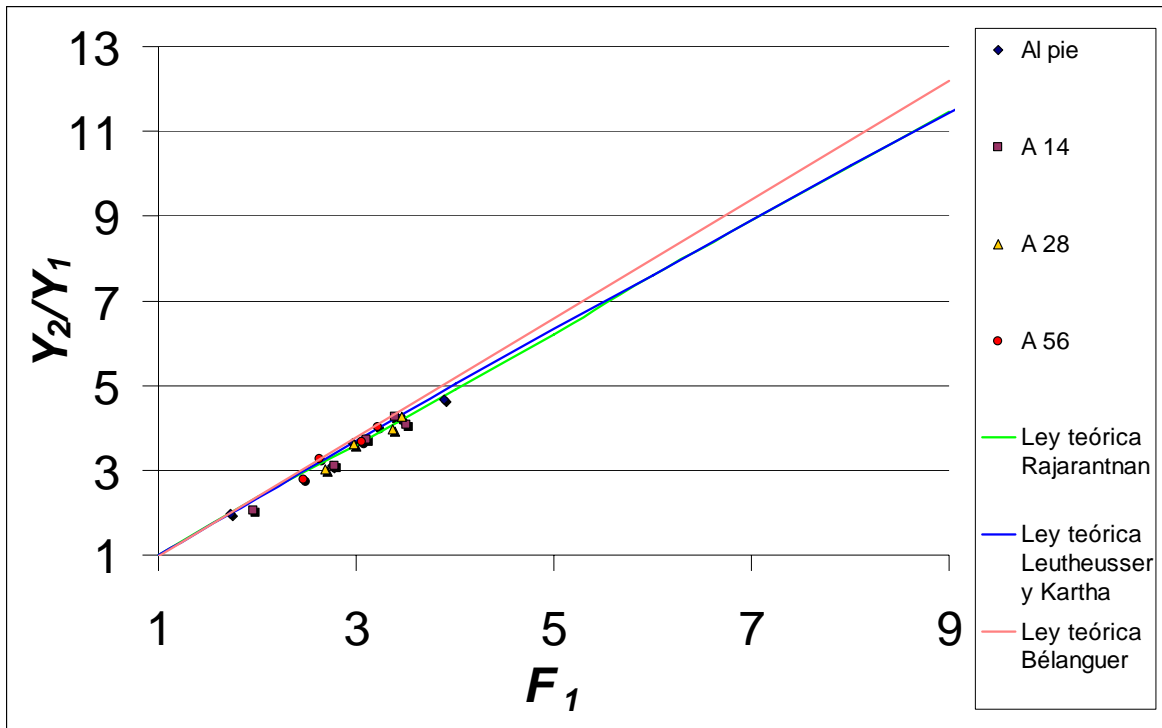


Figura 4.19. Flujo no desarrollado para  $Re > 25.000$ . Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

En la figura 4.20 se presentan flujos desarrollados y no afectados por efectos de escala, a partir de esta gráfica, podemos deducir que aunque hagamos distinción entre altos *Reynolds* y bajos, no se clasifican bien las mediciones, pues en flujo no desarrollado necesitaríamos unos *Reynolds* muy altos.

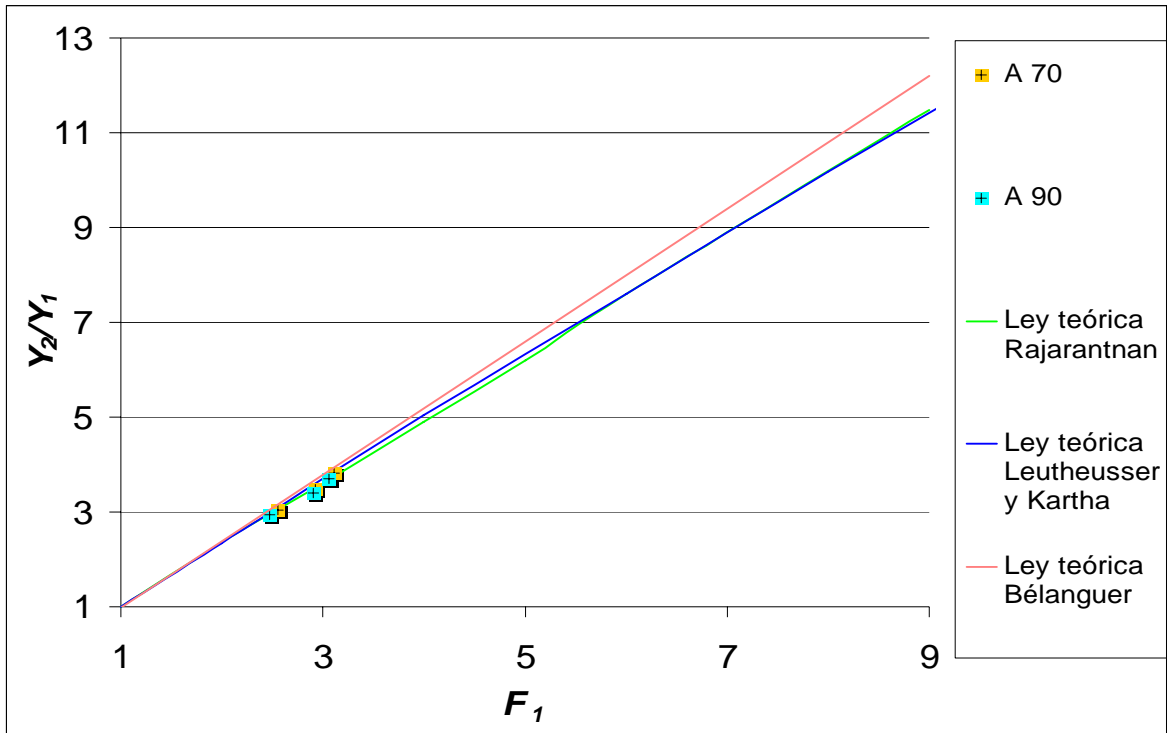


Figura 4.20. Flujo desarrollado para  $Re > 25.000$ . Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

En la figura 4.21 se presentan los datos para flujo desarrollado tras el azud, al ser flujo desarrollado tienden a la ley de Rajarantnan, no están afectados por los efectos de escala.

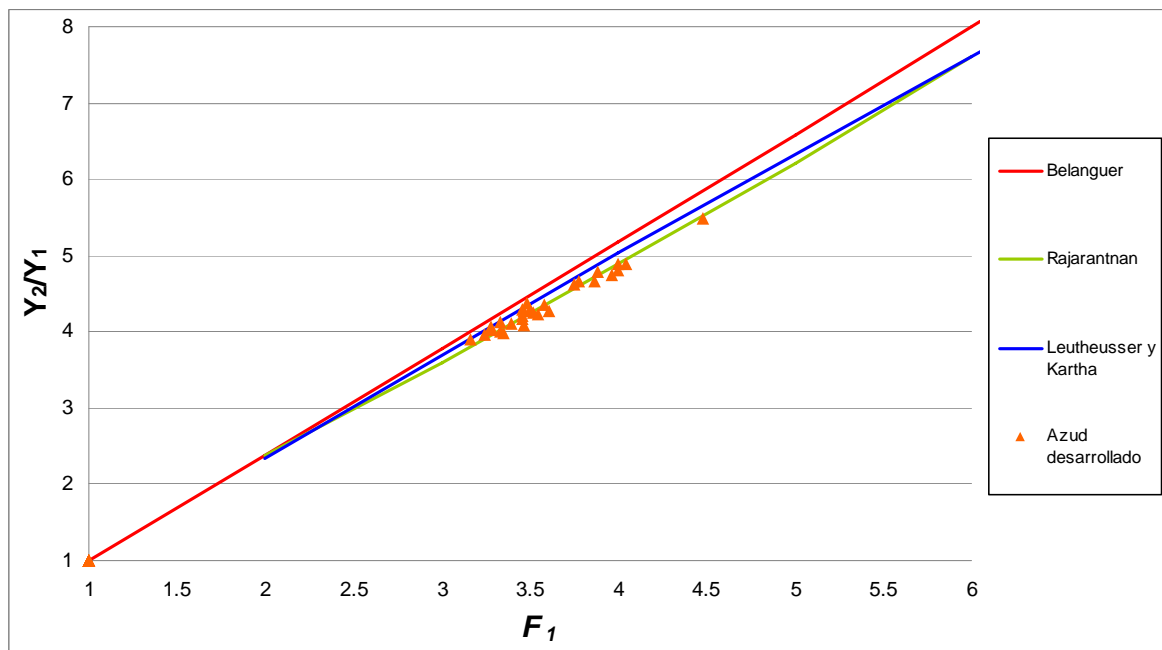


Figura 4.21. Flujo desarrollado tras azud, sin efecto de escala. Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

En la figura 4.22 se presentan los resultados para flujo desarrollado tras la compuerta, conjuntamente con los del azud, se obtienen unos resultados muy coherentes, por lo tanto inferimos que en el azud, la distancia necesaria para que se desarrolle el flujo es mucho menor que la necesaria en la compuerta, ambos valores caen en la ley de Rajarantnan.

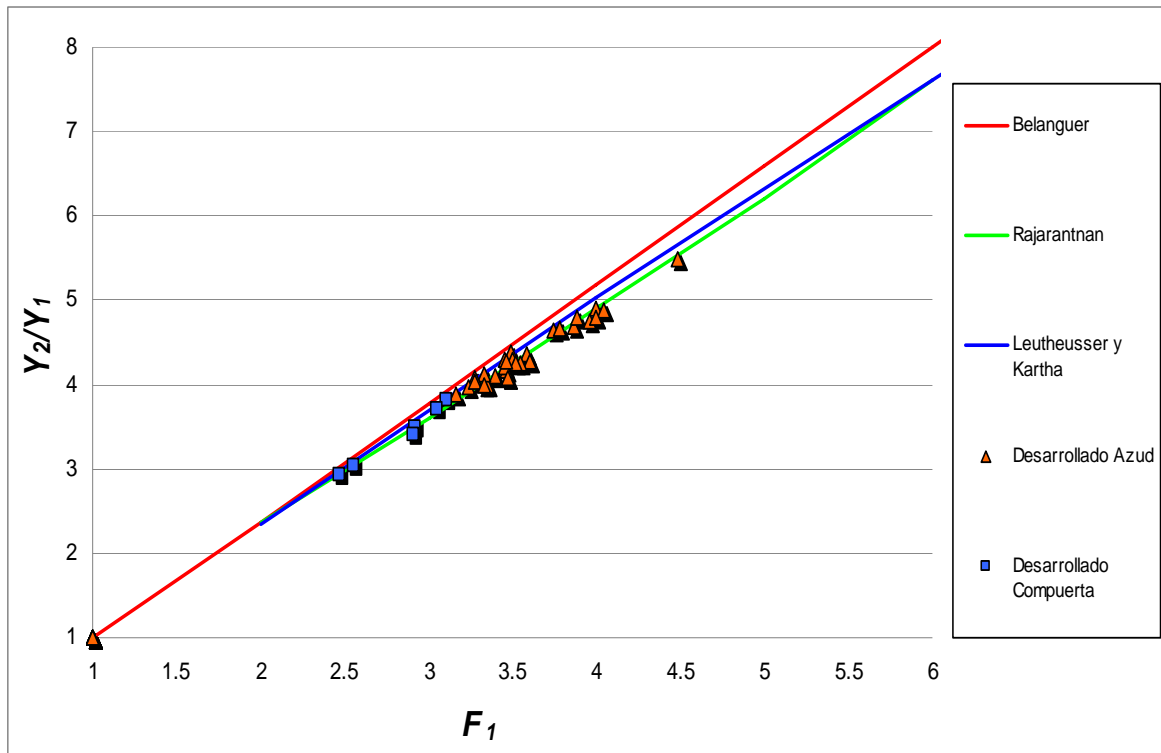


Figura 4.22. Relación entre  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

Una interpretación de los gráficos presentados de las ecuaciones de Bélanger, Leutheusser y Kartha y Rajaratnam :

- Leutheusser y Kartha llevaron a cabo un estudio semi-empírico, obtuvieron altos n° de *Froude*, la ley que describieron es poco práctica y aunque es curva, se asemeja en ocasiones a la de Rajaratnam, es por su complejidad que esta ley ha sido menos representativa, se encuentra entre los valores de Bélanger y Rajaratnam, esto no hace pensar que el campo de estudio de los calados conjugados, aún tiene muchas lagunas y necesita ser examinado más profundamente, pues las teorías de muchos autores al respecto son contradictorias entre si.

- Al tener valores altos de *Reynolds*, la capa límite turbulenta da mayores fuerzas de fricción que la laminar, pero presenta una mayor resistencia al desprendimiento.

- La relación de calados conjugados en los flujos totalmente desarrollados y parcialmente desarrollados en el estudio de la compuerta tienden a la ley de Rajarantnan, pero por diferentes motivos, como se expone a continuación.
- Tenemos dos efectos contrapuestos, por un lado, la distribución de velocidades es muy irregular y tiende a aumentar la pérdida de energía.
- Sin embargo, existe un efecto lubricante al producido por el espesor de la capa límite que tiende a reducir la pérdida de energía, al ser el contorno del canal lo que perturba y altera el flujo, perdemos fricción con el contorno.
- En cuanto a cuál de los dos efectos es mayor:
  - Para las condiciones del aliviadero, y compuerta a 70 y 90 cm, analizando los valores no afectados teóricamente por efectos de escala, al estar el flujo desarrollado, deberían tender a Rajarantnan, pues se produce una mayor fricción.
  - En cuanto a la compuerta para flujos no desarrollados, se compensan estos dos efectos contradictorios, motivo por el cuál los resultados experimentales tienden a Rajarantnan, aunque teóricamente deberían tender a Bélanger.
- Finalmente debemos destacar, que para el caso de la compuerta, aunque los experimentos de Chanson (2005) apuntan un  $Re > 21.000$  como dato para empezar a considerar que prácticamente no hay efectos de escala, en nuestro estudio encontramos que con este  $Re$ , aún siguen habiendo efectos de escala, incluso podríamos concluir que los efectos de escala desaparecerían a partir de  $Re > 30.000$ , cifra que corresponde con los mayores  $Re$  que han sido medidos en el proyecto, aunque no disponemos de mayores  $Re$  por las condiciones del canal.

En nuestro proyecto, hemos considerado como aceptables, medidas con valores de *Reynolds*  $> 25.000$ .

Para pequeños caudales las fuerzas viscosas son muy importantes.

Para asegurarnos de que los resultados que obteníamos al pie de la compuerta eran correctos, se midieron los calados contraído aguas abajo de la compuerta para todos los resaltos al pie, además se han utilizado las gráficas de los coeficientes de contracción para

obtener a partir de la apertura de compuerta y la carga aguas arriba de ésta, estos coeficientes, que multiplicándolos por la apertura de compuerta nos darán el calado contraído teórico e incluso la distancia a la que debe ser medido  $y_1$ .

Se observa claramente que nuestros resultados experimentales caen por debajo de los teóricos sistemáticamente.

Se representan únicamente los valores con  $Re > 25.000$  para cerciorarnos de que los valores están menos afectadas por los efectos de escala.

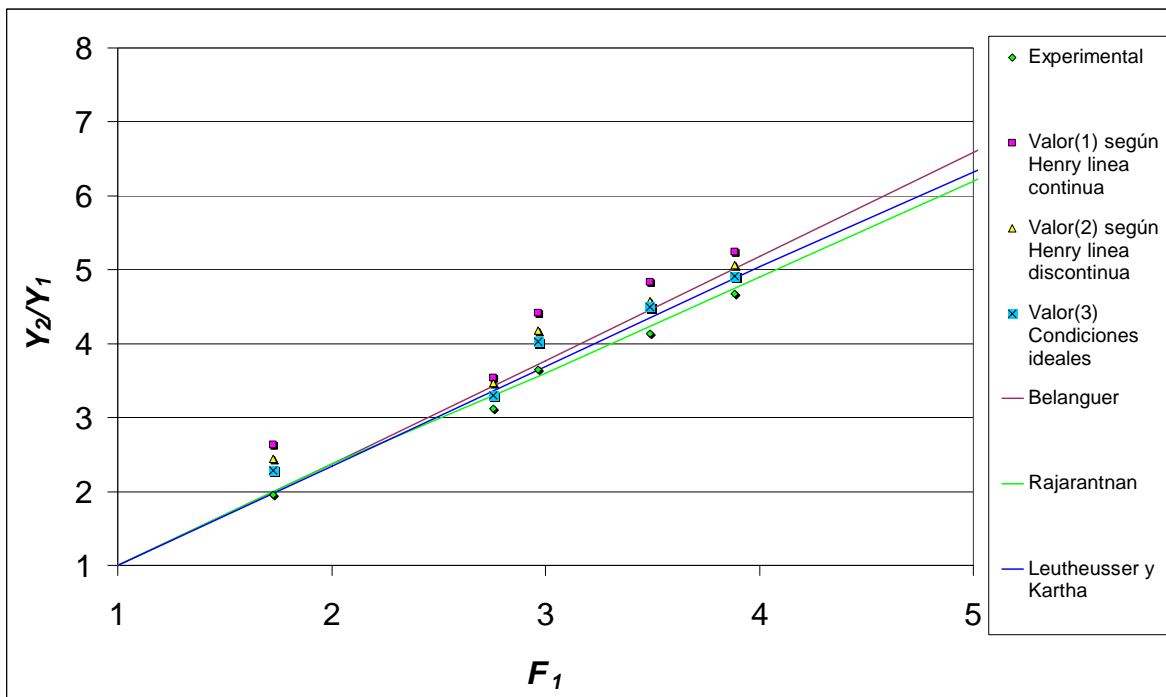


Figura 4.23. Comparación valores teóricos y reales  $\frac{y_2}{y_1}$  y  $F_1$

Para hallar estos coeficientes teóricos, hemos necesitado apoyarnos en dos gráficos distintos, en el primero de ellos, debemos utilizar las dos curvas superiores, en una de ellas consideramos los efectos de la capa límite y en la otra no, por lo tanto obtenemos dos valores teóricos a partir de la apertura y la carga aguas arriba de la compuerta ( $a/h$ ).

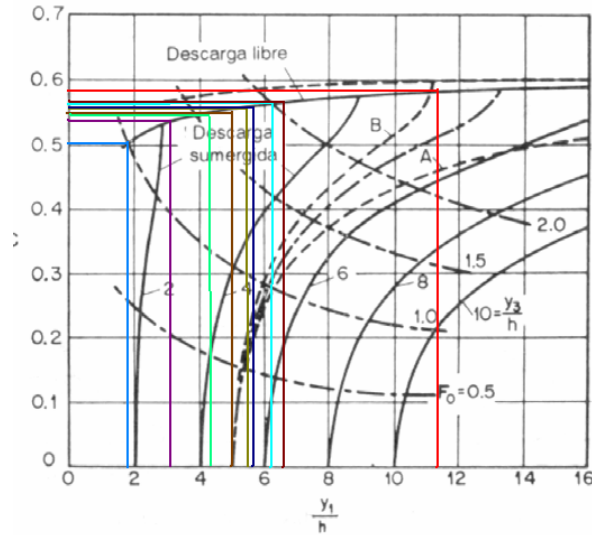


Figura 4.24 (a). Coeficientes de descarga para compuertas deslizantes verticales (según H. R. Henry).

Se muestran en la figura 4.24 (a) las curvas que representan el valor de  $C$ , que Henry determinó experimentalmente. La línea punteada A representa el resultado obtenido con base en el principio de energía; la línea punteada B se obtiene por el principio de momentum.

<i>Cd según Henry descarga libre 1</i>			
$H/a$	$Cd$	$Cc$	$y_1$ teórico
Gráfico	$Cv= 0.98$		sin capa limite
11.345	0.580	0.592	1.012
6.132	0.560	0.571	1.257
6.583	0.560	0.571	1.371
5.387	0.560	0.571	1.771
5.600	0.560	0.571	2.000
3.087	0.550	0.561	2.582
1.930	0.520	0.531	2.971
4.800	0.550	0.561	2.245
4.244	0.540	0.551	2.480

Tabla 4.1.  $y_1$  teórico 1

Siendo  $H$  la carga aguas arriba de la compuerta y  $a$  la apertura de compuerta, obtenemos a partir de la tabla 4.1 el valor de  $y_1$  teórico 1.

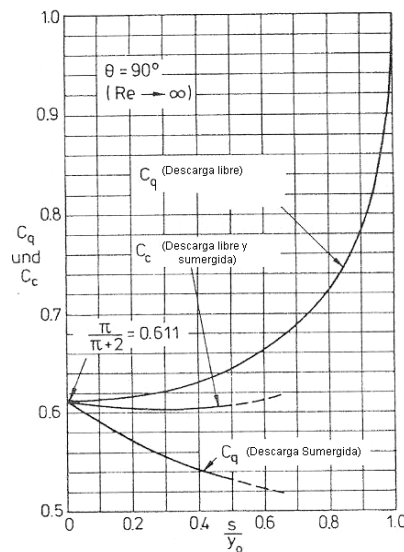
Obtendremos de la misma manera el valor teórico 2 de  $y_1$  a partir de la tabla 4.2.

<b>Cd Henry en capa límite 2</b>			
<b>H/a</b>	<b>Cd</b>	<b>Cc</b>	<b>y<sub>l</sub> teórico</b>
<b>Gráfico</b>	<b>Cv=0.98</b>		<b>capa límite</b>
11.345	0.600	0.612	1.047
6.132	0.590	0.602	1.324
6.583	0.595	0.607	1.457
5.387	0.580	0.592	1.835
5.600	0.580	0.592	2.071
3.087	0.560	0.571	2.629
1.930	0.560	0.571	3.200
4.800	0.580	0.592	2.367
4.244	0.570	0.582	2.617

**Tabla 4.2. y<sub>l</sub> teórico 2**

El tercer valor teórico ha sido obtenido a partir de la figura 4.24 (b).

Como ya hemos dicho, en la figura 4.23 se han graficado todos estos valores obtenidos con los medidos realmente.



**Figura 4.24 (b). Coeficientes de escarga y de contracción para el flujo bajo una compuerta (condiciones ideales). (Según Rouse, Engineering Hydraulics, 1950)**

Las condiciones de flujo ideal en las que se basa la figura 4.24(b) se asemejan mucho a la mayoría de los casos prácticos.

Únicamente en las investigaciones con modelos no se puede dejar de considerar, por ejemplo, el efecto del número de *Reynolds*, que se manifiesta fundamentalmente a lo largo del fondo.

$C_c$  toma un valor aproximadamente constante ( $C_c \approx 0,61$ ) para un amplio intervalo de valores de  $s/y_0$ .

En la tabla 4.3 se muestran los valores teóricos 3 de  $y_1$ , obtenidos a partir de la figura anterior.

	<b><i>Cc condiciones ideales 3</i></b>	
<b><i>a/H</i></b>	<b><i>Cc</i></b>	<b><i>y<sub>1</sub> teórico</i></b>
<b><i>Gráfico</i></b>		<b><i>cm</i></b>
0.088	0.612	1.047
0.163	0.610	1.342
0.152	0.609	1.462
0.186	0.608	1.885
0.179	0.609	2.132
0.324	0.602	2.769
0.518	0.613	3.433
0.208	0.603	2.412
0.236	0.603	2.714

**Tabla 4.3.  $y_1$  teórico 3**

En la tabla 4.4, se muestran la apertura de compuerta, (ha sido la variable que hemos tenido que modificar para estudiar distintos *Froude*), la distancia a la compuerta en la que se ha medido el calado  $y_1$ , calculada como  $a/C_c$  y y finalmente el dato experimental medido.



<b>Apertura</b>	<b>Distancia</b>	<b><math>y_1</math></b>
<b><i>a</i> (cm)</b>	<b><i>a</i> a la compuerta</b>	<b>cm</b>
1.710	2.850	1.05
2.200	3.667	1.43
2.400	4.000	1.54
3.100	5.167	2.01
3.500	5.833	2.24
4.600	7.667	2.93
5.600	9.333	4.00
4.000	6.667	2.62
4.500	7.500	3.00

**Tabla 4.4.  $y_1$  experimental**

Finalmente podemos afirmar, que los resultados teóricos que mejor se ajustan a los obtenidos experimentalmente son los “teóricos 3”, estando los valores “teóricos 2” más cerca que los “teóricos 1”, pero aún lejos de los experimentales.

Ésto es debido probablemente a que en los “Teóricos 1 y 2” no se tienen en cuenta las pérdidas de energía.



#### 4.4. Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos

Aplicando la ecuación de la energía del flujo medio para la zona de resalto ( $0 \leq x \leq L_j$ ), se obtiene la ecuación (20). En este caso, los términos de tensión viscosa media y los efectos de la tensión de *Reynolds* en la superficie de control no se tienen en cuenta:

$$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \lambda_1 y_1 = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \lambda_2 y_2 + \left[ -\frac{1}{\gamma} \frac{1}{q} \int_{(D)} \{ \rho(\overline{u'^2} - \overline{v'^2}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \overline{\rho u'v'} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \} dw \right] \quad (20)$$

donde:

$\alpha$  es el coeficiente de energía o de Coriolis

$dw (= dA \cdot dS)$  es el volumen elemental infinitesimal

$$\lambda = 1 + (1/Qh) \int_{(A)} (\Delta p / \gamma) u dA$$

En las secciones  $x=0$  y  $x=L_j$ , es posible poner  $\alpha = 1$  y  $\lambda = 1$ .

De acuerdo con esto, la ecuación (20) puede ser expresada como la ecuación (21):

$$\frac{v_1^2}{2g} + y_1 = \frac{v_2^2}{2g} + y_2 + \left[ -\frac{1}{\gamma} \frac{1}{q} \int_0^{L_j} \int_0^{y(x)} \{ \rho(\overline{u'^2} - \overline{v'^2}) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \overline{\rho u'v'} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \} dy dx \right] \quad (21)$$

Si la ecuación de energía para la turbulencia es aplicada a los resaltos, se obtiene la ecuación (22).

En este caso, los términos de tensión viscosa media, la difusión de energía turbulenta los efectos de las fluctuaciones de presión y las tensiones viscosas causadas por la turbulencia en la superficie de control no se tienen en cuenta comparados con otros factores:

$$Prod. Turb. = Disip. Vis. + Convecc. Turb. \quad (22)$$

donde:

$Prod. Turb.$  = [tercer término en el lado de la derecha de la ecuación (18)] = Cantidad total de energía transferida desde el flujo medio a la energía turbulenta (producción turbulenta).

$Disip. Vis.$  = Disipación viscosa

*Convecc.Turb.*= Convección de energía turbulenta (relación en que la energía cinética turbulenta es transmitida)

$$Disip.Vis. = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{q} \int_0^{L_j} \int_0^{y(x)} \mu \overline{\left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} dy dx$$

$$Convecc.Turb. = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{q} \int_0^{y_2} \rho \frac{\overline{V'^2}}{2} u dy$$

donde  $V'^2 = u'^2 + v'^2 + w'^2$

De la ecuación (21) y la ecuación (22), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$H_1 = H_2 + (Disip.Vis. + Convecc.Turb.) \quad (23)$$

donde:

$$H_1 = \frac{v_1^2}{2g} + y_1$$

$$H_2 = \frac{v_2^2}{2g} + y_2$$

Sin embargo, la ecuación (23) puede ser rescrita en la forma de la ecuación (24):

$$100(\%) = \left( \frac{Disip.Vis.}{(H_1 - H_2)} + \frac{Ind.Turb.}{(H_1 - H_2)} \right) 100(\%) \quad (24)$$

Cuando  $x \leq L_j$ , la mayoría de la turbulencia se ha disipado por disipación viscosa (fenómeno de disipación de energía en cascada).

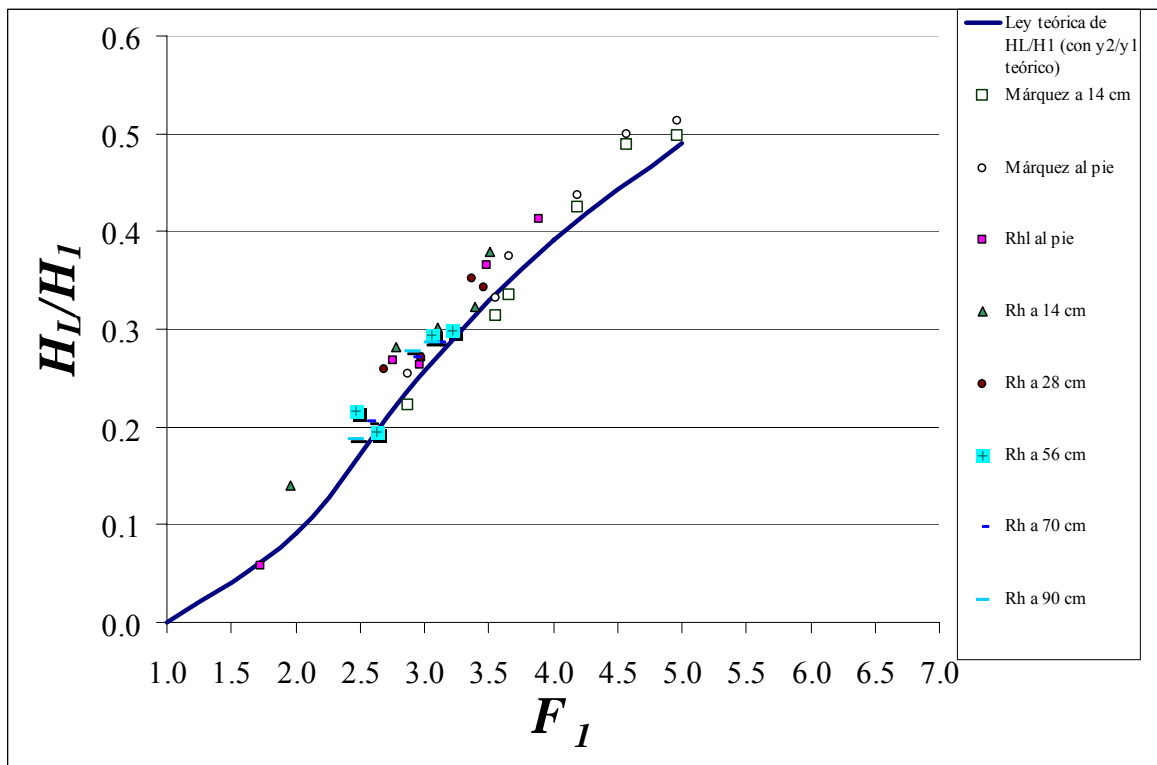
De acuerdo con esto,  $L_j$  puede ser interpretado como la longitud de la zona necesaria para que la disipación de energía en el resalto se complete, y la pérdida de energía  $H_L$  entre el inicio ( $x=0$ ) y el final ( $x=L_j$ ) del resalto puede ser expresada mediante la siguiente ecuación unidimensional:

$$H_L = H_1 - H_2 = (v_1^2 / 2g + y_1) - (v_2^2 / 2g + y_2) \quad (25)$$

Usando la ecuación (25) junto con la ecuación de continuidad, la pérdida de energía relativa puede ser expresada con la ecuación (26):

$$\frac{H_L}{H_1} = \frac{2(1 - \frac{y_2}{y_1}) + (1 - \frac{1}{(\frac{y_2}{y_1})^2})F_1^2}{2 + F_1^2} \quad (26)$$

Analizando la ecuación (23) y la ecuación (15), la relación entre  $H_L/H_1$  y  $F_1$  se representa en la figura 4.25 (a):



**Figura 4.25 (a). Pérdida de energía relativa en resaltos libres**

Analizando la representación de la pérdida de energía relativa en los seis resaltos libres estudiados, en función de los valores de *Froude* considerados, y la relación correspondiente  $y_2/y_1$  según la ecuación (16) (Ecuación de Bélanger de los calados conjugados), junto con la ley teórica propuesta según la ecuación (26), se observa que el resultado de la comparación entre los valores teóricos y los experimentales es satisfactorio, también se recogen los resultados de las mediciones de Márquez (2006).

Aún teniendo en cuenta que para algunos valores, los resultados experimentales se desvían algo más de los teóricos correspondientes.

Es importante tener en cuenta que para el resalto libre formado al pie de la compuerta (R.L.0) ,a 14 cm de la compuerta (R.L.14), a 28 cm (R.L.28) y a 56 cm (R.L.56), considerados no desarrollados, existe una pérdida de energía mayor, que para los resaltos medidos a 70 y 90 cm, considerados desarrollados constituyendo parte de esta diferencia de energía relativa, la pérdida de energía relativa que se produce a través de la curva de remanso  $H_3$  parcialmente desarrollada.

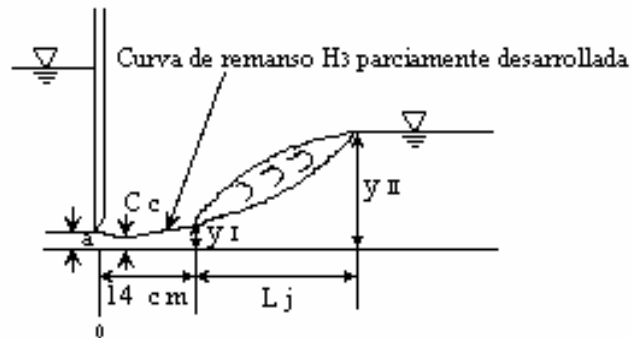


Fig. 25 (b). Esquema del resalto libre estabilizado a 14 cm de la compuerta

Otra manera de evaluar la disipación de energía en resaltos libres es utilizando la expresión clásica siguiente:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (27)$$

En la Tabla 4.5 se indica el porcentaje de disipación de energía teórico en el rango de números de *Froude* considerados:

<b>Resultados Teóricos</b>		
$F_1$	$H_2/H_1$	<b>Porcentaje de disipación de energía en velocidades teóricas medias</b>
2,50	0,82	17,52
3,00	0,74	25,67
3,50	0,67	32,90
4,00	0,61	39,14
4,50	0,56	44,48
5,00	0,51	49,06
5,50	0,47	53,00

**Tabla 4.5. Resultados teóricos**

Para tratar los resultados experimentales obtenidos en laboratorio se ha calculado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos considerando las velocidades medias.

Se ha utilizando la siguiente expresión para calcular la disipación de energía:

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right) \times 100 \quad (28)$$

para el caso de los resaltos libres, donde :

$$H_1 = (v_1^2 / 2g + y_1) \quad \text{y} \quad H_2 = (v_2^2 / 2g + y_2) \quad (29)$$

En la figura 4.26 se presentan los valores medidos de disipación de energía, junto con los de Márquez (2006), como podemos observar, los resultados experimentales son mayores que los teóricos, aunque estos aún no han sido clasificados según *Reynolds* y flujo desarrollado o no desarrollado.

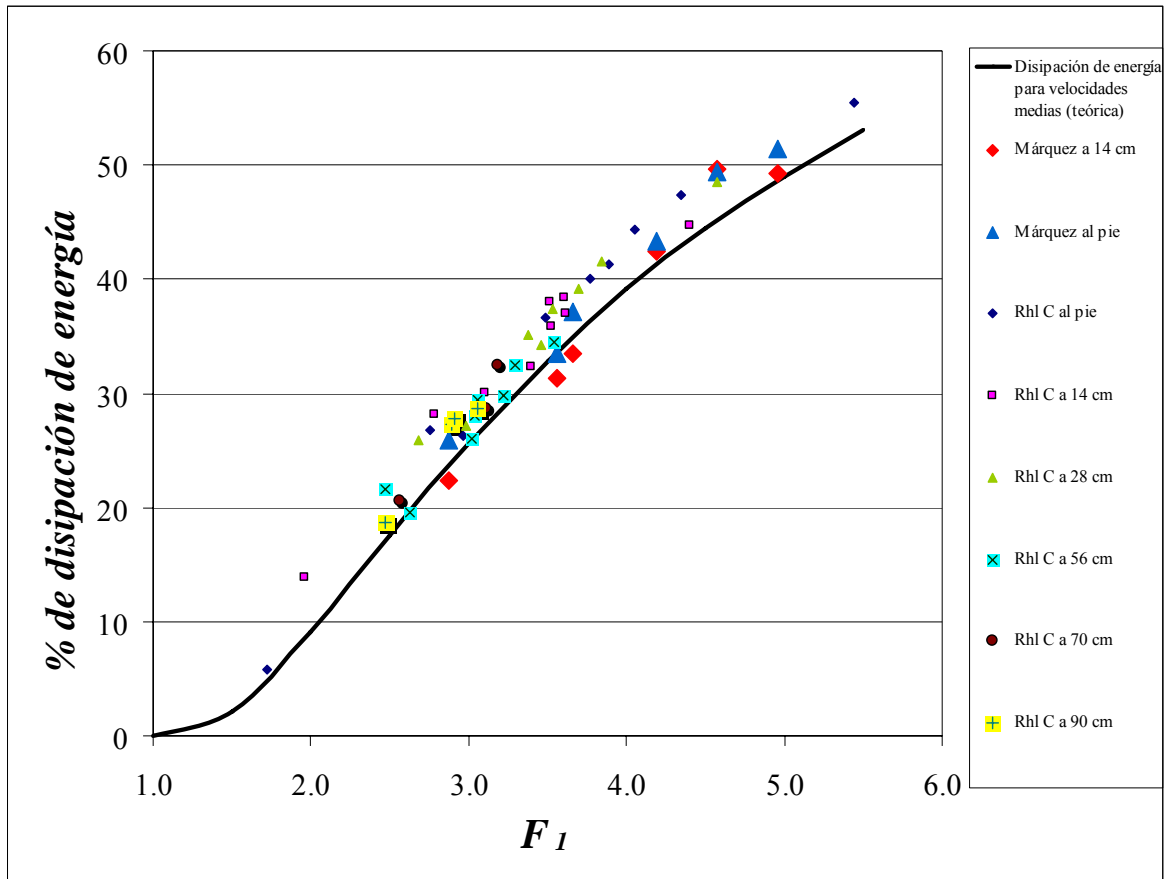
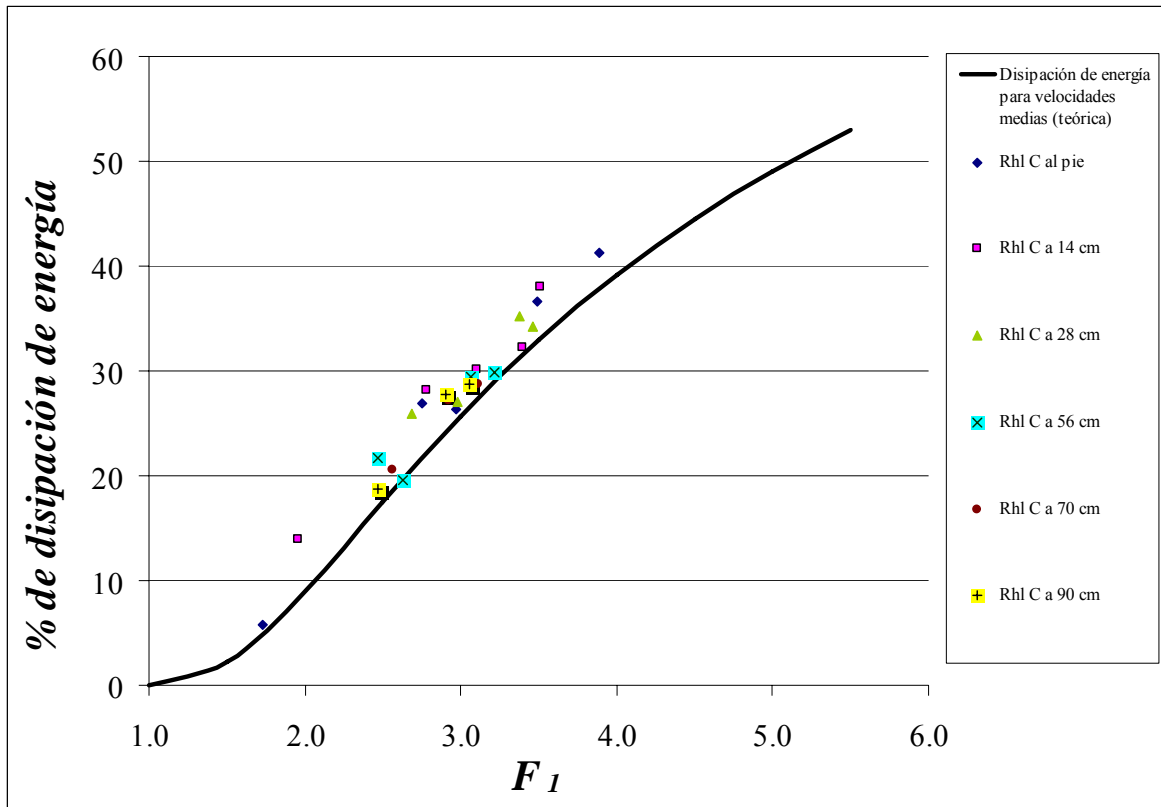


Figura 4.26. Disipación de energía para velocidades medias

En la figura 4.27 se clasifican los datos según su número de *Reynolds*, se graficarán sólo los *Reynolds* mayores de 25.000, los cuáles se suponen menos afectados por los efectos de escala.





**Figura 4.27. Disipación de energía para velocidades medias,  $Re > 25000$**

En la figura 4.28, se presentan los resultados, para  $Reynolds > 25.000$ , y valores para los flujos no desarrollados (hasta 56 cm) se ha dibujado la ley teórica que mejor se ajusta a estos valores.

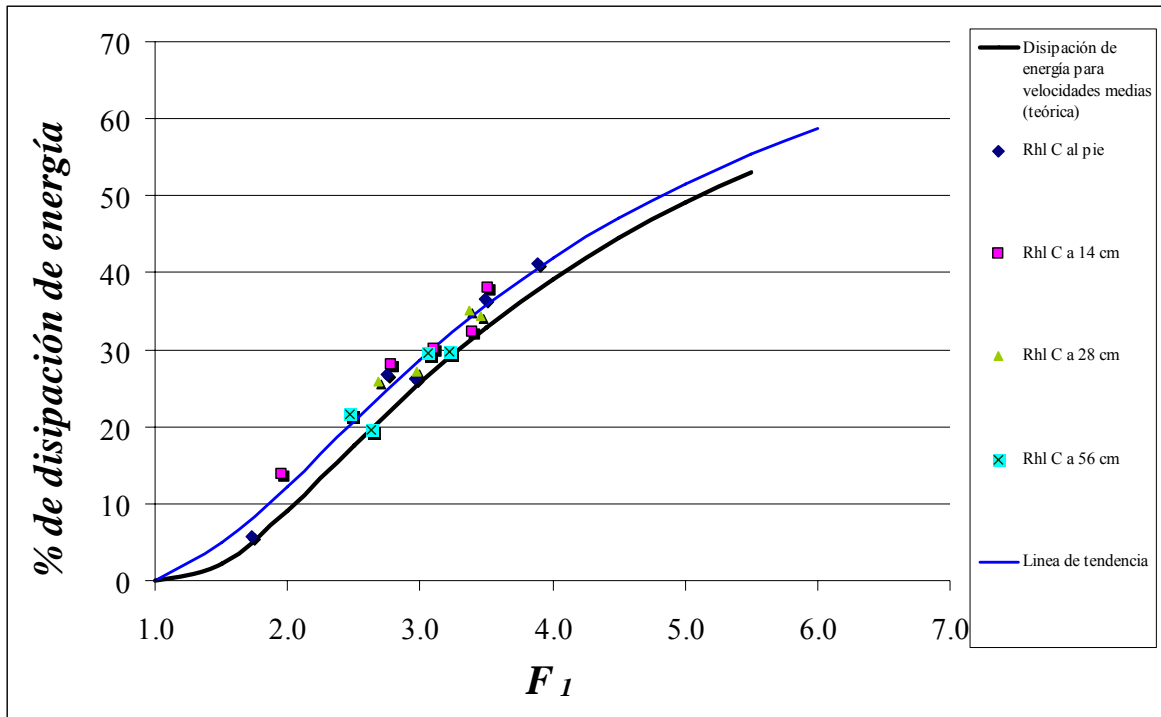
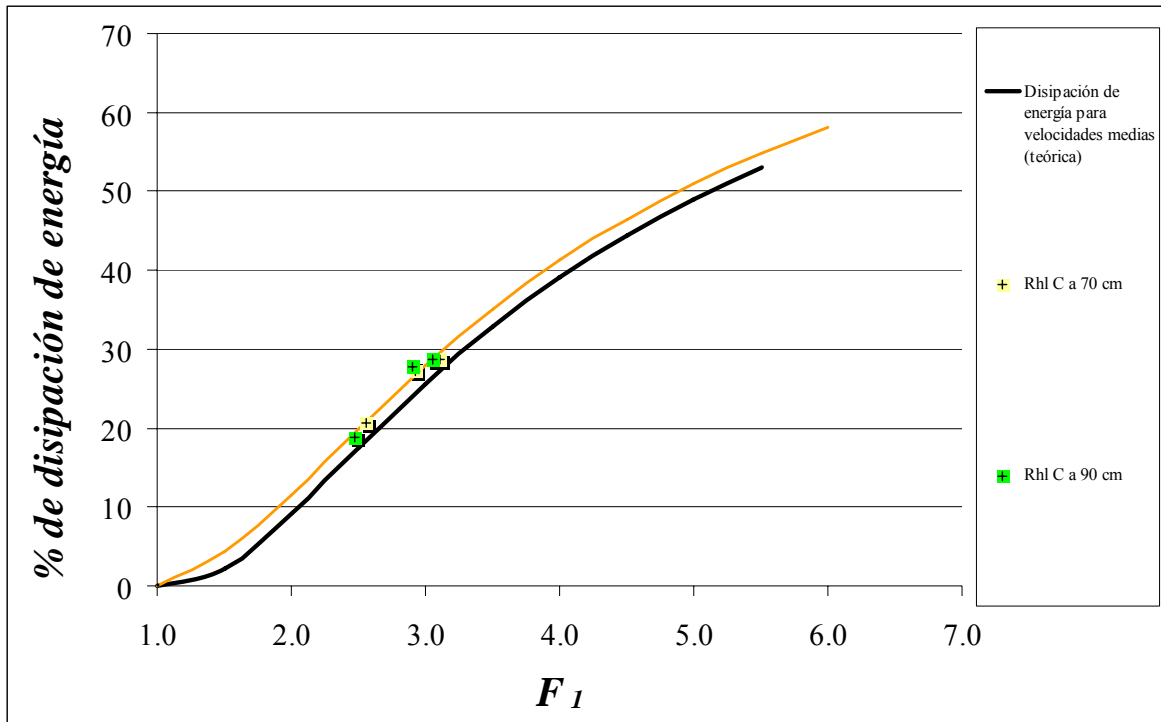


Figura 4.28. Disipación de energía para velocidades medias,  $Re > 25000$ , flujos no desarrollados

Se ha realizado también un ajuste para los valores de flujo desarrollado, con desplazamientos de 70 y 90 cm, que como se puede observar en la figura 4.29, son ligeramente inferiores a los valores correspondientes a flujo no desarrollado, como ya hemos dicho, esto es debido a que la energía potencial disponible al comienzo del resalto para estos resaltos, es menor que la energía potencial disponible para resaltos en flujo no desarrollado.



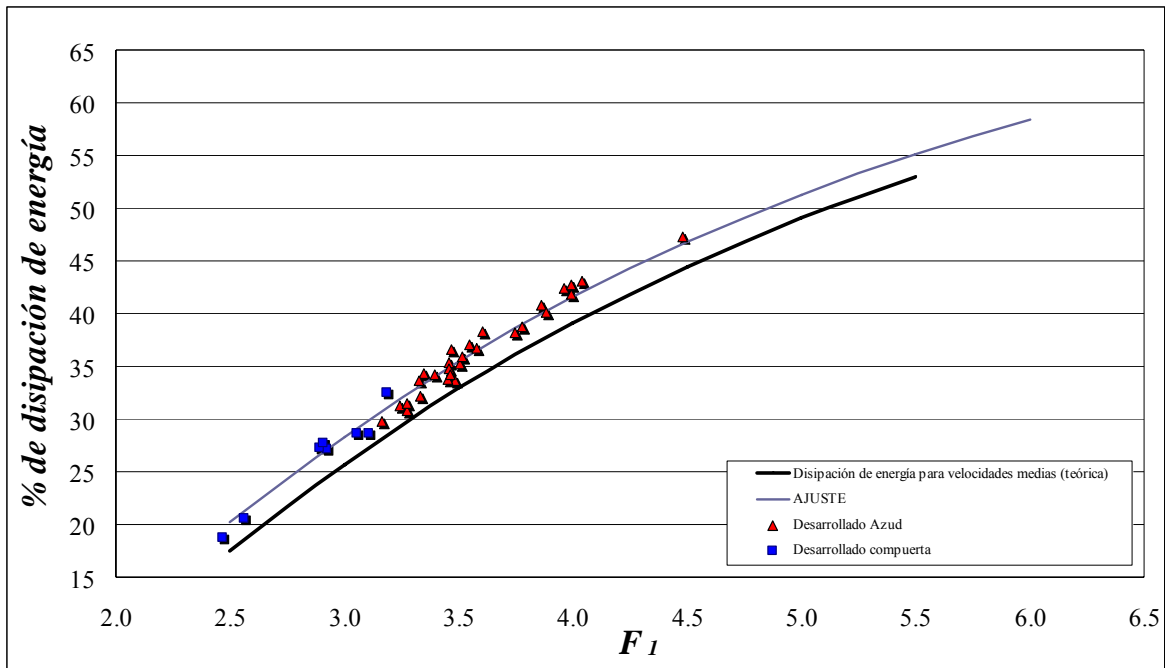
**Figura 4.29. Disipación de energía para velocidades medias,  $Re > 25000$ , flujos desarrollados**

Estos resultados para flujos desarrollados y con  $Reynolds > 25.000$ , han sido comparados con las configuraciones similares para el azud, una visualización de los resultados nos permitirá una rápida comprensión en la figura 4.30.

Podemos comprobar que los valores son totalmente concordantes, algo coherente con nuestro criterio de que a 70 y 90 cm ya obtenemos flujos desarrollados.

Se propone también un ajuste teórico para estos valores, y una vez más, podemos comprobar que en el azud, el flujo se desarrolla con unos desplazamientos relativos de resalto muy inferiores.

Sin embargo, el desplazamiento en función del calado contraído al pie del azud, también resultó de unas 30 veces dicho valor.



**Figura 4.30. Disipación de energía para velocidades medias, flujos desarrollados Azud y Compuerta**

Se concluye que los resultados son totalmente coherentes, encajan a la perfección los valores de disipación de energía, hemos incluido la ley teórica que representan estos valores, por lo que concluimos que hemos logrado configuraciones de resaltos similares.

Por último se ha evaluado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos debida únicamente a la reducción de velocidades máximas entre la sección inicial del resalto ( $x=0$ ) y la sección final del mismo donde  $x=L_j$ . Se ha utilizado la siguiente expresión :

$$\% \text{ reducción de velocidad máxima experimental} = \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) \times 100 \quad (30)$$

Los resultados para los seis resaltos, afectados por efectos de escala, se muestran en la figura 4.31, a continuación de éstos, se muestran en la figura 4.32 los resultados anteriores cuyos  $Re$  fueran mayores de 25.000.

Como podemos observar, ambas gráficas muestran que los resultados se agrupan de forma satisfactoria, y mantienen una buena relación.

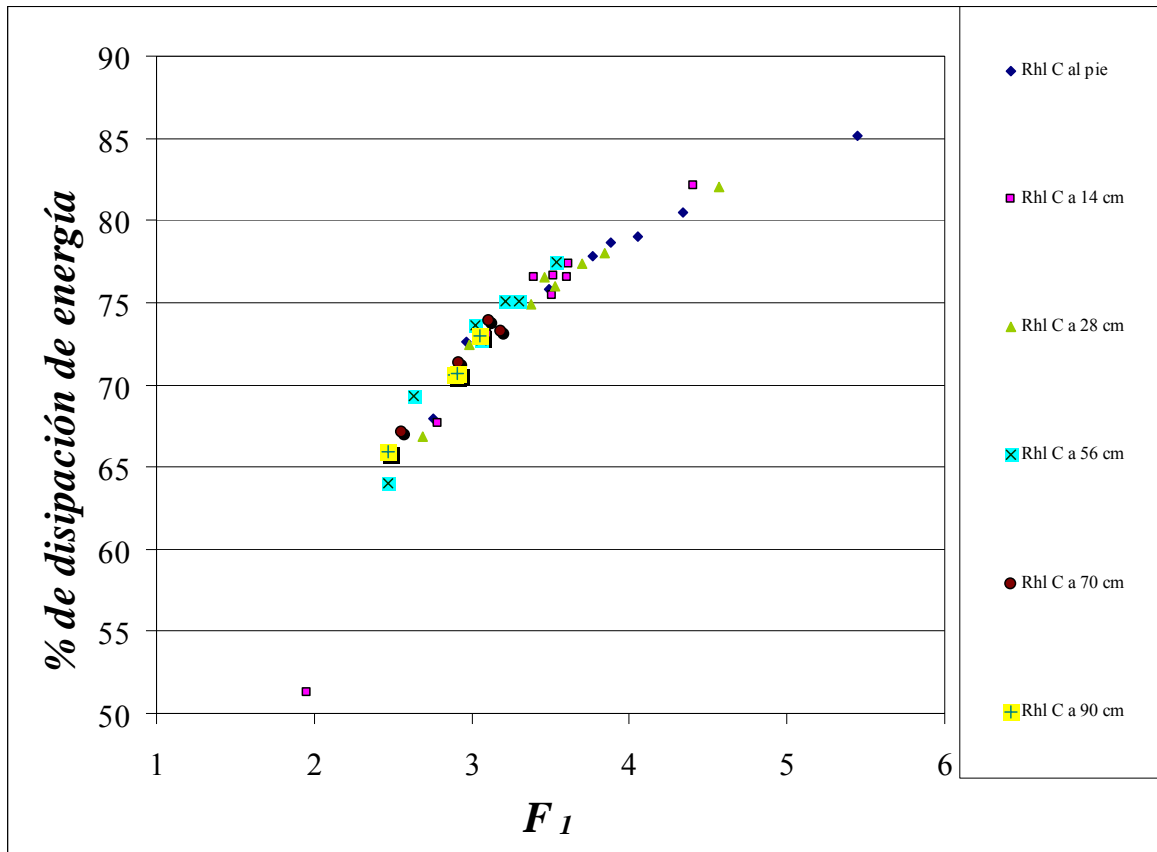


Figura 4.31. Disipación de energía debido únicamente a la reducción de velocidades máximas

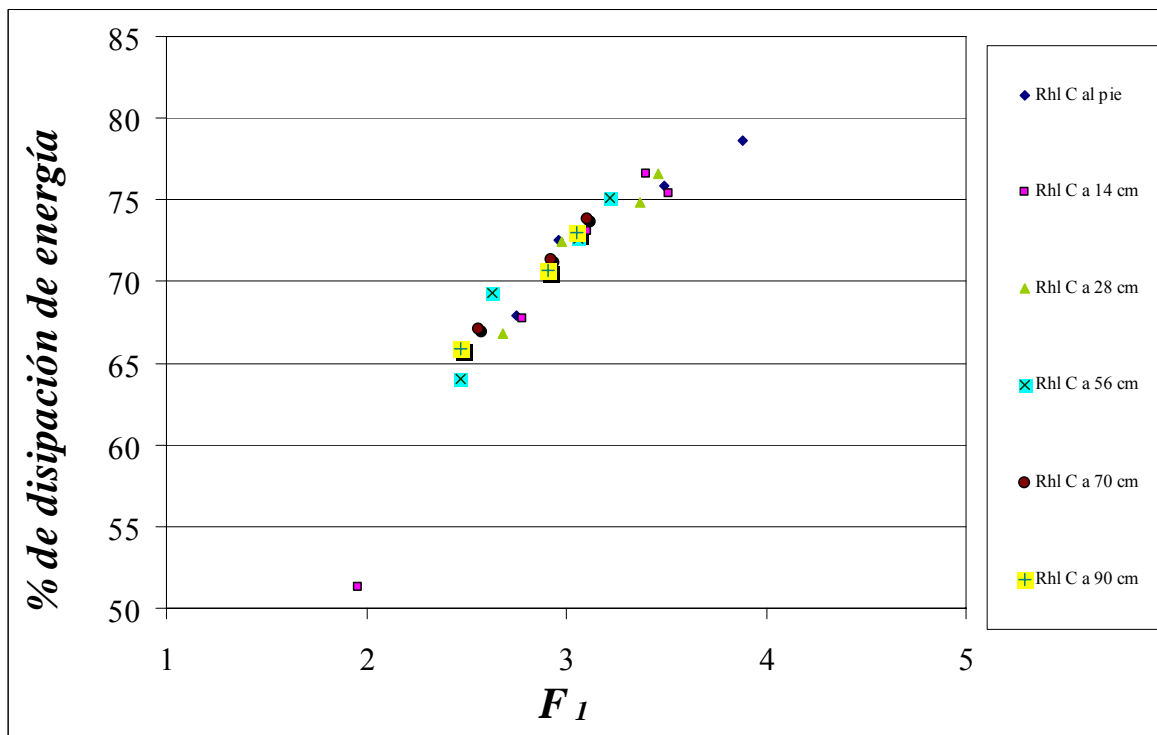


Figura 4.32. Disipación de energía debido únicamente a la reducción de velocidades máximas,  $Re > 25.000$

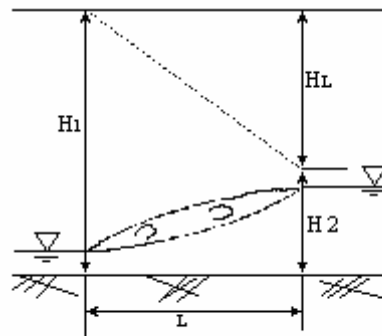


#### 4.5. Longitud del resalto hidráulico

Con respecto a la longitud del resalto hidráulico, muchos datos experimentales han sido analizados sin ninguna base teórica. Se ha intentado incluso analizar los datos considerando el significado físico.

Si la longitud del resalto  $L$  es interpretada como la longitud de la zona requerida para disipar la energía en el resalto, entonces  $L$  debería ser función de la energía específica  $H_*$  al comienzo del resalto y de la energía perdida  $H_L$  en el resalto (Figura 4.33), implicando la siguiente relación:

$$f(L/H_L, H_L/H_*) = 0 \quad (31)$$



(a) Resalto libre

Figura 4.33. Relación entre  $L$  y  $H_L$

En el caso del resalto libre, la relación (31) puede ser expresada como:

$$f(L_j/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad (32)$$

siendo  $L_j$ : longitud del resalto libre

También,  $L_{rj}$ : longitud del rulo y  $L_t$ : longitud total, se asumen como proporcionales a  $L_j$ :

$$L_{rj} \propto L_j \propto L_t \quad (33)$$

De las relaciones (32) y (33), se derivan las relaciones (34) y (35):

$$f(L_{rj}/H_L, H_L/H_1) = 0 \quad (34)$$

$$f(L_t / H_L, H_L / H_1) = 0 \quad (35)$$

De acuerdo con datos experimentales y con las relaciones (33), (34) y (35), se aprecian claras correlaciones que se indican en la figura 4.34 donde se representan las siguientes ecuaciones:

$$\log_{10} \frac{L_{rj}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,40; \quad \text{para } (2,3 \leq F_l \leq 9,5) \quad (36)$$

$$\log_{10} \frac{L_j}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,58; \quad \text{para } (2,3 \leq F_l \leq 9,5) \text{ y } (0,14 \leq H_l/H_1 \leq 0,71) \quad (37)$$

$$\log_{10} \frac{L_t}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,72; \quad \text{para } (2,3 \leq F_l \leq 9,5) \quad (38)$$

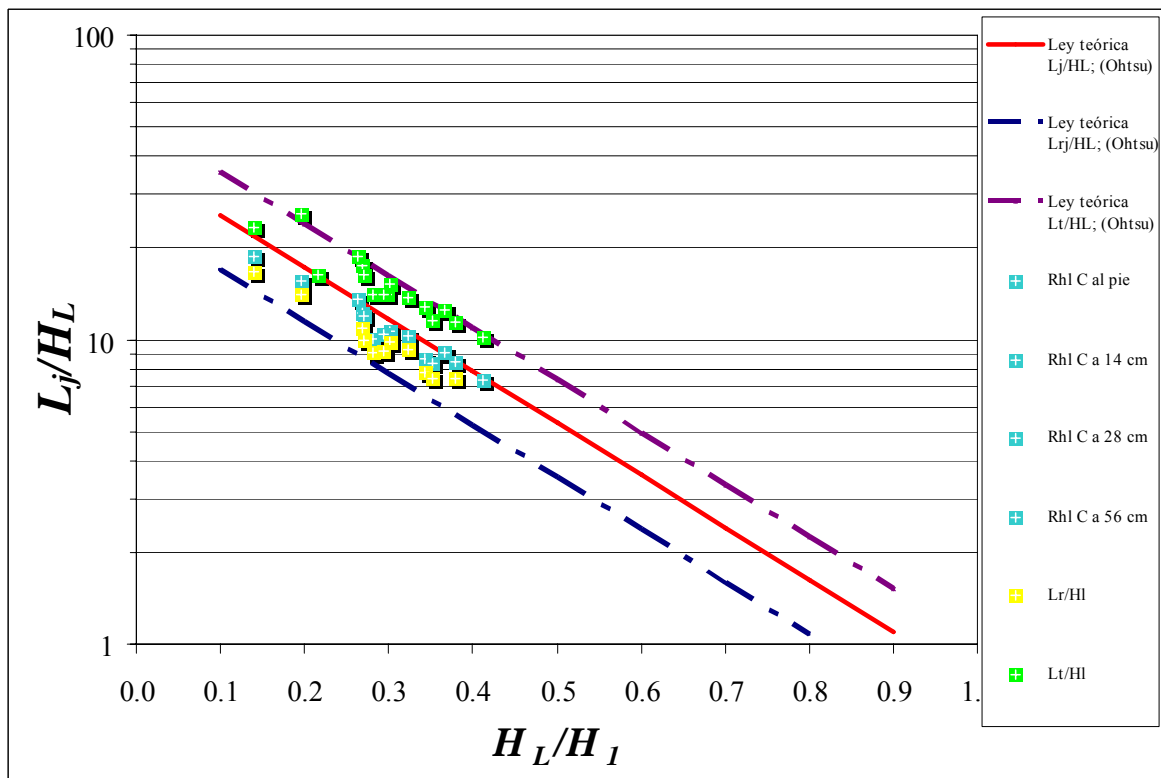
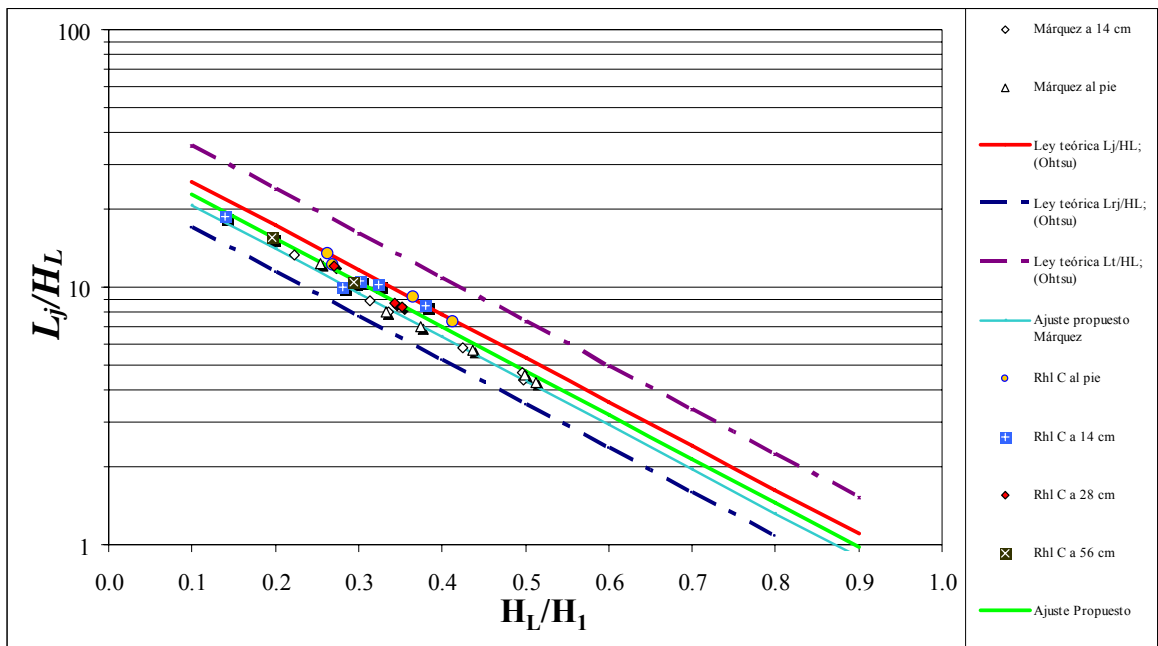


Figura 4.34. Relación entre  $L_r/H_l$ ,  $L_t/H_l$ ,  $L_j/H_L$ , y  $H_l/H_1$

Respecto a los resultados que muestra la figura 4.34, además de las leyes teóricas se han representado nuestros datos, tanto los  $L_r$ ,  $L_t$  y  $L_j$ , sin hacer clasificación respecto al número de Reynolds.



En la figura 4.35, se presentan los valores únicamente de  $L_j$ , descartando aquellos con un número de *Reynolds* menor de 25000.



**Figura 4. 35. Relación entre  $L_j/H_L$  y  $H_L/H_1$**

A partir de la figura 4.35 se puede hacer la siguiente interpretación: la pérdida de energía relativa más grande  $H_L/H_1$  se da cuando el remolino superficial y las fluctuaciones de la velocidad turbulenta son mayores; así, cuando el gradiente de la línea de energía  $H_L/L_j$  es mayor, entonces  $L_j/H_L$  será menor.

Como contraste, la relación  $H_L/H_1$  más pequeña se corresponde con un remolino superficial y unas fluctuaciones de la velocidad turbulenta menores; así,  $H_L/L_j$  es menor mientras  $L_j/H_L$  es mayor.

Comparando las leyes teóricas propuestas por Ohtsu et al. (1990) con los resultados experimentales se observa que los datos experimentales para los resaltos siguen la misma tendencia y pendiente que las teóricas, pero con un matiz: los valores que se han considerado en la gráfica para ambos resaltos ensayados se corresponden con medidas de longitud de resalto  $L_{jc}$  y éstos se encuentran entre la ley teórica para la longitud de resalto  $L_j$  y la ley teórica para la longitud del rulo  $L_{rj}$ , lo que nos indica que el criterio de longitud  $L_{jc}$  considerado en nuestros ensayos se encuentra entre los valores de  $L_j$  y  $L_{rj}$ , cumpliendo el criterio establecido.

Se han representado en esta última gráfica, el ajuste experimental propuesto por Márquez (2006), y el propuesto en el actual proyecto, al igual que antes, se han analizado y descartado si procedía los valores anómalos:

Márquez(2006) :

$$\log_{10} \frac{L_{jc}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,49; \quad \text{para } (2,87 \leq F_l \leq 4,96) \quad (39)$$

Propuesta de ajuste en este proyecto :

$$\log_{10} \frac{L_{jc}}{H_L} = -1,71 \frac{H_L}{H_1} + 1,53; \quad \text{para } (1,96 \leq F_l \leq 5,45) \quad (40)$$

Cómo se puede observar, las rectas obtenidas son prácticamente similares.

Se puede obtener una descripción satisfactoria usando la siguiente relación:

$$L_j / H_L = f(F_l) \quad (41)$$

Se presenta a continuación los  $L_j/H_l$ ,  $L_r/H_l$  y  $L_t/H_l$  con respecto a  $F_l$ , aplicaremos el mismo criterio de cribado de graficar los puntos con *Reynolds* mayores de 25.000, los  $L_t/H_l$  proporcionan unos valores superiores a los  $L_j/H_l$  y éstos a los  $L_r/H_l$ , algo totalmente concordante con los criterios de medición establecidos para el proyecto.

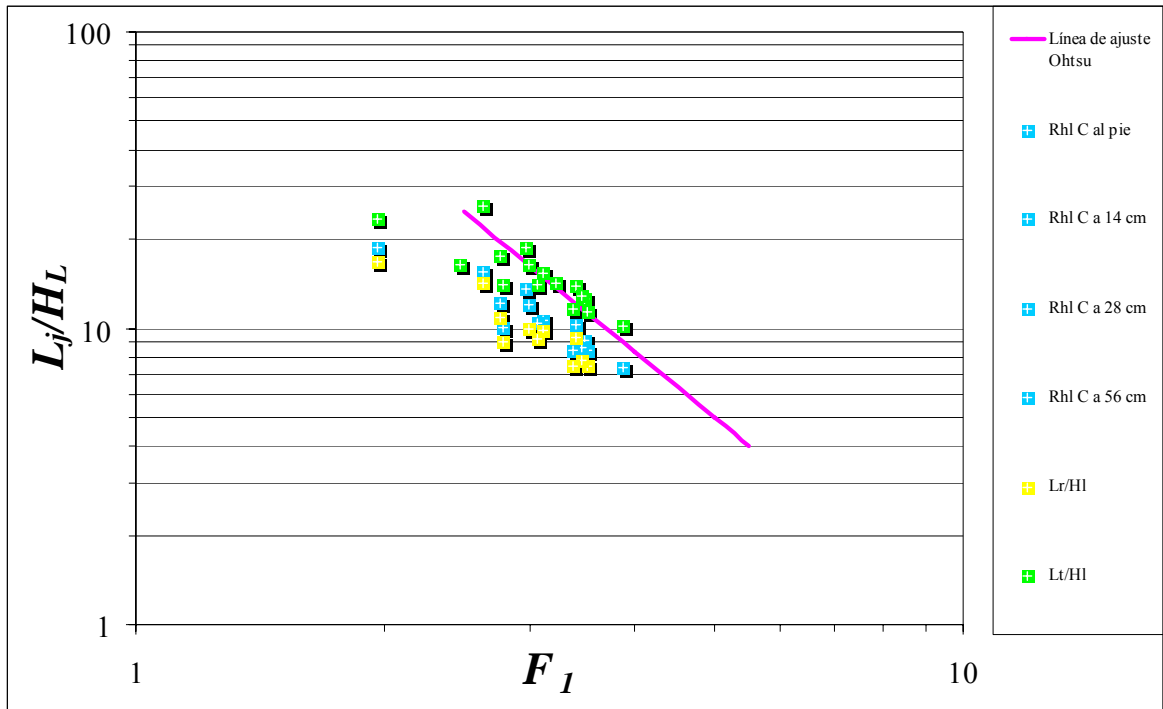


Figura 4.36. Relación:  $L_t/H_L$ ,  $L_r/H_L$  y  $L_j/H_L = f(F_1)$

En la figura 4.37, presentaremos sólo los valores correspondientes a los  $L_j$ , realizando el mismo cribado, los *Reynolds* han de ser mayores de 25.000.

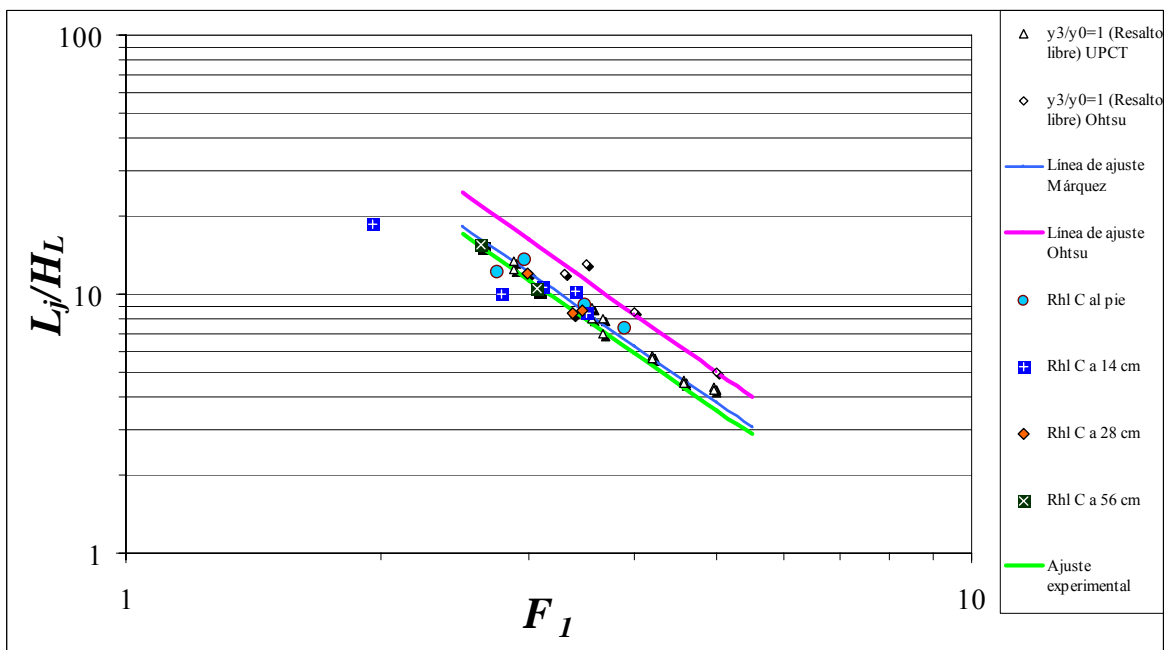


Figura 4.37. Relación:  $L_j / H_L = f(F_1)$

Se ha añadido una ley de ajuste para los resultados experimentales obtenidos en nuestros resaltos comparándolas con la de Márquez (2006) y Ohtsu et. al. (1990).

Márquez (2006) :

$$L_{jc} / H_L = 145,4(F_1)^{-2,264} \quad (42)$$

Ajuste propuesto en el actual proyecto :

$$L_{jc} / H_L = 135,4(F_1)^{-2,26} \quad (43)$$

De igual forma se ha obtenido otra ley de ajuste para los resultados experimentales obtenidos por Ohtsu (ecuación (44)):

$$L_j / H_L = 202,305(F_1)^{-2,299} \quad (44)$$

Como se ve en la figura anterior los valores de  $L_j/H_L$  obtenidos por Ohtsu et al. (1990) son algo mayores que los obtenidos en nuestros experimentos pero ambas leyes de ajuste siguen una misma tendencia.

En la figura 4.38 se presentan todas las longitudes, y en la figura 4.39 sólo los  $L_j/H_L$  análogamente a como hemos realizado previamente en nuestro estudio.

Ha sido realizado el cribado y sólo aparecen los valores con un mayor número de *Reynolds*.

En la figura 4.39 podemos representar también la misma curva que hemos obtenido anteriormente en la figura 4.37, con lo cual comprobamos que hemos realizado un buen ajuste.

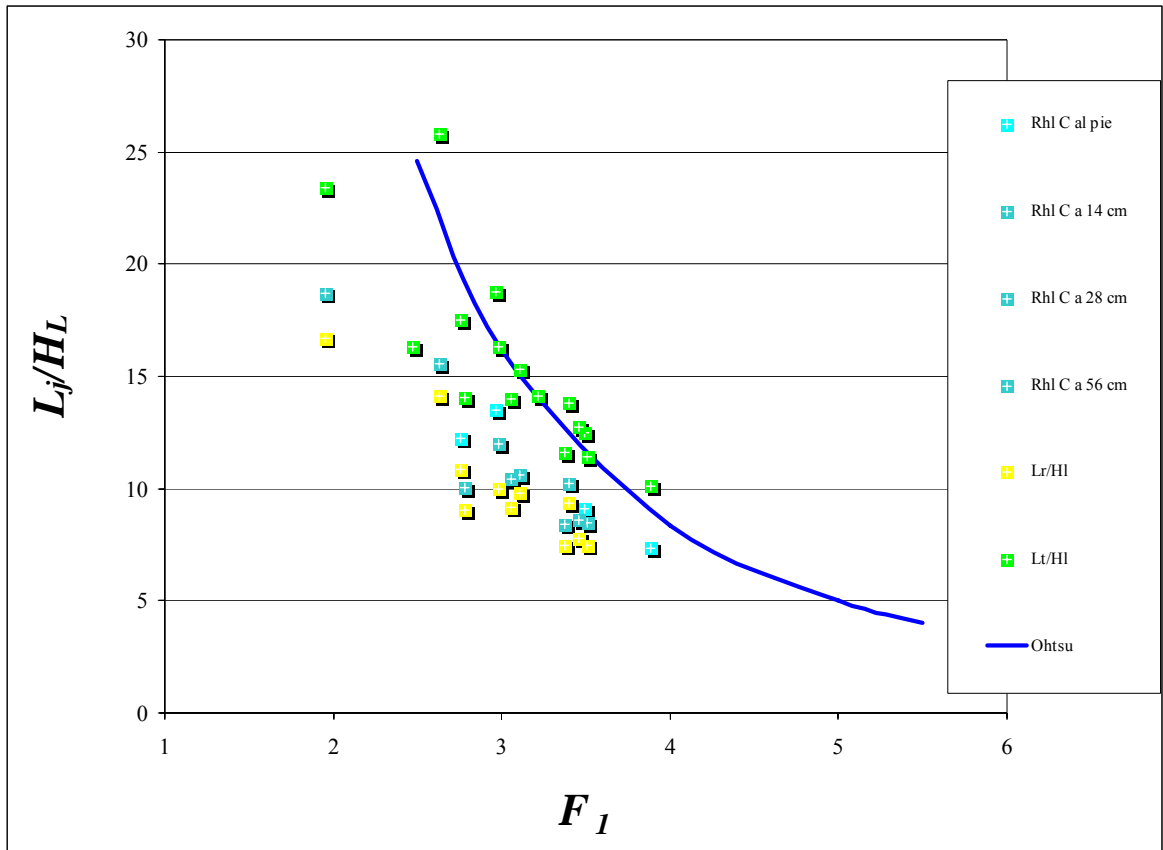


Figura 4.38. Relación:  $L_r/H_b$ ,  $L_r/H_1$  y  $L_j/H_1 = f(F_1)$

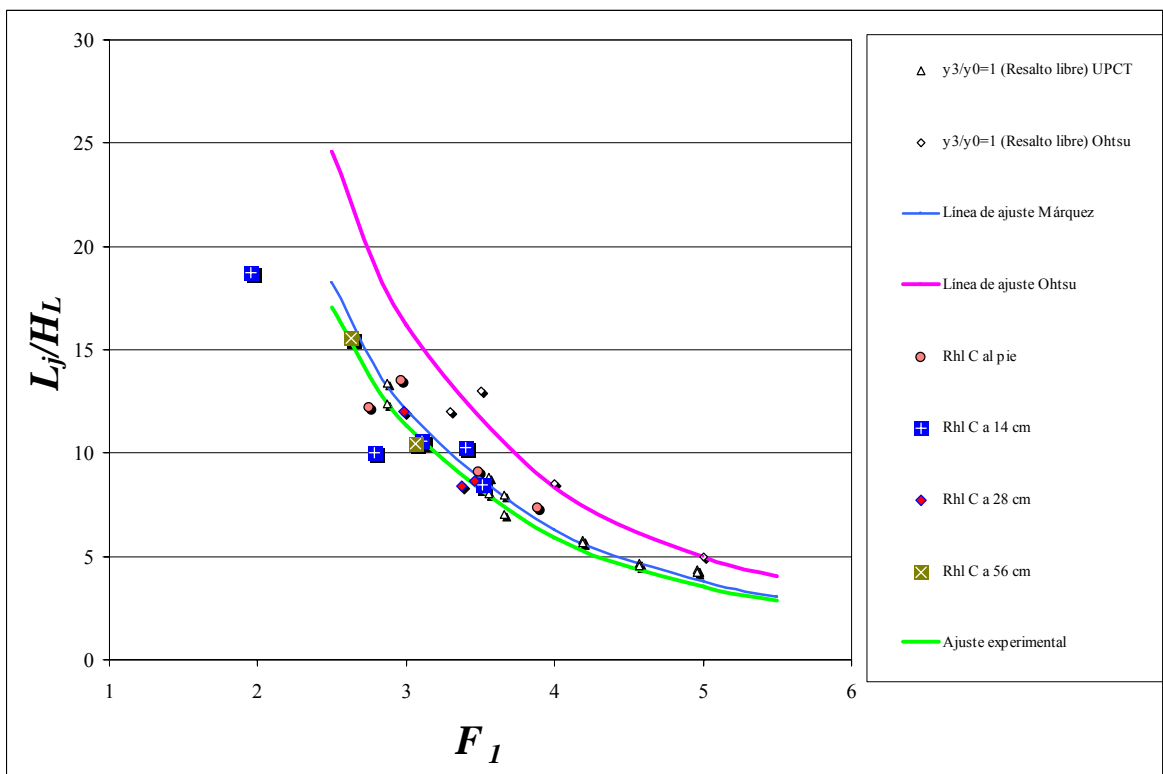


Figura 4.39. Relación:  $L_j / H_L = f(F_1)$



## 4.6. Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos

### 4.6.1. Distribución de velocidades.

Desde el punto de vista del diseño de disipadores de energía hidráulica, es importante conocer que el campo de velocidad en el resalto cambia con  $F_1$  y las condiciones para el desarrollo de la capa límite, al comienzo del resalto libre.

Una investigación del campo de velocidades en el resalto ha sido llevada a cabo por Rajaratnam (1965), quien trató el resalto libre como chorro de pared, pero los cambios en las características de la velocidad dependientes de  $F_1$  no han sido totalmente descritos.

Considerando el hecho de que el resalto hidráulico es un fenómeno que implica un remolino superficial, se puede considerar el resalto como chorro de pared, sin tener en cuenta el efecto de la superficie libre.

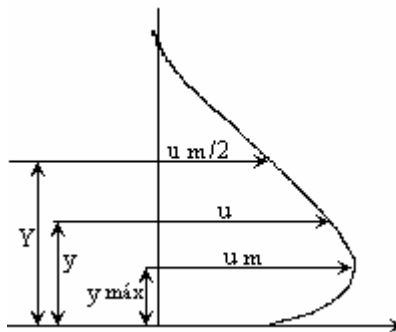
Considerando el efecto que el desarrollo de la capa límite en flujo supercrítico tiene en las condiciones del flujo del resalto, una investigación experimental fue llevada a cabo por Leutheusser y Kartha (1972), y por Wilson y Turner (1972).

Sin embargo, la precisión de los instrumentos de medida debido a los pequeños valores medidos de los calados contraídos podrían haber perturbado en algún grado las medidas.

Este proyecto conjunto, corresponde a una continuación del que ya empezó Márquez (2006), por lo tanto al igual que hemos hecho en apartados anteriores, compararemos resultados.

A continuación se investigan los cambios en las características de la velocidad de los resaltos en relación a  $F_1$ .

Examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, se encuentra una distribución semejante de velocidades independiente de  $F_1$  y  $x$  dentro del rango  $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$  (Figuras 4.40 y 4.41), donde la longitud escalar  $Y$  es la distancia perpendicular a la solera, en la que la velocidad  $\bar{u}$  es la mitad de la velocidad máxima  $u_m$  y el gradiente de velocidad es negativo, y  $y_{m\acute{a}x}$  es la distancia perpendicular a la solera, en la que  $\bar{u} = u_m$  (Figura 4.40).



**Figura 4.40. Definición esquemática de  $Y$  y  $y_{m\acute{a}x}$**

Esta distribución de velocidad se expresa por una ley de potencia, Ec. (45)(a), y una ley exponencial, Ec. (45)(b):

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left( \frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k \quad (45)(a)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{1,177}{1-k} \left( \frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1,5 \quad (45)(b)$$

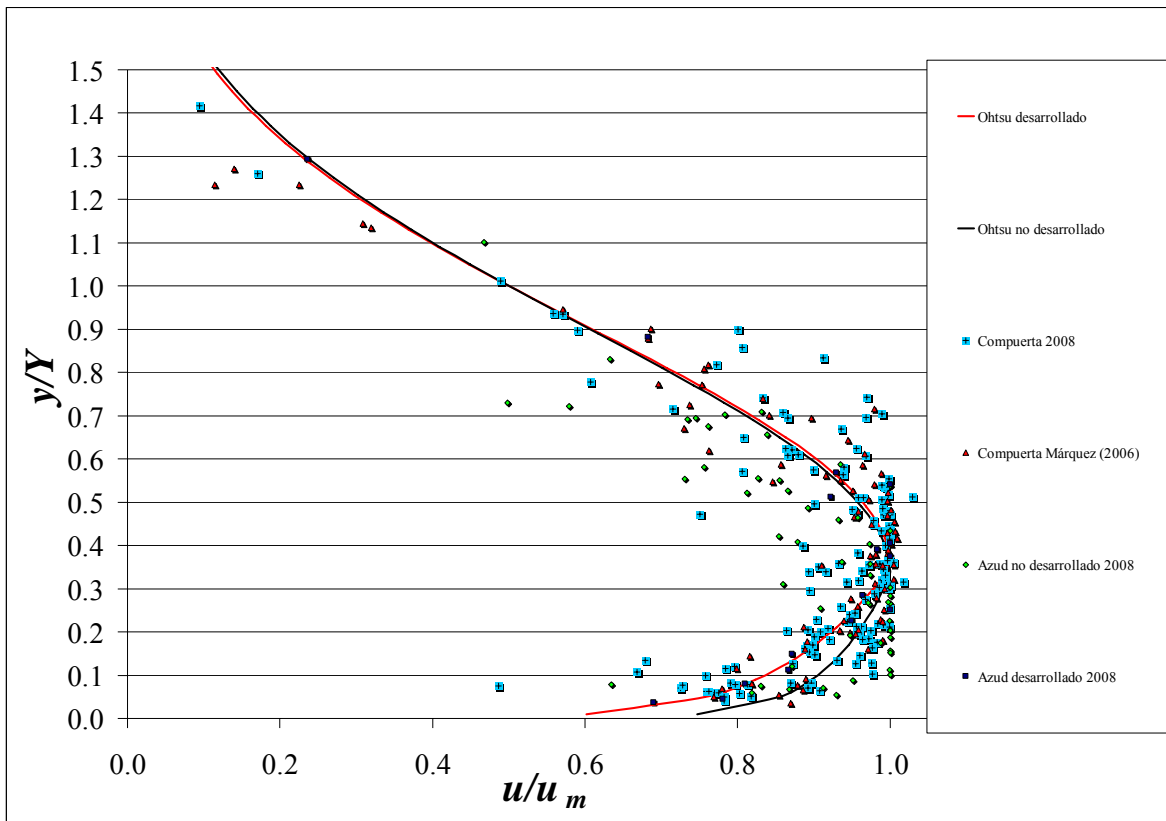
donde  $k = y_{m\acute{a}x} / Y$

A continuación se representan las leyes teóricas (ecuaciones (45)(a) y (45)(b)) obtenidas experimentalmente por Ohtsu para el Caso “a”, flujo parcialmente desarrollado donde  $k=0,333$  y  $n=12$ , y para el Caso “b” flujo totalmente desarrollado, donde  $k=0,351$  y  $n=7$ .

Para cada caudal se han representado los resultados obtenidos experimentalmente para resaltos libres, aunque debido a limitaciones de los medios de medición, ciertos valores han debido ser estimados por extrapolación, ya que la sonda no permite medir con calados muy altos, como máximo hasta un 60 % del calado.

En la figura 4.41, se presentan los resultados obtenidos para todos los caudales y todos los desplazamientos de resalto, no se ha podido hacer ningún cribado entre flujo desarrollado y no desarrollado en cuanto a la compuerta, pues todas las configuraciones de resalto, han sido realizadas y medidas para flujos parcialmente desarrollados ( desplazamientos hasta de 56 cm).





**Figura 4.41. Distribución de velocidades para resaltos libres flujos desarrollados y no desarrollados**

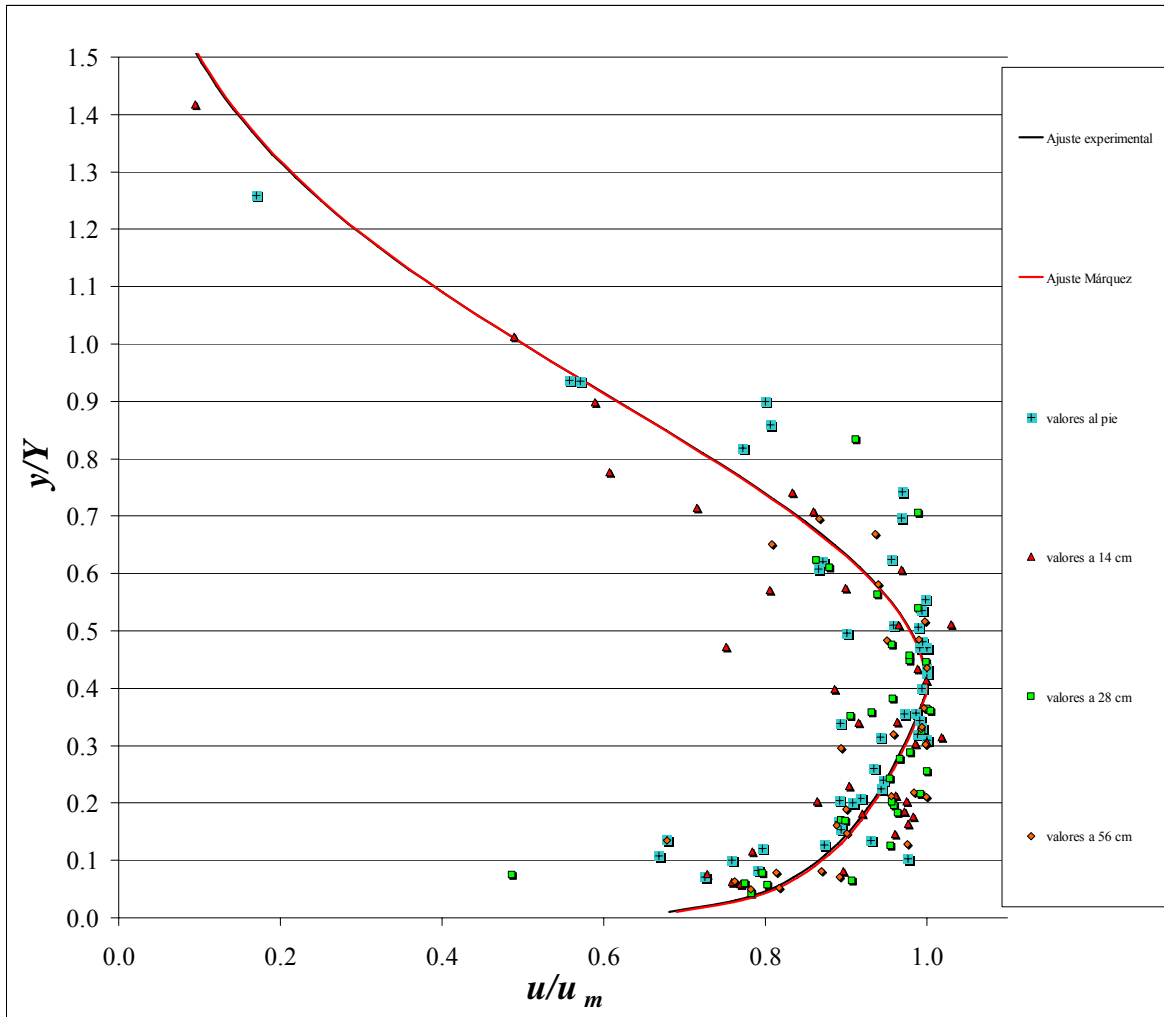
En la figura 4.41 también se han representado las leyes propuestas por Ohtsu et al. (1990), los valores experimentales de Márquez (2006) para la compuerta, y los valores del azud tanto para flujo desarrollado como para el no desarrollado.

Se obtiene un buen ajuste teórico-experimental entre las leyes teóricas propuestas por Ohtsu y los perfiles de velocidad medidos.

Por este motivo se propone una ley universal que mantiene la estructura de la ley propuesta por Ohtsu (Ec. 45) pero con unos valores distintos de  $k$  y  $n$  para obtener un mejor ajuste de la ley universal, a partir de nuestros resultados experimentales.

La ley que sigue la distribución de velocidades propuesta se expresa mediante las ecuaciones (45)(a) y (45)(b) y los valores propuestos son  $k=0,397$  y  $n=9,6$  para el caso de los resaltos libres, muy similares a los propuestos por Márquez para las mismas configuraciones de resalto y con las mismas condiciones, son  $k=0,393$  y  $n=9,9$  y parecidos a los de Ohtsu para el Caso “a”, flujo parcialmente desarrollado donde  $k=0,333$  y  $n=12$ .

Nuestros ajustes se presentan en la figura 4.42, son datos que corresponden a un flujo no desarrollado, también la comparación de nuestra curva con la de Márquez (2006) se presenta en esta figura, graficada con los valores de  $k$  y  $n$  expresados anteriormente, se puede observar perfectamente que son prácticamente similares.



**Figura 4.42. Distribución de velocidades para resaltos libres y ajuste experimental “Compuerta 2008”**

En la figura 4.43 se presentan los valores para flujo no desarrollado, es decir, los datos del estudio “Compuerta 2008”, los de Márquez (2006) y los de “Azud no desarrollado 2008”, junto con la ley de Ohtsu para flujo no desarrollado.

En la figura 4.44 representamos los valores para flujo desarrollado, el único caso en el que se da esta situación es el “Azud desarrollado 2008”, pero para estas condiciones tenemos muy pocas mediciones, éstos valores encajan a la perfección con los de Ohtsu, por lo tanto no se ha creído conveniente ajustar ninguna ley teórica.

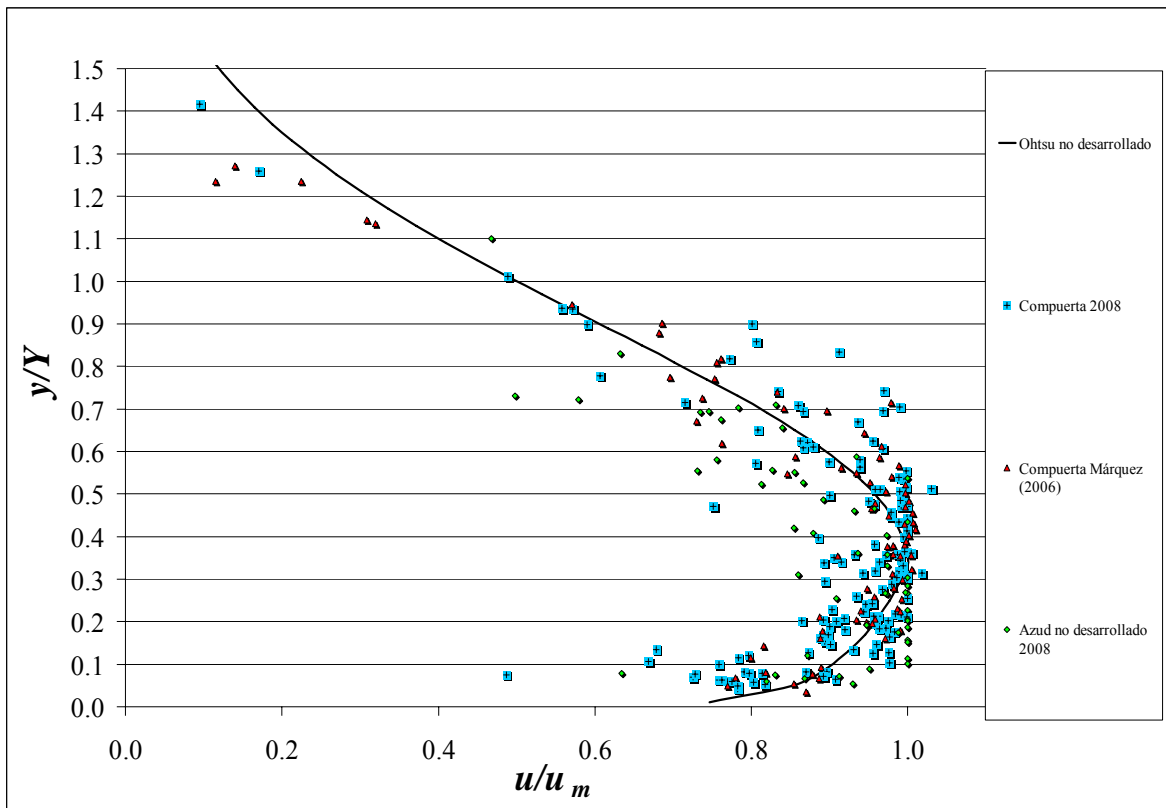


Figura 4.43. Distribución de velocidades para resaltos libres y flujo no desarrollado

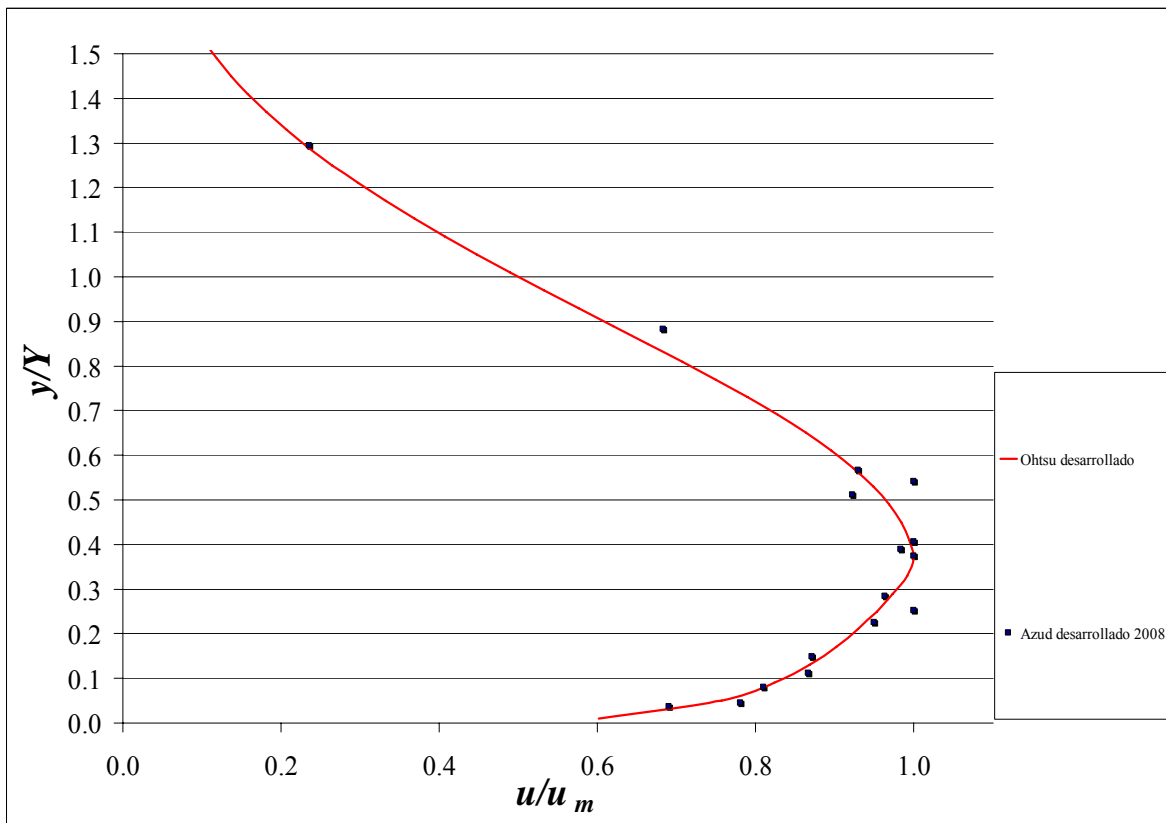


Figura 4.44. Distribución de velocidades para resaltos libres y flujo desarrollado

En la siguiente tabla se recogen los coeficientes y exponentes correspondientes a las expresiones (45)(a) y (45)(b), obtenidos en los diferentes ajustes:

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left( \frac{y}{Y} \right) \right\}^{1/n}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k \quad (45)(a)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{1,177}{1-k} \left( \frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1,5 \quad (45)(b)$$

Distribución de Velocidad	<i>k</i>	<i>n</i>
<b>Resalto libre Compuerta 2008 (no desarrollado, compuerta)</b> $2,5 \leq F_1 \leq 5$ $0,25 \leq x/L_{jc} \leq 0,75$	0,397	9,6
<b>Resalto libre Márquez (2006) (no desarrollado, compuerta)</b> $2,5 \leq F_1 \leq 5$ $0,25 \leq x/L_{jc} \leq 0,75$	0,393	9,9
<b>Resalto libre Azud (no desarrollado, azud)</b> $2,5 \leq F_1 \leq 5$ $0,25 \leq x/L_{jc} \leq 0,75$	0.3	5
<b>Resalto libre (caso “a”) Ohsu et al.</b> $5 \leq F_1 \leq 7,3$ $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$	0,333	12
<b>Resalto libre (caso “b”) Ohsu et al.</b> $5,3 \leq F_1 \leq 7,3$ $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$	0,351	7

Tabla 4.6. Coeficientes correspondientes a los ajustes realizados en la distribución de velocidades

#### 4.6.2. Caída de velocidad máxima

En la figura 4.45 se muestra la relación  $u_m / v_1 = f(x / y_1, F_1)$ , que fue obtenida por Ohtsu et al. (1990), proponiendo la siguiente ecuación:

Ley propuesta Ohtsu et al. (1990) en función del número de *Froude* :

$$u_m / v_1 = (0,175F_1 + 1,57) / \sqrt{x / y_1} ; \text{ para } (3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (46)$$

La ecuación anterior es aplicable en la zona del resalto, dentro del rango  $0,2 \leq x / L_j \leq 0,7$

En la figura se representan las leyes teóricas para cada *Froude* según la Ec. (46), junto con nuestros resultados experimentales y se observa que los puntos medidos quedan por debajo de las líneas teóricas correspondientes, por lo tanto no se puede considerar el ajuste teórico-experimental como bueno. Se ha de considerar igualmente que la mejor correlación entre los valores teóricos y los experimentales se obtiene para el primer *Froude* medido ( $F_1=1,73$ ), muy similar a lo que ya le ocurrió a Márquez (2006) en su estudio en el mismo canal.

Se puede observar que nuestros valores experimentales caen asintóticamente por debajo de la relación propuesta por Ohtsu et al. (1990).

Se ha representado también el ajuste medio de las leyes teóricas en el rango del número de *Froude* para nuestro rango de trabajo ( $1,73 \leq F_1 \leq 5,46$ ) (Ec. (48)) y la ley de ajuste que muestra los resultados de este trabajo (Ec. (49)):

Ajuste propuesto por Ohtsu et al. (1990) independiente del número de *Froude* :

$$u_m / v_1 = (2,252) / \sqrt{x / y_1} ; \text{ para } (1,73 \leq F_1 \leq 5,45) \quad (47)$$

El ajuste propuesto por Márquez (2006) :

$$u_m / v_1 = (1,735) / \sqrt{x / y_1} \quad (48)$$

El ajuste propuesto para nuestro proyecto es (“Compuerta 2008” ) :

$$u_m / v_1 = (1,59) / \sqrt{x / y_1} \quad (49)$$

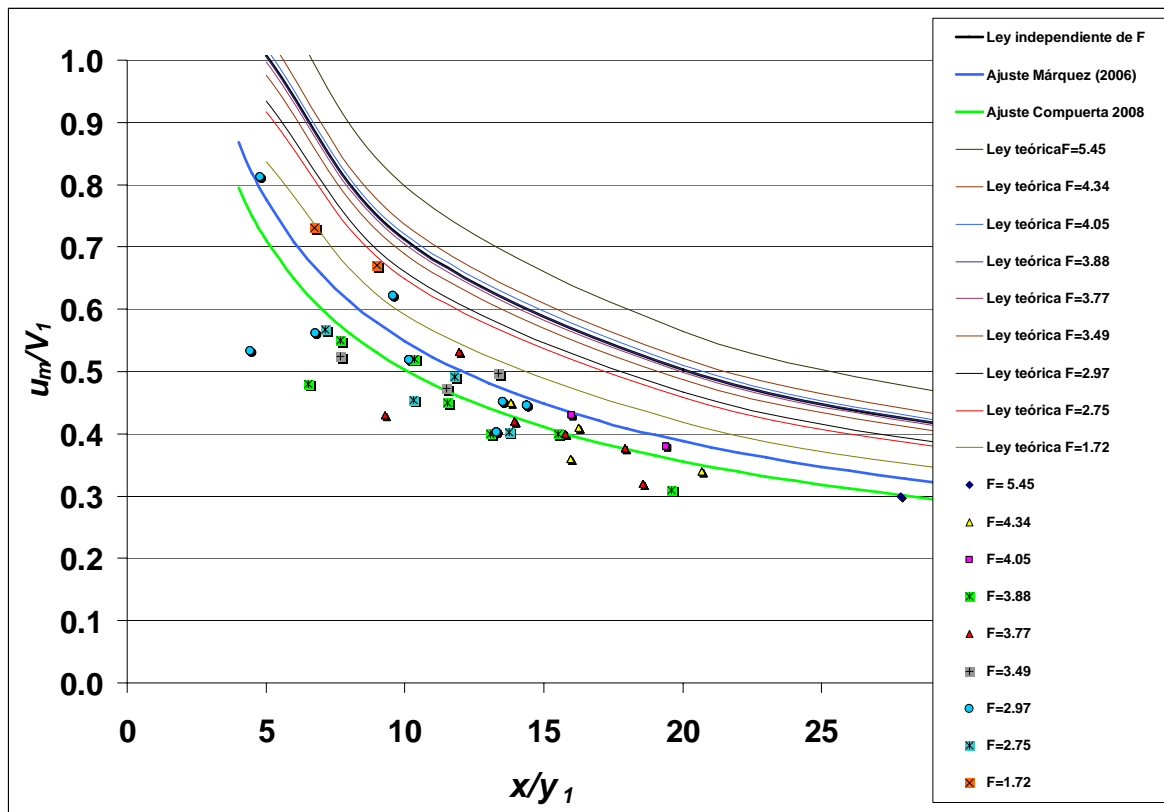


Figura 4.45. Caída de velocidad máxima

Se ha representado en esta figura, los valores medios para un mismo caudal de sus números de Froude, ya que éstos varían dependiendo de la distancia a la que se encuentre el resalto de la compuerta.

En las siguientes gráficas, con respecto a  $Y$ , dentro del rango  $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$ , se puede aplicar la ecuación (50)(a) para el Caso “a” (flujo desarrollado), y la ecuación (50)(b) para el Caso “b” (flujo no desarrollado) de Ohtsu et al. (1990) :

$$Y / y_1 = (0,330 / \sqrt{F_1}) x / y_1; \quad \text{para } (3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (50)(a)$$

$$Y / y_1 = (0,370 / \sqrt{F_1}) x / y_1; \quad \text{para } (3 \leq F_1 \leq 9,5) \quad (50)(b)$$

Aunque debemos recordar, que en el caso de estudio de la compuerta, consideramos el flujo aún como no desarrollado, por tanto, la gráfica que afecta realmente a nuestro estudio es la figura 4.46 (b).

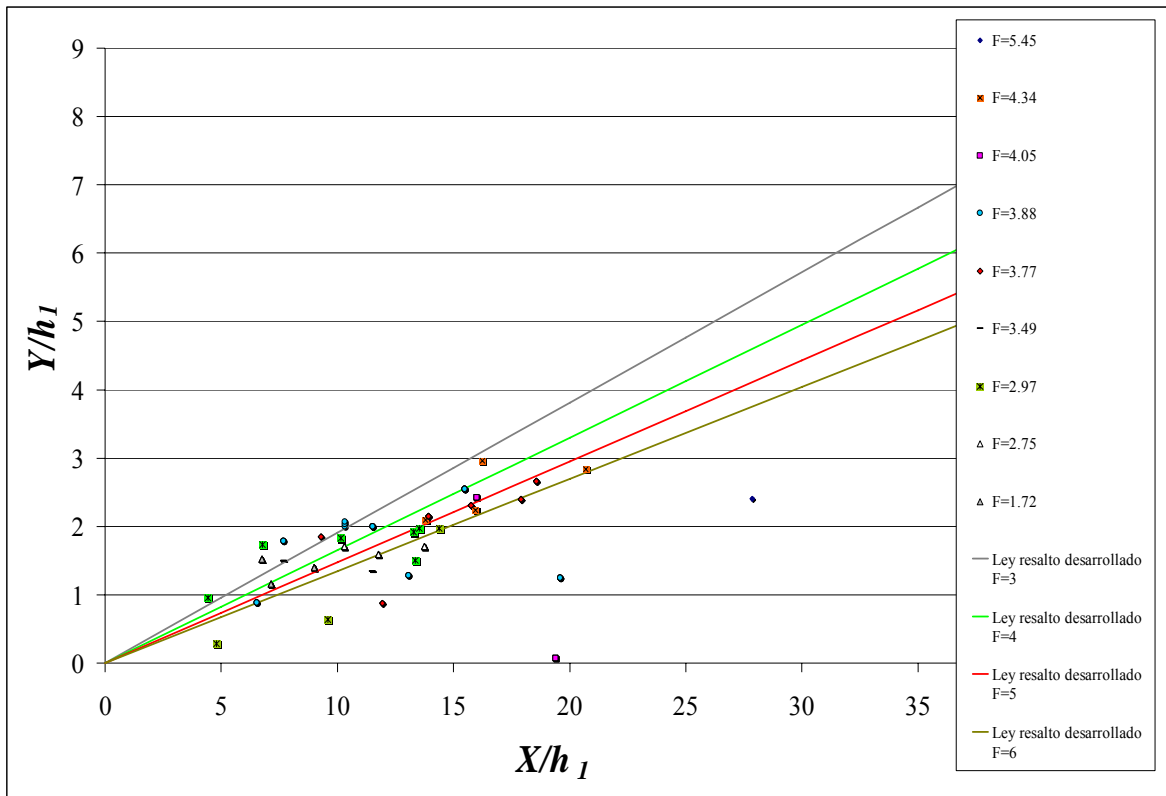


Figura 4.46. (a). Relación  $Y/y_1 = f(x/y_1)$  flujo desarrollado

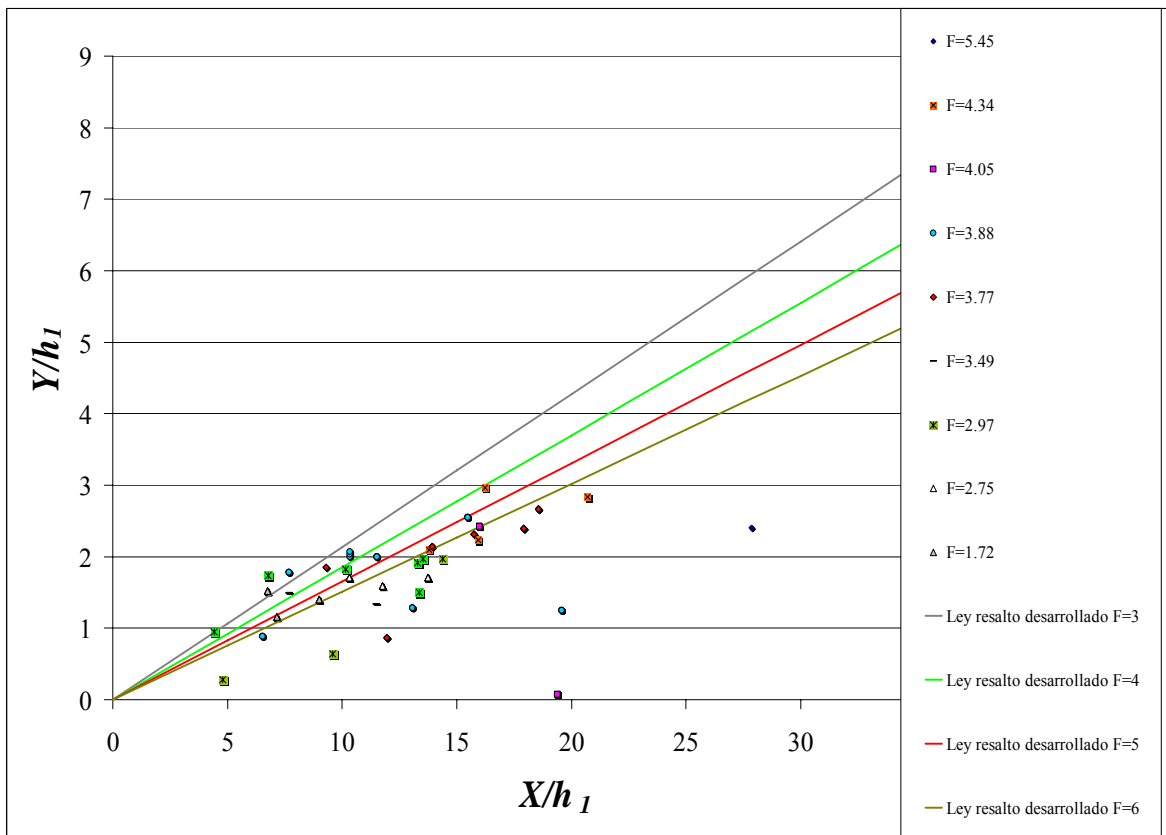


Figura 4.46. (b). Relación  $Y/y_1 = f(x/y_1)$  flujo no desarrollado

Se han representado las leyes teóricas para los resaltos libres según las ecuaciones (50)(a) y (50)(b) y para todos los números de *Froude* que se encuentran en nuestro rango de trabajo.

Junto a estas leyes teóricas se han representado los resultados obtenidos experimentalmente para los resaltos libres.

Con respecto a  $y_{máx}$ , dentro del rango  $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$ , se puede aplicar la Ec.(51)(a) para el Caso “a”, y la Ec. (51)(b) para el Caso “b”.

$$y_{máx} / y_1 = (0,110 / \sqrt{F_1}) x / y_1, \quad (51)(a)$$

$$y_{máx} / y_1 = (0,130 / \sqrt{F_1}) x / y_1, \quad (51)(b)$$

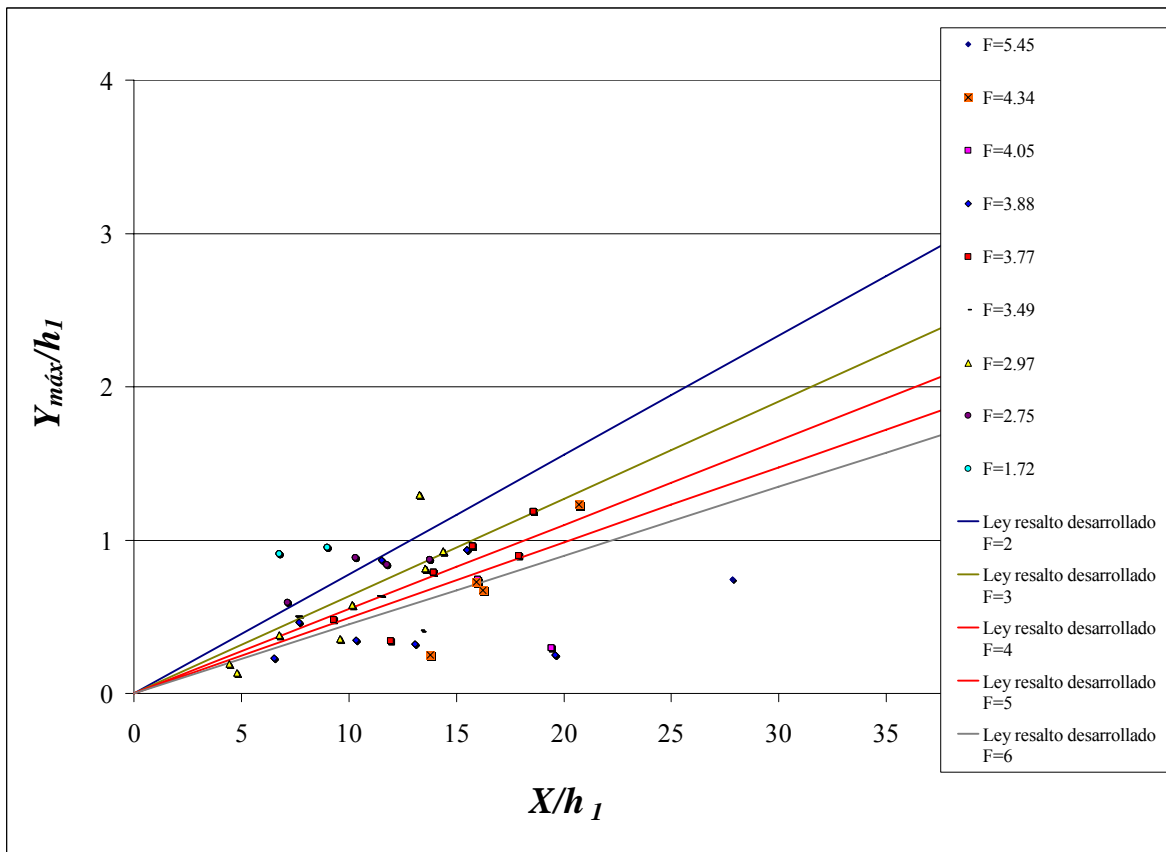


Figura 4.47. (a). Relación  $y_{máx} / y_1 = f(x / y_1)$  flujo desarrollado



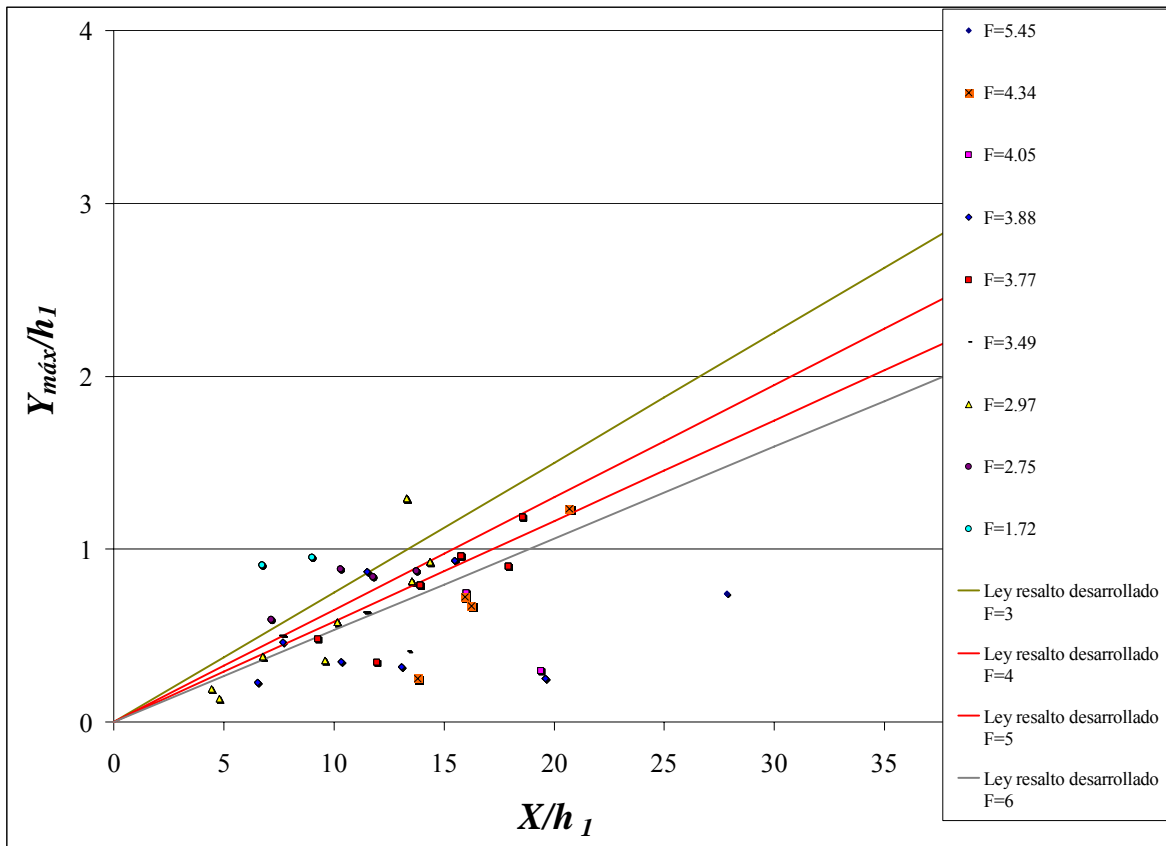


Figura 4.47.(b). Relación  $y_{m\acute{a}x} / y_1 = f(x / y_1)$  flujo no desarrollado

Se han representado las leyes teóricas para los resaltos libres según las ecuaciones (51)(a) y (51)(b) para todos los números de *Froude* que se encuentran en nuestro rango de trabajo.

Si se comparan las figuras 4.46(a) y 4.46(b) con las figuras 4.47(a) y 4.47(b) se observa que se obtiene un mejor ajuste de los datos experimentales con los teóricos esperados en el caso de las figuras 4.47(a) y 4.47(b).

Esto se debe a que la distancia  $y_{m\acute{a}x}$ , en la que  $\bar{u} = u_m$ , se obtiene directamente de los perfiles de velocidad medidos en nuestro laboratorio, mientras que la distancia  $Y$ , en la que  $\bar{u} = u_m / 2$ , es un valor estimado, ya que dichos perfiles medidos no alcanzan suficiente calado como para obtener con exactitud la distancia  $Y$ .

A partir de haber obtenido una ley de similitud para la distribución de velocidades, como se muestra en la figura 4.42, se intenta dar una explicación de este punto a continuación:

Examinando las condiciones para obtener dicha ley de similitud en base a la ecuación del movimiento, es necesario satisfacer las ecuaciones (52), (53) y (54):

$$u_m \propto x^a \quad (52)$$

$$Y \propto x \quad (53)$$

$$\frac{dy}{dx} / \left( \frac{u_m}{\sqrt{gY}} \right)^2 = 0 \text{ ó } \textit{valor constate} \quad (54)$$

Desde que las ecuaciones (46) y (50) son aplicables dentro del rango  $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$ , concuerdan aproximadamente con las relaciones (52) y (53).

En otras palabras, cuando las relaciones (52), (53) y (54) son satisfechas aproximadamente dentro del rango  $0,2 \leq x/L_j \leq 0,7$ , se ha obtenido una ley de similitud para la distribución de velocidades.

El resultado de los datos experimentales, considerando la distribución de velocidades al final del resalto aguas abajo ( $x=L_{jc}$ ), usando la relación (55), se muestra en la figura 4.48:

$$\bar{u} / v_2 = f(y, y_2) \quad (55)$$

En la figura 4.48, se presentan los valores para todos los caudales y para cada desplazamiento, en las posteriores figuras, ésta gráfica inicial, es disgregada en otras gráficas, según el desplazamiento del inicio del resalto.

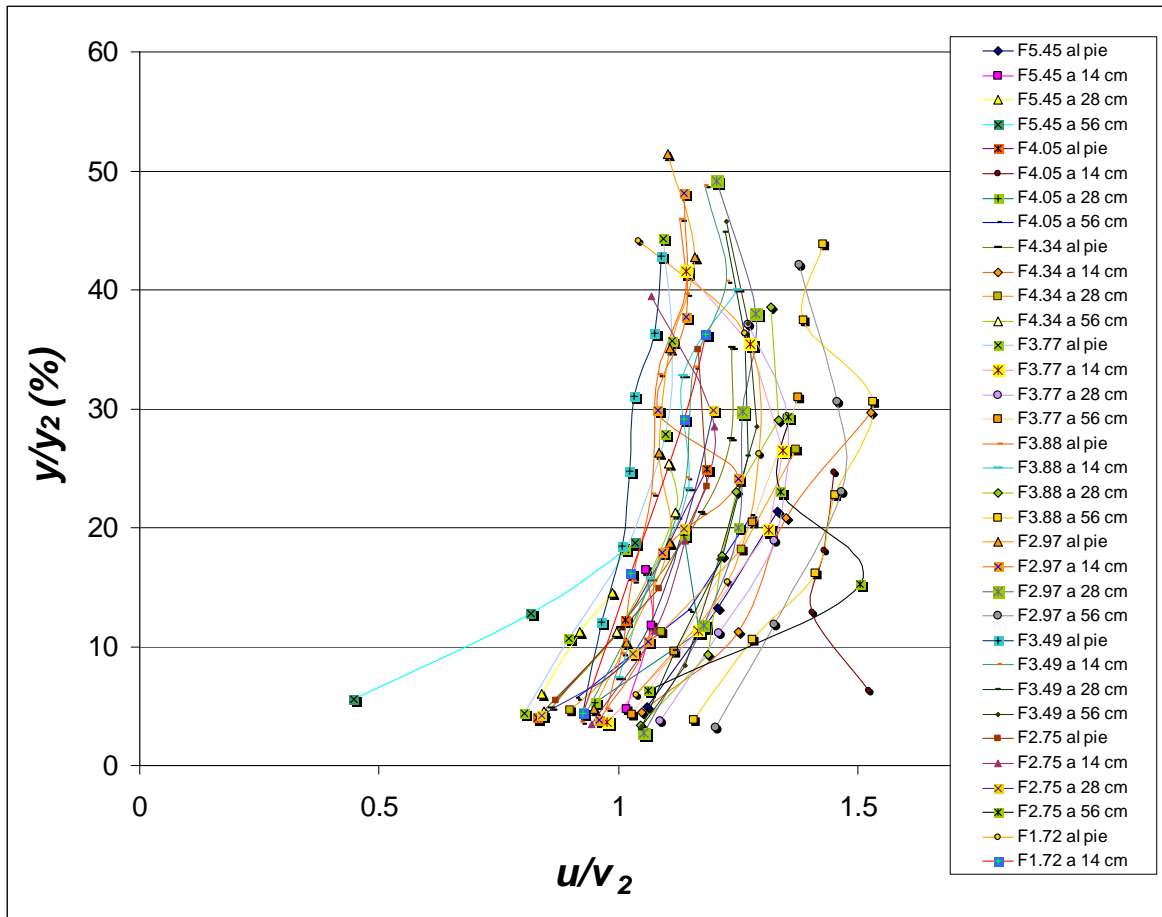


Figura 4.48. Distribución de velocidades para todos los resaltos libres a  $x=L_{jc}$

Tanto en la figura 4.49 como en la figura 4.50, se presentan los valores indicados comparados con los de Márquez.

En la figura 4.49, representamos los valores para los distintos caudales, todos ellos al pie de la compuerta.

Cabe destacar que tras observar los resultados de Márquez (2006), éstos tienen siempre una relación  $u/v_2$  mayor que los nuestros.

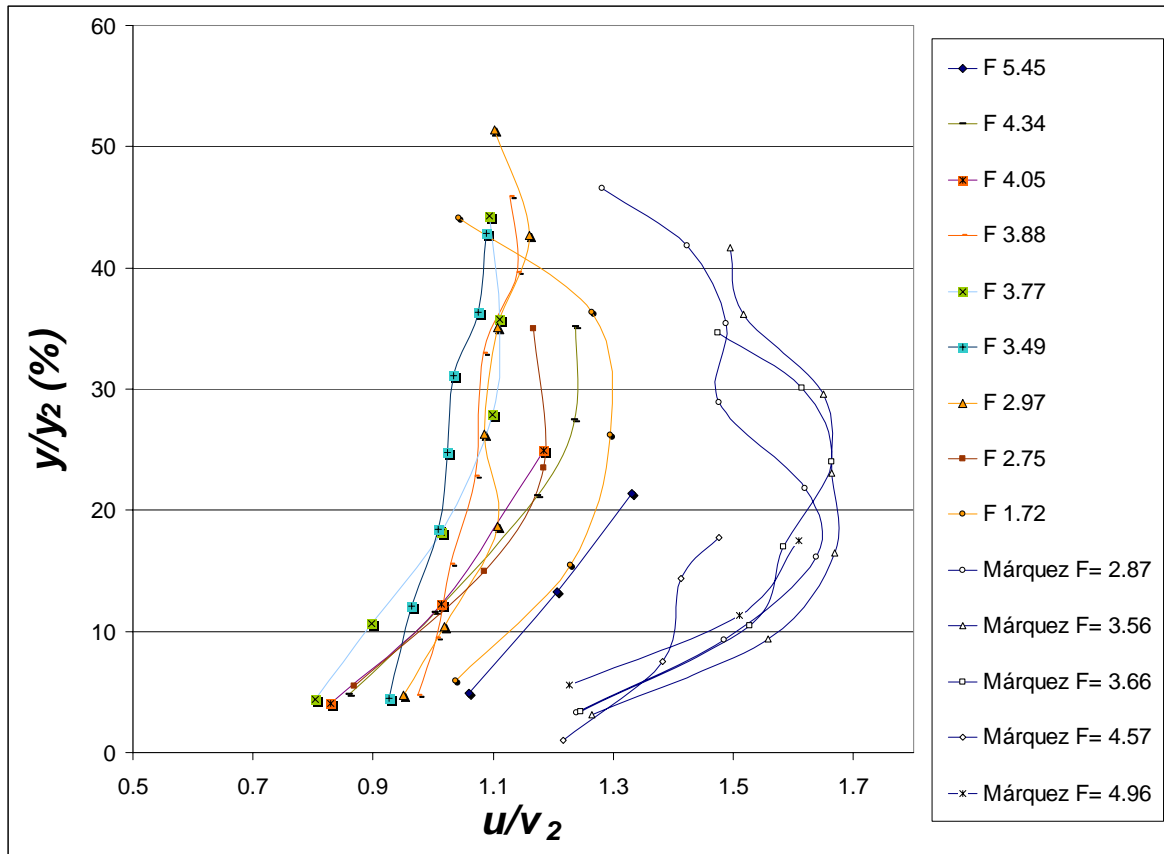


Figura 4.49. Distribución de velocidades al pie de la compuerta para resaltos libres a  $x=L_{jc}$

En la figura 4.50, representamos los valores para los distintos caudales, todos ellos a 14 cm de la compuerta, comparados también con los de Márquez.

En las figuras 4.51 y figura 4.52, presentamos los resultados para todos los caudales a 28 y 56 cm, en el proyecto de Márquez éstos dos valores no fueron medidos, por tanto no se comparan.

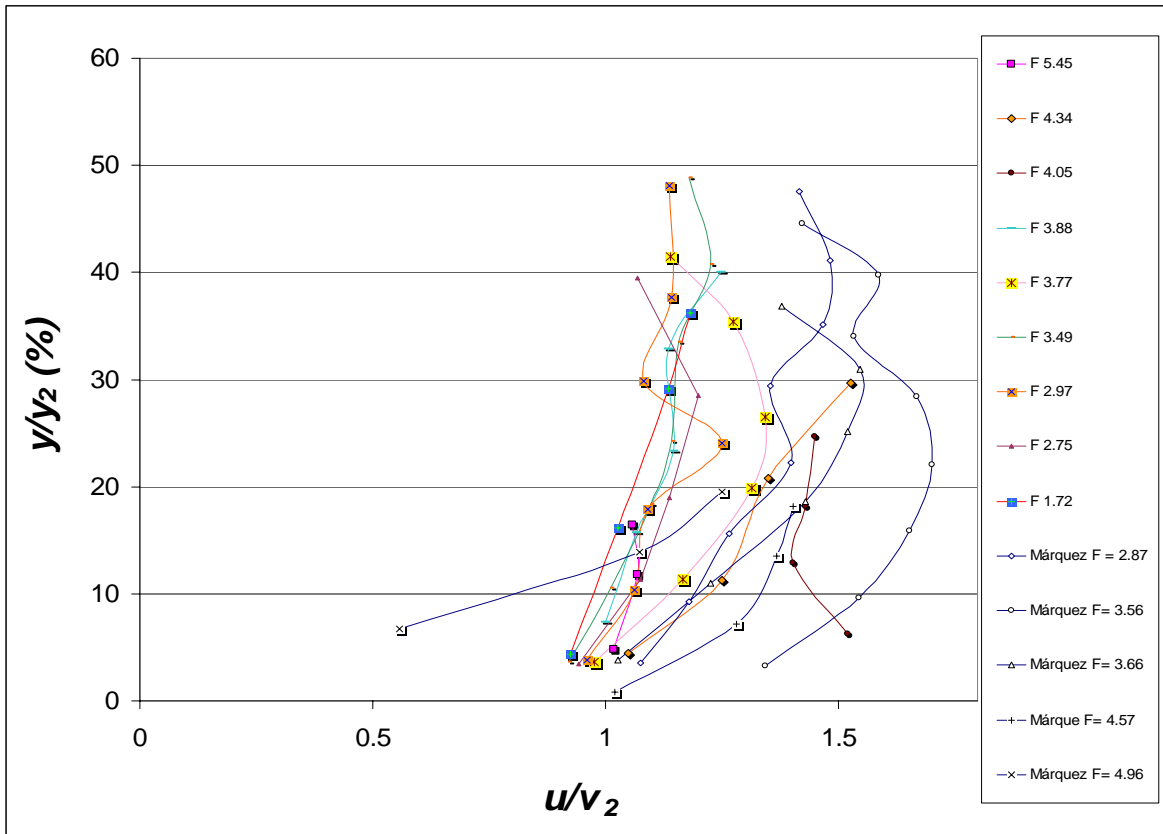


Figura 4.50. Distribución de velocidades a 14 cm de la compuerta para resaltos libres a  $x=L_{jc}$

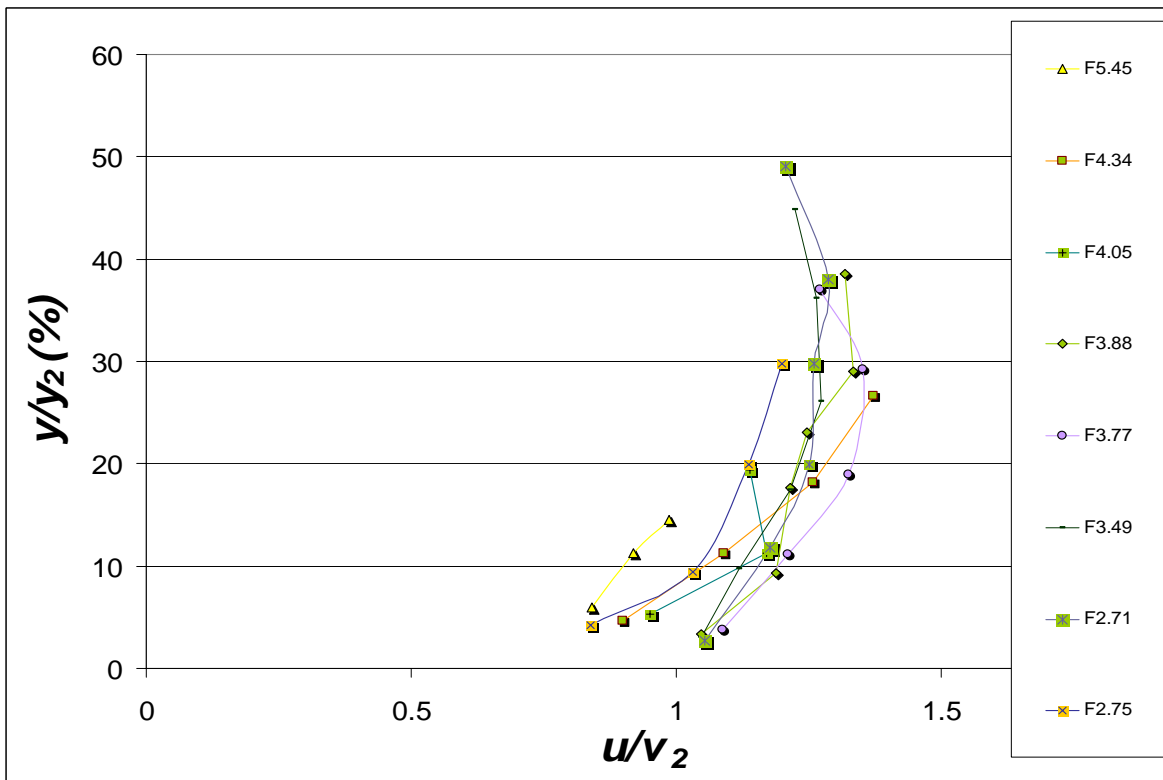


Figura 4.51. Distribución de velocidades a 28 cm de la compuerta para resaltos libres a  $x=L_{jc}$

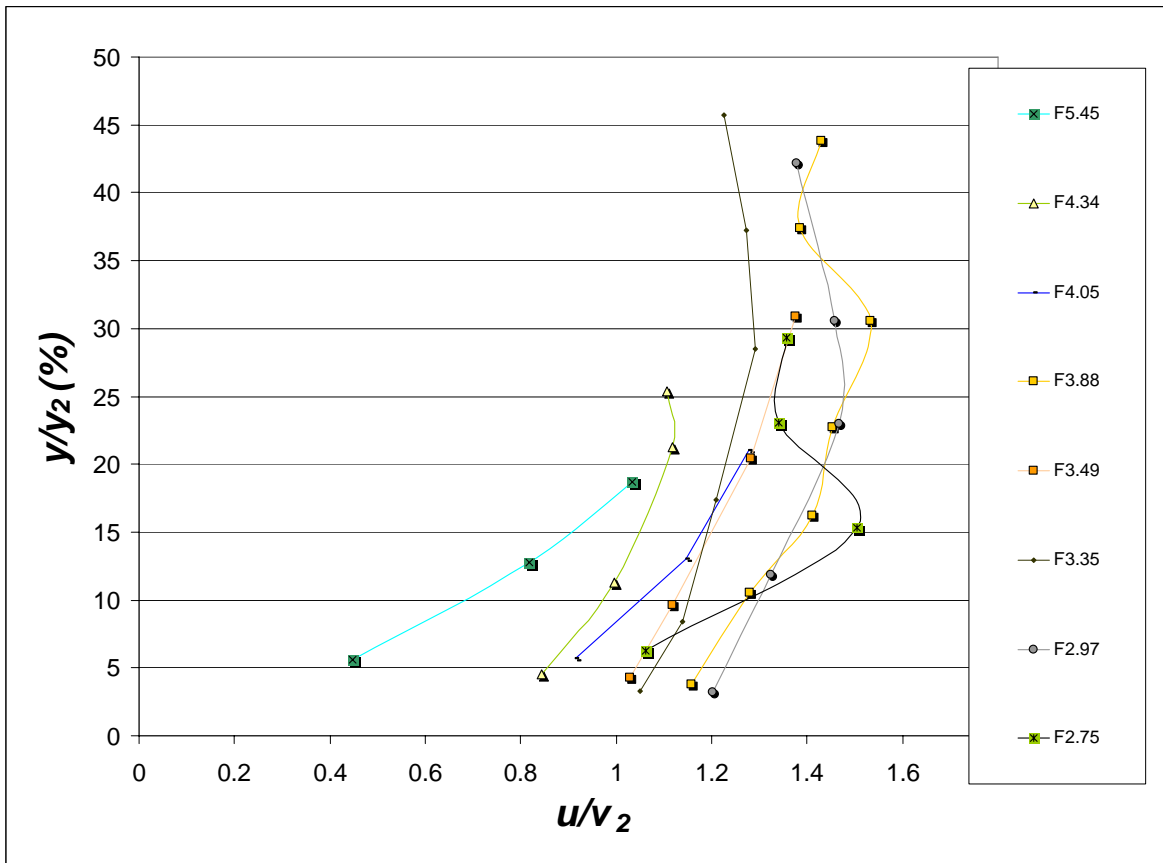


Figura 4.52. Distribución de velocidades a 56 cm de la compuerta para resaltos libres a  $x=L_{jc}$

## CONCLUSIONES

Tras el aprendizaje y uso de la instrumentación para la medida de velocidades instantáneas y la adquisición de datos por medio del equipo Doppler se obtienen las siguientes conclusiones.

### Configuración de la sonda

Los principales parámetros establecidos para la configuración de la sonda han sido un rango de velocidad de  $\pm 100$  cm/sg y una frecuencia de muestreo de 5 Hz.

Como se explicó anteriormente el equipo de medida de velocidades instantáneas ADV necesita estar sumergido, pero la sonda no funciona correctamente en flujo con aire incorporado, lo que ocurre en el caso de los resaltos hidráulicos. En estas condiciones se obtiene un valor de velocidad erróneo, pero el procedimiento de filtrado de datos propuesto, ha permitido desechar o paliar las anomalías debidas a este fenómeno y dar validez a los datos muestreados. El tratamiento de datos realizado ha permitido obtener unos buenos resultados comparables con trabajos experimentales ya afianzados, e incluso, comprobar y proponer nuevas formulaciones.

Una vez contrastados los datos obtenidos en este proyecto fin de carrera con trabajos experimentales ya afianzados y hecho el análisis crítico correspondiente, se extraen las siguientes conclusiones en los diversos campos de estudio que se han tratado.

### Campos de estudio

Los campos de estudio que se han tenido en cuenta son los siguientes:

- Características de la longitud del resalto

Las medidas de longitud de resalto, son un tanto subjetivas, por lo que ciertas medidas, después de ser analizadas, han tenido que ser descartadas pues alteraban considerablemente la serie, pues no es fácil distinguir el final del rulo del resalto, por ejemplo.

Se ha podido observar que la longitud de resalto medida, en un rango [ $2 < F < 6$ ], se encuentra entre los valores de longitud de rulo y longitud de resalto definidos por otros autores. Como se ha demostrado, esto está totalmente de acuerdo con el criterio establecido para medir nuestra longitud de resalto hidráulico.

Según la figura 4.12 que representa la relación  $L_j/y_1$  medida en función del número de *Froude* junto con la ecuación (3) propuesta por Silvester (1964), cabe destacar que, para los valores de *Froude* más bajos, las diferencias entre los valores teóricos y nuestros valores experimentales son más pequeñas, pero al aumentar el valor de *Froude*, esta diferencia aumenta, lo que también es concordante con el criterio definido para medir la longitud de resalto. Para valores bajos de *Froude* ( $F_1 < 3$ ), los valores de  $L_{jc}/y_1$  son similares, pero a medida que se aumenta el *Froude* nuestros valores experimentales son cada vez más pequeños comparados con los de Silvester, algo similar a lo que observó Márquez (2006) en su proyecto.

- Relación entre profundidades inicial y final

Una interpretación de los gráficos presentados de las ecuaciones de Bélanger, Leutheusser y Kartha y Rajaratnam :

- Leutheusser y Kartha llevaron a cabo un estudio semi-empírico, obtuvieron altos  $n^\circ$  de *Froude*, la ley que describieron es poco práctica y aunque es curva, se asemeja en ocasiones a la de Rajaratnam, es por su complejidad que esta ley ha sido menos representativa, se encuentra entre los valores de Bélanger y Rajaratnam, esto no hace pensar que el campo de estudio de los calados conjugados, aún tiene muchas lagunas y necesita ser examinado más profundamente, pues las teorías de muchos autores al respecto son contradictorias entre sí.

- Al tener valores altos de *Reynolds*, la capa límite turbulenta da mayores fuerzas de fricción que la laminar, pero presenta una mayor resistencia al desprendimiento.

- La relación de calados conjugados en los flujos totalmente desarrollados y parcialmente desarrollados en el estudio de la compuerta tienden a la ley de Rajaratnam, pero por diferentes motivos, como se expone a continuación.

- Tenemos dos efectos contrapuestos, por un lado, la distribución de velocidades es muy irregular y tiende a aumentar la pérdida de energía.

- Sin embargo, existe un efecto lubricante al producido por el espesor de la capa límite que tiende a reducir la pérdida de energía, al ser el contorno del canal lo que perturba y altera el flujo, perdemos fricción con el contorno.



- En cuanto a cuál de los dos efectos es mayor:

-Para las condiciones del aliviadero, y compuerta a 70 y 90 cm, analizando los valores no afectados teóricamente por efectos de escala, al estar el flujo desarrollado, deberían tender a Rajarantnan, pues se produce una mayor fricción.

- En cuanto a la compuerta para flujos no desarrollados, se compensan estos dos efectos contradictorios, motivo por el cuál los resultados experimentales tienden a Rajarantnan, aunque teóricamente deberían tender a Bélanguer.

- Finalmente debemos destacar, que para el caso de la compuerta, aunque los experimentos de Chanson (2005) apuntan un  $Re > 21.000$  como dato para empezar a considerar que prácticamente no hay efectos de escala, en nuestro estudio encontramos que con este  $Re$ , aún siguen habiendo efectos de escala, producen una pérdida de energía adicional de entre 2,3% y 1,3 % y más intensamente para  $Froude$  bajos y resaltos con flujo parcialmente desarrollado, incluso podríamos concluir que los efectos de escala desaparecerían a partir de  $Re > 30.000$ , cifra que corresponde con los mayores  $Re$  que han sido medidos en el proyecto, aunque no disponemos de mayores  $Re$  por las condiciones del canal.

En nuestro proyecto, hemos considerado como aceptables, medidas con valores de  $Reynolds > 25.000$ .

Para pequeños caudales las fuerzas viscosas son muy importantes.

- Pérdida de energía en los resaltos hidráulicos

El resultado entre los valores teóricos y los experimentales es satisfactorio.

Es importante tener en cuenta que para el resalto libre formado al pie de la compuerta (R.L.0) ,a 14 cm de la compuerta (R.L.14), a 28 cm (R.L.28) y a 56 cm (R.L.56), considerados no desarrollados, existe una pérdida de energía mayor, que para los resaltos medidos a 70 y 90 cm, considerados desarrollados constituyendo parte de esta diferencia de energía relativa, la pérdida de energía relativa que se produce a través de la curva de remanso  $H_3$  parcialmente desarrollada.

Se ha realizado también un ajuste para los valores de flujo desarrollado, con desplazamientos de 70 y 90 cm, que como se puede observar en la figura 4.29, son

ligeramente inferiores a los valores correspondientes a flujo no desarrollado, como ya hemos dicho, esto es debido a que la energía potencial disponible al comienzo del resalto para estos resaltos, es menor que la energía potencial disponible para resaltos en flujo no desarrollado.

- Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos

Observamos que, examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, dentro del seno del resalto hidráulico, es posible establecer una ley universal para la distribución de velocidades en resaltos libres (ecuaciones 45 (a) y 45 (b)). A partir de estas ecuaciones se han propuesto distintos valores para coeficientes y exponentes, manteniendo la estructura de la ley propuesta, con el fin de obtener un mejor ajuste a nuestros resultados experimentales.

Encontramos que las mayores velocidades se dan para resaltos más cercanos a la compuerta.

Hemos representado conjuntamente los valores para flujo no desarrollado y desarrollado con sus respectivas leyes teóricas, recordemos que los valores para flujo desarrollado únicamente se obtienen a partir de las mediciones del azud, el ajuste con los valores de Ohtsu es muy satisfactorio, por lo tanto no se ha propuesto ninguna ley.

Los valores de flujo no desarrollado representan las mediciones de Márquez (2006), los medidos en este proyecto de compuerta y los valores no desarrollados de azud, hemos propuesto una ley, al igual que realizó Márquez.

Se ha mostrado también que existe un buen ajuste entre los resultados experimentales y los valores teóricos propuestos por otros autores.

Respecto a la caída máxima de velocidad se aprecia una reducción del 40% en comparación con la ley de Ohtsu. Por otro lado no se consigue distinguir diferencias en las tendencias para flujo desarrollado y parcialmente desarrollado.

## **Reflexiones**

Los datos obtenidos con el Doppler, fueron lo suficientemente precisos, dado que satisfacen aceptablemente tanto las ecuaciones de continuidad y movimiento, como también las fluctuaciones de velocidad.

Es posible nivelar la pérdida para lograr estabilizar el punto de ubicación del resalto aguas abajo del obstáculo, éste fue el método que utilizamos para obtener distintos desplazamientos.

Los resultados fueron comparados con investigaciones anteriores, de aquí que las condiciones teóricas para las cuales se supone la formación y propagación del resalto hidráulico deben ser verificadas experimentalmente para obtener mejores indicadores aplicables a problemas prácticos.

Existe un gran estímulo para seguir realizando trabajos experimentales del resalto hidráulico, tanto desplazados, como sumergidos, en el futuro, este proyecto pretende ser uno de los pilares que ayude a la construcción de un estudio sistemático y profundo del resalto hidráulico, aunque debemos destacar, que al producirse complicadas interfases aire-agua, ha sido pobremente estudiado.

Se espera que en nuestro laboratorio se puedan ampliar, y mejorar los resultados obtenidos en este proyecto, por medio de técnicas avanzadas de procesamiento digital de imágenes, mejorando los medios de medida del laboratorio, ampliando las infraestructuras, además de otra serie de medidas que nuestro director del proyecto está realizando



# **ANEXO 1.**

## **RESULTADOS DEL FILTRADO A PARTIR DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO**



En este primer anexo se muestran las tablas con los resultados del filtrado a partir de las campañas de muestreo. Los resultados se han clasificado por caudal de trabajo y valor de desplazamiento de cada resalto hidráulico. Cada punto muestreado tiene una denominación diferente que se describe a continuación. Las dos primeras cifras de cada archivo muestran el valor del caudal ( $m^3/h$ ), procedente de la lectura del caudalímetro. Las dos siguientes cifras reflejan el valor de apertura de compuerta medido en mm. La siguiente cifra muestra el tipo de resalto que estamos ensayando, hemos asignado un código para cada resalto de la siguiente forma, análoga a como realizó Márquez (2006):

- R.L.1 --> es el resalto R.H.L. 0 al pie de la compuerta.
- R.L.0 --> es el resalto R.H.L. 14 a 14 cm de la compuerta.
- R.L.2 --> es el resalto R.H.L. 28 a 28 cm de la compuerta.
- R.L.3 --> es el resalto R.H.L. 56 a 56 cm de la compuerta.

El siguiente cuadro refleja las características de cada uno de estos resaltos, con el caudal correspondiente, la apertura de compuerta y las características de cada desplazamiento:

Debemos destacar, que para el caudal de  $10.5 m^3/h$ , con menor número de Froude, solo fue posible medir dos resaltos, pues al tener un Froude tan bajo, era un resalto muy inestable, imposible de medir con el equipo que disponíamos.

Q Caudalímetro m <sup>3</sup> /h	Apertura a (cm)	resaltos al pie		resaltos a 14 cm		resaltos a 28 cm		resaltos a 56 cm	
		<i>F<sub>1</sub></i>	<i>Reynolds</i>	<i>F<sub>1</sub></i>	<i>Reynolds</i>	<i>F<sub>1</sub></i>	<i>Reynolds</i>	<i>F<sub>1</sub></i>	<i>Reynolds</i>
4	1.71	5.45	14617	4.40	14172	4.57	14253	3.54	13678
5	2.2	4.05	16091	3.52	15690	3.70	15831	3.02	15229
6	2.4	4.34	18892	3.62	18240	3.85	18463	3.30	17900
8	3.1	3.77	22553	3.61	22332	3.53	22223	3.04	21456
10	3.5	3.89	26353	3.40	25501	3.46	25620	3.22	25153
10.5	4.6	2.75	25178	2.78	25251	2.69	24999	2.47	24409
10.5	5.6	1.73	21832	1.96	22735				
11.25	4	3.49	28231	3.51	28273	3.37	27979	3.06	27250
12.25	4.5	2.97	27807	3.10	28167	2.98	27847	2.63	26855

Y la última cifra refleja la sección que estamos muestreando (S. 0, S. 1, S. 2, S. 3, S. 4 ó S.5), siendo éstas las secciones que se han considerado:

(a) Sección 0: localizada inmediatamente aguas abajo de la compuerta y situada a la distancia calculada, a partir del coeficiente de contracción, para el resalto al pie, para el resto de resaltos fue imposible cualquier medición en esta sección.

(b) Sección 1; localizada a  $1/4L_r$  (un cuarto de la longitud de resalto considerada).

(c) Sección 2; localizada a  $1/2L_r$ .

(d) Sección 3; localizada a  $3/4L_r$ .

(e) Sección 4; localizada a una distancia igual a la longitud del resalto.

(f) Sección 5; localizada a una distancia intermedia entre el final de la longitud de resalto estimada y la mitad del canal (punto hasta el cuál el canal es completamente horizontal).

La letra posterior a esta denominación indica el punto de muestreo de cada sección, siendo la letra “a” la correspondiente al punto de muestreo más cercano a la solera del canal para cada una de las secciones.

El valor de velocidad media considerado tras el proceso del filtrado de la muestra original se denomina  $u_x$ . Seguidamente se muestra la profundidad para cada punto muestreo medida desde la solera del canal. El % de calado correspondiente es el cociente entre la distancia del punto de muestreo desde la solera y el calado total en esa sección. A continuación se indica el número de filtrados que ha sufrido cada muestra, el calado total en esa sección, la distancia desde la compuerta al punto de muestreo, y finalmente la longitud total del resalto.



<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, Q = 4 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior (cm)</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>041713a</b>	47.98	0.34	5.05	1	6.73	29.25	39.00
<b>041713b</b>	51.57	0.78	11.59	4	6.73	29.25	39.00
<b>Sección 4</b>							
<b>041714a</b>	27.54	0.34	4.94	2	6.88	39.00	39.00
<b>041714b</b>	31.37	0.91	13.23	4	6.88	39.00	39.00
<b>041714c</b>	34.61	1.47	21.37	4	6.88	39.00	39.00
<b>Sección 5</b>							
<b>041715a</b>	23.26	0.39	5.52	1	7.06	108.00	39.00
<b>041715b</b>	24.15	0.84	11.90	0	7.06	108.00	39.00
<b>041715c</b>	24.58	1.48	20.96	0	7.06	108.00	39.00

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, Q = 4 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>041703a</b>	37.48	0.29	4.43	4	6.55	42.2	37.5
<b>041703b</b>	46.14	0.69	10.53	3	6.55	42.2	37.5
<b>Sección 4</b>							
<b>041704a</b>	27.54	0.32	4.79	1	6.68	51.5	37.5
<b>041704b</b>	28.96	0.79	11.83	0	6.68	51.5	37.5
<b>041704c</b>	28.63	1.10	16.47	0	6.68	51.5	37.5
<b>Sección 5</b>							
<b>041705a</b>	22.90	0.30	4.42	0	6.78	116	37.5
<b>041705b</b>	25.61	0.97	14.31	0	6.78	116	37.5
<b>041705c</b>	25.90	1.30	19.17	0	6.78	116	37.5

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 28 cm de compuerta, Q = 4 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>041723a</b>	33.39	0.33	5.19	3	6.36	51.325	31.1
<b>041723b</b>	39.64	0.60	9.43	3	6.36	51.325	31.1
<b>Sección 4</b>							
<b>041724a</b>	23.52	0.39	6.01	0	6.49	59.1	31.1
<b>041724b</b>	25.71	0.73	11.25	0	6.49	59.1	31.1
<b>041724c</b>	27.59	0.94	14.48	1	6.49	59.1	31.1
<b>Sección 5</b>							
<b>041725a</b>	22.96	0.35	5.34	0	6.56	100.5	31.1
<b>041725b</b>	25.02	0.75	11.43	0	6.56	100.5	31.1
<b>041725c</b>	25.21	1.08	16.46	0	6.56	100.5	31.1
<b>041725d</b>	25.19	1.27	19.36	1	6.56	100.5	31.1

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 56 cm de compuerta, Q = 4 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>041733a</b>	27.15	0.39	6.70	1	5.82	75.73	26.30
<b>041733b</b>	36.47	0.92	15.81	4	5.82	75.73	26.30
<b>Sección 4</b>							
<b>041734a</b>	13.21	0.34	5.57	1	6.10	82.30	26.30
<b>041734b</b>	24.16	0.78	12.79	1	6.10	82.30	26.30
<b>041734c</b>	30.57	1.14	18.69	2	6.10	82.30	26.30
<b>Sección 5</b>							
<b>041735a</b>	24.94	0.37	5.96	0	6.21	103.00	26.30
<b>041735b</b>	25.32	0.79	12.72	0	6.21	103.00	26.30
<b>041735c</b>	25.21	1.12	18.04	0	6.21	103.00	26.30

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, Q = 5 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
052213a	38.07	0.34	5.79	1	5.87	27.75	37.00
052213b	53.76	0.71	12.10	1	5.87	27.75	37.00
052213c	56.97	1.35	23.00	4	5.87	27.75	37.00
<b>Sección 4</b>							
052214a	26.42	0.27	4.03	4	6.70	37.00	37.00
052214b	32.27	0.82	12.24	2	6.70	37.00	37.00
052214c	37.68	1.67	24.93	1	6.70	37.00	37.00
<b>Sección 5</b>							
052215a	28.77	0.41	6.01	0	6.82	107.00	37.00
052215b	29.38	0.73	10.70	0	6.82	107.00	37.00
052215c	30.04	1.00	14.66	0	6.82	107.00	37.00

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, Q = 5 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
052203a	46.55	0.44	6.89	1	6.39	39.13	33.50
052203b	57.11	0.81	12.68	1	6.39	39.13	33.50
052203c	59.39	1.17	18.31	2	6.39	39.13	33.50
<b>Sección 4</b>							
052204a	49.09	0.42	6.29	1	6.68	47.50	33.50
052204b	45.31	0.86	12.87	0	6.68	47.50	33.50
052204c	46.12	1.21	18.11	1	6.68	47.50	33.50
052204d	46.79	1.65	24.70	3	6.68	47.50	33.50
<b>Sección 5</b>							
052205a	27.98	0.31	4.61	0	6.73	105.25	33.50
052205b	30.59	0.82	12.18	0	6.73	105.25	33.50
052205c	30.39	1.38	20.51	0	6.73	105.25	33.50
052205d	30.10	1.87	27.79	0	6.73	105.25	33.50

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 28 cm de compuerta, Q = 5 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>052223a</b>	47.63	0.40	6.17	1	6.48	52.75	33.00
<b>052223b</b>	51.82	0.92	14.20	2	6.48	52.75	33.00
<b>Sección 4</b>							
<b>052224a</b>	30.71	0.35	5.26	1	6.66	61.00	33.00
<b>052224b</b>	37.78	0.75	11.26	1	6.66	61.00	33.00
<b>052224c</b>	36.77	1.29	19.37	1	6.66	61.00	33.00
<b>Sección 5</b>							
<b>052225a</b>	30.00	0.40	5.95	0	6.72	119.00	33.00
<b>052225b</b>	31.24	0.92	13.69	0	6.72	119.00	33.00
<b>052225c</b>	30.70	1.38	20.54	1	6.72	119.00	33.00

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 56 cm de compuerta, Q = 5 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>052233a</b>	38.28	0.37	5.95	2	6.22	77.38	28.50
<b>052233b</b>	52.00	0.84	13.50	2	6.22	77.38	28.50
<b>Sección 4</b>							
<b>052234a</b>	30.03	0.36	5.65	1	6.37	84.50	28.50
<b>052234b</b>	37.70	0.83	13.03	1	6.37	84.50	28.50
<b>052234c</b>	42.02	1.34	21.04	0	6.37	84.50	28.50
<b>Sección 5</b>							
<b>052235a</b>	27.67	0.36	5.45	0	6.60	130.70	28.50
<b>052235b</b>	31.37	0.83	12.58	0	6.60	130.70	28.50
<b>052235c</b>	31.15	1.25	18.94	0	6.60	130.70	28.50
<b>052235d</b>	31.03	1.42	21.52	0	6.60	130.70	28.50

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, Q = 6 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 2</b>							
<b>062412a</b>	73.85	0.33	5.11	2	6.46	21.25	42.50
<b>062112b</b>	70.66	0.84	13.00	4	6.46	21.25	42.50
<b>Sección 3</b>							
<b>062413a</b>	45.61	0.36	4.77	1	7.54	31.88	42.50
<b>062413b</b>	52.98	0.91	12.07	2	7.54	31.88	42.50
<b>062413c</b>	56.93	1.56	20.69	2	7.54	31.88	42.50
<b>062413d</b>	57.69	1.90	25.20	4	7.54	31.88	42.50
<b>Sección 4</b>							
<b>062414a</b>	28.29	0.38	4.83	0	7.86	42.50	42.50
<b>062414b</b>	33.02	0.91	11.58	0	7.86	42.50	42.50
<b>062414c</b>	38.62	1.67	21.25	0	7.86	42.50	42.50
<b>062414d</b>	40.64	2.16	27.48	1	7.86	42.50	42.50
<b>062414e</b>	40.69	2.76	35.11	1	7.86	42.50	42.50
<b>Sección 5</b>							
<b>062415a</b>	27.40	0.34	4.30	0	7.90	109.50	42.50
<b>062115b</b>	31.34	0.93	11.77	0	7.90	109.50	42.50
<b>062115c</b>	32.22	1.80	22.78	0	7.90	109.50	42.50
<b>062115d</b>	32.22	2.39	30.25	1	7.90	109.50	42.50
<b>062115e</b>	31.67	2.92	36.96	1	7.90	109.50	42.50

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, Q = 6 m <sup>3</sup> /h							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 3</b>							
062403a	55.57	0.42	5.67	4	7.41	42.25	37.50
062403b	60.95	0.91	12.28	4	7.41	42.25	37.50
062403c	61.10	1.56	21.05	4	7.41	42.25	37.50
<b>Sección 4</b>							
062404a	35.49	0.34	4.45	0	7.64	51.50	37.50
062404b	42.36	0.86	11.26	0	7.64	51.50	37.50
062404c	45.70	1.59	20.81	0	7.64	51.50	37.50
062404d	51.74	2.27	29.71	4	7.64	51.50	37.50
<b>Sección 5</b>							
062405a	29.61	0.37	4.82	0	7.68	114.00	37.50
062105b	31.99	0.85	11.07	0	7.68	114.00	37.50
062105c	32.38	1.47	19.14	1	7.68	114.00	37.50
062105d	32.69	2.05	26.69	1	7.68	114.00	37.50
062105e	32.21	2.59	33.72	1	7.68	114.00	37.50

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 28 cm de compuerta, Q = 6 m <sup>3</sup> /h							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 3</b>							
062423a	27.07	0.28	3.98	3	7.04	54.63	35.50
062423b	53.36	0.73	10.37	4	7.04	54.63	35.50
062423c	55.26	1.21	17.19	4	7.04	54.63	35.50
062423d	54.40	1.67	23.72	4	7.04	54.63	35.50
<b>Sección 4</b>							
062424a	30.76	0.35	4.68	0	7.48	63.50	35.50
062424b	37.29	0.84	11.23	0	7.48	63.50	35.50
062424c	43.03	1.36	18.18	1	7.48	63.50	35.50
062424d	46.90	1.99	26.60	1	7.48	63.50	35.50
<b>Sección 5</b>							
062125a	32.21	0.92	12.11	0	7.60	124.25	35.50
062125b	32.51	1.36	17.89	0	7.60	124.25	35.50
062125c	33.03	1.81	23.82	1	7.60	124.25	35.50
062125d	32.76	2.29	30.13	1	7.60	124.25	35.50

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 56 cm de compuerta, Q = 6 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>062433a</b>	37.89	0.38	5.31	4	7.16	81.88	34.50
<b>062433b</b>	43.74	0.91	12.71	4	7.16	81.88	34.50
<b>062433c</b>	48.57	1.34	18.72	4	7.16	81.88	34.50
<b>Sección 4</b>							
<b>062434a</b>	29.54	0.33	4.53	2	7.29	90.50	34.50
<b>062434b</b>	34.88	0.82	11.25	1	7.29	90.50	34.50
<b>062434c</b>	39.12	1.55	21.26	0	7.29	90.50	34.50
<b>062434d</b>	38.70	1.85	25.38	4	7.29	90.50	34.50
<b>Sección 5</b>							
<b>062435a</b>	29.28	0.33	4.44	0	7.43	130.50	34.50
<b>062135b</b>	32.50	0.78	10.50	3	7.43	130.50	34.50
<b>062135c</b>	32.66	1.27	17.09	0	7.43	130.50	34.50
<b>062135d</b>	32.78	1.95	26.24	0	7.43	130.50	34.50
<b>062135e</b>	32.78	2.27	30.55	4	7.43	130.50	34.50

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, Q = 8 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 2</b>							
<b>083112a</b>	80.82	0.35	4.96	1	7.06	24.00	48.00
<b>083112b</b>	88.47	0.70	9.92	1	7.06	24.00	48.00
<b>083112c</b>	49.65	1.64	23.23	4	7.06	24.00	48.00
<b>Sección 3</b>							
<b>083113a</b>	45.68	0.34	4.14	0	8.21	36.00	48.00
<b>083113b</b>	56.11	0.81	9.87	1	8.21	36.00	48.00
<b>083113c</b>	62.28	1.54	18.76	1	8.21	36.00	48.00
<b>083113d</b>	60.38	2.46	29.96	2	8.21	36.00	48.00
<b>083113e</b>	54.90	2.99	36.42	2	8.21	36.00	48.00
<b>Sección 4</b>							
<b>083114a</b>	29.83	0.38	4.36	1	8.71	48.00	48.00
<b>083114b</b>	33.33	0.93	10.68	0	8.71	48.00	48.00
<b>083114c</b>	37.65	1.58	18.14	1	8.71	48.00	48.00
<b>083114d</b>	40.83	2.43	27.90	0	8.71	48.00	48.00
<b>083114e</b>	41.28	3.11	35.71	0	8.71	48.00	48.00
<b>083114f</b>	40.62	3.86	44.32	1	8.71	48.00	48.00
<b>Sección 5</b>							
<b>083115a</b>	33.77	0.37	4.08	0	9.06	112.50	48.00
<b>083115b</b>	35.29	1.04	11.48	0	9.06	112.50	48.00
<b>083115c</b>	36.25	1.98	21.85	0	9.06	112.50	48.00
<b>083115d</b>	36.47	2.76	30.46	0	9.06	112.50	48.00
<b>083115e</b>	34.29	3.37	37.20	0	9.06	112.50	48.00
<b>083115f</b>	36.23	4.01	44.26	0	9.06	112.50	48.00



<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, Q = 8 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 2</b>							
<b>083102a</b>	65.36	0.36	4.83	1	7.46	35.75	43.50
<b>083102b</b>	77.86	1.04	13.94	3	7.46	35.75	43.50
<b>Sección 3</b>							
<b>083103a</b>	50	0.28	3.34	0	8.39	46.63	43.50
<b>083103b</b>	59.79	0.87	10.37	1	8.39	46.63	43.50
<b>083103c</b>	62.62	1.63	19.43	1	8.39	46.63	43.50
<b>083103d</b>	64.94	1.98	23.60	1	8.39	46.63	43.50
<b>083103e</b>	58.46	2.75	32.78	1	8.39	46.63	43.50
<b>Sección 4</b>							
<b>083104a</b>	37.19	0.32	3.67	0	8.72	57.50	43.50
<b>083104b</b>	44.41	0.99	11.35	0	8.72	57.50	43.50
<b>083104c</b>	50.02	1.73	19.84	1	8.72	57.50	43.50
<b>083104d</b>	51.16	2.31	26.49	1	8.72	57.50	43.50
<b>083104e</b>	48.53	3.09	35.44	0	8.72	57.50	43.50
<b>083104f</b>	43.43	3.62	41.51	0	8.72	57.50	43.50
<b>Sección 5</b>							
<b>083105a</b>	34.76	0.32	3.62	0	8.84	117.50	43.50
<b>083105b</b>	36.72	1.08	12.22	0	8.84	117.50	43.50
<b>083105c</b>	37.60	1.78	20.14	0	8.84	117.50	43.50
<b>083105d</b>	38.17	2.64	29.86	0	8.84	117.50	43.50
<b>083105e</b>	37.26	3.29	37.22	0	8.84	117.50	43.50
<b>083105f</b>	36.27	3.73	42.19	0	8.84	117.50	43.50

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 28 cm de compuerta, Q = 8 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 2</b>							
<b>083122a</b>	66.38	0.49	6.82	1	7.19	47.50	39.00
<b>083122b</b>	69.47	0.99	13.77	2	7.19	47.50	39.00
<b>Sección 3</b>							
<b>083123a</b>	52.99	0.35	4.43	0	7.90	57.25	39.00
<b>083123b</b>	63.61	0.91	11.52	1	7.90	57.25	39.00
<b>083123c</b>	66.48	1.64	20.76	0	7.90	57.25	39.00
<b>083123d</b>	65.08	2.06	26.08	1	7.90	57.25	39.00
<b>083123e</b>	58.48	2.75	34.81	1	7.90	57.25	39.00
<b>Sección 4</b>							
<b>083124a</b>	41.74	0.32	3.76	0	8.50	67.00	39.00
<b>083124b</b>	46.46	0.95	11.18	0	8.50	67.00	39.00
<b>083124c</b>	50.92	1.61	18.94	1	8.50	67.00	39.00
<b>083124d</b>	51.93	2.49	29.29	1	8.50	67.00	39.00
<b>083124e</b>	48.80	3.15	37.06	1	8.50	67.00	39.00
<b>Sección 5</b>							
<b>083125a</b>	34.99	0.35	4.00	0	8.76	122.00	39.00
<b>083125b</b>	36.91	0.85	9.70	0	8.76	122.00	39.00
<b>083125c</b>	37.54	1.48	16.89	0	8.76	122.00	39.00
<b>083125d</b>	38.37	2.31	26.37	0	8.76	122.00	39.00
<b>083125e</b>	36.52	3.32	37.90	0	8.76	122.00	39.00

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 56 cm de compuerta, Q = 8 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 2</b>							
<b>083132a</b>	57.76	0.37	5.13	1	7.21	74.00	36.00
<b>083132b</b>	65.68	0.98	13.59	1	7.21	74.00	36.00
<b>Sección 3</b>							
<b>083133a</b>	42.66	0.33	4.10	0	8.04	83.00	36.00
<b>083133b</b>	56.51	1.00	12.44	0	8.04	83.00	36.00
<b>083133c</b>	60.49	1.62	20.15	1	8.04	83.00	36.00
<b>083133d</b>	64.63	2.37	29.48	0	8.04	83.00	36.00
<b>Sección 4</b>							
<b>083134a</b>	40.21	0.36	4.28	0	8.41	92.00	36.00
<b>083134b</b>	43.67	0.81	9.63	0	8.41	92.00	36.00
<b>083134c</b>	50.07	1.72	20.45	0	8.41	92.00	36.00
<b>083134d</b>	53.74	2.60	30.92	0	8.41	92.00	36.00
<b>Sección 5</b>							
<b>083135a</b>	36.89	0.38	4.41	0	8.61	133.50	36.00
<b>083135b</b>	38.57	1.03	11.96	0	8.61	133.50	36.00
<b>083135c</b>	39.88	1.77	20.56	0	8.61	133.50	36.00
<b>083135d</b>	40.19	2.76	32.06	0	8.61	133.50	36.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 2</b>							
103512a	85.60	0.42	4.67	1	8.99	33.00	66.00
103512b	88.43	0.96	10.68	3	8.99	33.00	66.00
<b>Sección 3</b>							
103513a	43.96	0.45	4.39	0	10.25	48.50	66.00
103513b	48.37	0.98	9.56	0	10.25	48.50	66.00
103513c	51.46	1.67	16.29	0	10.25	48.50	66.00
103513d	55.38	2.39	23.32	1	10.25	48.50	66.00
103513e	54.16	3.14	30.63	1	10.25	48.50	66.00
103513f	52.53	3.69	36.00	1	10.25	48.50	66.00
<b>Sección 4</b>							
103514a	37.94	0.50	4.77	0	10.48	66.00	66.00
103514b	39.13	0.99	9.45	0	10.48	66.00	66.00
103514c	40.08	1.63	15.55	0	10.48	66.00	66.00
103514d	41.66	2.39	22.81	0	10.48	66.00	66.00
103514e	42.18	3.45	32.92	0	10.48	66.00	66.00
103514f	44.36	4.15	39.60	1	10.48	66.00	66.00
103514f	43.89	4.81	45.90	1	10.48	66.00	66.00
<b>Sección 5</b>							
103514a	36.74	0.35	3.34	0	10.48	121.50	66.00
103514b	38.12	1.14	10.88	0	10.48	121.50	66.00
103514c	38.39	1.96	18.70	0	10.48	121.50	66.00
103514d	38.44	2.49	23.76	0	10.48	121.50	66.00
103514e	38.27	3.50	33.40	0	10.48	121.50	66.00
103514f	38.86	4.29	40.94	0	10.48	121.50	66.00
103514g	38.75	5.01	47.81	0	10.48	121.50	66.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 1</b>							
103501a	77.97	0.44	6.29	1	7.00	30.00	64.00
103501b	64.44	1.24	17.71	1	7.00	30.00	64.00
103501c	47.17	1.95	27.86	1	7.00	30.00	64.00
<b>Sección 2</b>							
103502a	64.13	0.58	5.91	1	9.81	46.00	64.00
103502b	49.56	1.48	15.09	0	9.81	46.00	64.00
103502c	40.06	2.44	24.87	0	9.81	46.00	64.00
<b>Sección 3</b>							
103503a	49.81	0.50	4.90	1	10.21	62.00	64.00
103503b	45.17	1.22	11.95	1	10.21	62.00	64.00
103503c	36.48	2.19	21.45	1	10.21	62.00	64.00
103503d	24.94	3.10	30.36	0	10.21	62.00	64.00
103503e	4.83	4.34	42.51	0	10.21	62.00	64.00
<b>Sección 4</b>							
103504a	39.08	0.76	7.38	0	10.30	78.00	64.00
103504b	41.67	1.62	15.73	0	10.30	78.00	64.00
103504c	44.78	2.40	23.30	0	10.30	78.00	64.00
103504d	44.34	3.38	32.82	0	10.30	78.00	64.00
103504e	48.75	4.12	40.00	1	10.30	78.00	64.00
<b>Sección 5</b>							
103505a	37.61	0.55	5.26	0	10.46	127.50	64.00
103505b	38.87	1.41	13.48	0	10.46	127.50	64.00
103505c	39.44	2.32	22.18	0	10.46	127.50	64.00
103505d	39.31	2.85	27.25	0	10.46	127.50	64.00
103505e	39.87	3.21	30.69	0	10.46	127.50	64.00
103505f	39.81	3.83	36.62	0	10.46	127.50	64.00
103505g	40.06	4.22	40.34	0	10.46	127.50	64.00
103505h	40.23	4.77	45.60	0	10.46	127.50	64.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 28 cm de compuerta, Q = 10 m <sup>3</sup> /h							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 2</b>							
103522a	79.87	0.31	3.69	1	8.40	53.00	50.00
103522b	87.25	1.06	12.62	2	8.40	53.00	50.00
103522b	82.01	1.79	21.31	4	8.40	53.00	50.00
<b>Sección 3</b>							
103523a	53.22	0.26	2.70	0	9.62	65.50	50.00
103523b	61.12	1.04	10.81	0	9.62	65.50	50.00
103523c	65.76	1.70	17.67	1	9.62	65.50	50.00
103523d	68.30	2.22	23.08	1	9.62	65.50	50.00
103523e	65.07	2.93	30.46	1	9.62	65.50	50.00
103523f	58.67	3.84	39.92	1	9.62	65.50	50.00
<b>Sección 4</b>							
103524a	41.38	0.34	3.35	0	10.16	78.00	50.00
103524b	46.97	0.95	9.35	0	10.16	78.00	50.00
103524c	48.08	1.79	17.62	0	10.16	78.00	50.00
103524d	49.30	2.34	23.03	1	10.16	78.00	50.00
103524e	52.78	2.95	29.04	1	10.16	78.00	50.00
103524f	52.13	3.92	38.58	1	10.16	78.00	50.00
<b>Sección 5</b>							
103525a	37.82	0.30	2.91	0	10.32	128.00	50.00
103525b	39.36	1.22	11.82	0	10.32	128.00	50.00
103525c	40.13	2.01	19.48	0	10.32	128.00	50.00
103525d	40.54	2.86	27.71	0	10.32	128.00	50.00
103525e	40.03	3.43	33.24	0	10.32	128.00	50.00
103525f	40.81	4.69	45.45	0	10.32	128.00	50.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 56 cm de compuerta, Q = 10 m <sup>3</sup> /h							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 2</b>							
103502a	77.41	0.37	4.42	0	8.38	75.50	39.00
103502b	87.59	0.99	11.81	1	8.38	75.50	39.00
103502c	88.34	1.49	17.78	2	8.38	75.50	39.00
<b>Sección 3</b>							
103503a	55.66	0.32	3.53	0	9.06	85.25	39.00
103503b	64.84	0.82	9.05	1	9.06	85.25	39.00
103503c	70.00	1.62	17.88	1	9.06	85.25	39.00
103503d	73.03	2.21	24.39	1	9.06	85.25	39.00
103503e	68.60	2.95	32.56	1	9.06	85.25	39.00
<b>Sección 4</b>							
103504a	46.34	0.37	3.79	0	9.75	95.00	39.00
103504b	51.19	1.03	10.56	1	9.75	95.00	39.00
103504c	56.44	1.58	16.21	0	9.75	95.00	39.00
103504d	58.11	2.22	22.77	1	9.75	95.00	39.00
103504e	61.28	2.98	30.56	1	9.75	95.00	39.00
103504f	55.46	3.65	37.44	1	9.75	95.00	39.00
103504g	57.16	4.27	43.79	1	9.75	95.00	39.00
<b>Sección 5</b>							
103505a	39.23	0.33	3.24	0	10.20	136.00	39.00
103505b	40.93	1.09	10.69	0	10.20	136.00	39.00
103505c	41.74	1.81	17.75	0	10.20	136.00	39.00
103505d	42.46	2.55	25.00	0	10.20	136.00	39.00
103505e	43.13	3.26	31.96	0	10.20	136.00	39.00
103505f	43.19	3.88	38.04	0	10.20	136.00	39.00
103505g	42.54	4.72	46.27	0	10.20	136.00	39.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, Q = 12.25 m <sup>3</sup> /h							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 1</b>							
124501a	130.64	0.40	6.59	2	6.07	14.38	57.50
124501b	22.30	1.07	17.63	4	6.07	14.38	57.50
<b>Sección 2</b>							
124502a	94.63	0.46	5.05	1	9.11	28.75	57.50
124502b	99.81	1.06	11.64	2	9.11	28.75	57.50
124502c	57.12	1.79	19.65	4	9.11	28.75	57.50
<b>Sección 3</b>							
124503a	54.4	0.59	5.69	1	10.36	43.13	57.50
124503b	63.99	1.21	11.68	1	10.36	43.13	57.50
124503c	69.72	2.10	20.27	1	10.36	43.13	57.50
124503d	71.11	2.78	26.83	1	10.36	43.13	57.50
124502e	62.13	3.59	34.65	1	10.36	43.13	57.50
124503f	55.39	4.83	46.62	2	10.36	43.13	57.50
<b>Sección 4</b>							
124504a	41.90	0.52	4.77	0	10.91	57.50	57.50
124504b	44.90	1.13	10.36	0	10.91	57.50	57.50
124504c	48.87	2.04	18.70	0	10.91	57.50	57.50
124504d	47.86	2.87	26.31	0	10.91	57.50	57.50
124504e	48.86	3.83	35.11	1	10.91	57.50	57.50
124504f	51.17	4.66	42.71	1	10.91	57.50	57.50
124504g	48.66	5.61	51.42	1	10.91	57.50	57.50
<b>Sección 5</b>							
124505a	40.78	0.42	3.84	0	10.94	117.25	57.50
124505b	42.84	1.39	12.71	0	10.94	117.25	57.50
124505c	43.06	2.21	20.20	0	10.94	117.25	57.50
124505d	43.63	3.28	29.98	0	10.94	117.25	57.50
124505e	43.95	4.12	37.66	0	10.94	117.25	57.50
124505f	44.01	5.39	49.27	0	10.94	117.25	57.50
124505g	43.87	5.88	53.75	0	10.94	117.25	57.50



Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, $Q = 12.25 \text{ m}^3/\text{h}$							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 2</b>							
124502a	62.27	0.56	6.11	0	9.16	41.00	54.00
124502b	73.47	1.16	12.66	1	9.16	41.00	54.00
124502c	79.94	1.82	19.87	2	9.16	41.00	54.00
<b>Sección 3</b>							
124503a	56.02	0.63	6.13	0	10.28	54.50	54.00
124503b	48.25	1.07	10.41	0	10.28	54.50	54.00
124503c	66.14	1.75	17.02	0	10.28	54.50	54.00
124503d	66.79	2.28	22.18	1	10.28	54.50	54.00
124502e	63.08	2.87	27.92	0	10.28	54.50	54.00
124503f	60.62	3.46	33.66	1	10.28	54.50	54.00
124503g	63.18	4.15	40.37	1	10.28	54.50	54.00
<b>Sección 4</b>							
124504a	42.86	0.41	3.80	0	10.80	68.00	54.00
124504b	47.38	1.12	10.37	0	10.80	68.00	54.00
124504c	48.72	1.93	17.87	0	10.80	68.00	54.00
124504d	55.75	2.60	24.07	0	10.80	68.00	54.00
124504e	48.33	3.23	29.91	0	10.80	68.00	54.00
124504f	50.96	4.07	37.69	0	10.80	68.00	54.00
124504g	50.75	5.20	48.15	0	10.80	68.00	54.00
<b>Sección 5</b>							
124505a	44.59	0.42	3.88	0	10.82	122.50	54.00
124505b	46.44	1.11	10.26	0	10.82	122.50	54.00
124505c	47.67	1.88	17.38	0	10.82	122.50	54.00
124505d	46.81	2.51	23.20	0	10.82	122.50	54.00
124505e	47.45	3.09	28.56	0	10.82	122.50	54.00
124505f	48.25	3.71	34.29	0	10.82	122.50	54.00
124505g	47.17	4.34	40.11	0	10.82	122.50	54.00
124505h	47.98	5.06	46.77	0	10.82	122.50	54.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 28 cm de compuerta, $Q = 12.25 \text{ m}^3/\text{h}$							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 1</b>							
124521a	82.87	0.52	7.30	1	7.12	41.25	53.00
124521b	77.87	1.00	14.04	4	7.12	41.25	53.00
<b>Sección 2</b>							
124522a	70.49	0.51	5.42	0	9.41	54.50	53.00
124522b	82.61	1.09	11.58	1	9.41	54.50	53.00
124522c	83.22	2.06	21.89	1	9.41	54.50	53.00
<b>Sección 3</b>							
124523a	50.36	0.34	3.20	0	10.61	67.75	53.00
124523b	62.02	1.39	13.10	0	10.61	67.75	53.00
124523c	62.25	2.19	20.64	1	10.61	67.75	53.00
124523d	64.29	3.09	29.12	1	10.61	67.75	53.00
124522e	64.31	4.04	38.08	1	10.61	67.75	53.00
124523f	59.27	4.78	45.05	1	10.61	67.75	53.00
<b>Sección 4</b>							
124524a	46.84	0.29	2.73	0	10.61	81.00	53.00
124524b	52.38	1.25	11.78	0	10.61	81.00	53.00
124524c	55.62	2.12	19.98	0	10.61	81.00	53.00
124524d	55.99	3.16	29.78	0	10.61	81.00	53.00
124524e	57.26	4.03	37.98	0	10.61	81.00	53.00
124524f	53.66	5.21	49.10	1	10.61	81.00	53.00
<b>Sección 5</b>							
124525a	45.20	0.33	3.04	0	10.85	129.00	53.00
124525b	47.17	1.13	10.41	0	10.85	129.00	53.00
124525c	48.30	2.11	19.45	0	10.85	129.00	53.00
124525d	48.57	3.05	28.11	0	10.85	129.00	53.00
124525e	48.78	3.86	35.58	0	10.85	129.00	53.00
124525f	49.25	4.68	43.13	0	10.85	129.00	53.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 56 cm de compuerta, Q = 12.25 m <sup>3</sup> /h							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 2</b>							
124532a	74.46	0.40	4.22	0	9.47	78.00	44.00
124532b	81.45	0.72	7.60	0	9.47	78.00	44.00
124532c	83.42	1.19	12.57	1	9.47	78.00	44.00
<b>Sección 3</b>							
124533a	60.24	0.29	2.93	0	9.89	89.00	44.00
124533b	69.38	0.87	8.80	0	9.89	89.00	44.00
124533c	76.88	1.79	18.10	1	9.89	89.00	44.00
124533d	73.17	2.87	29.02	1	9.89	89.00	44.00
124532e	62.22	3.86	39.03	1	9.89	89.00	44.00
<b>Sección 4</b>							
124534a	54.76	0.33	3.24	0	10.18	100.00	44.00
124534b	60.31	1.21	11.89	0	10.18	100.00	44.00
124534c	66.76	2.34	22.99	0	10.18	100.00	44.00
124534d	66.34	3.11	30.55	0	10.18	100.00	44.00
124534e	62.70	4.29	42.14	1	10.18	100.00	44.00
<b>Sección 5</b>							
124535a	48.58	0.37	3.49	0	10.60	138.50	44.00
124535b	50.38	1.10	10.38	0	10.60	138.50	44.00
124535c	52.04	1.72	16.23	0	10.60	138.50	44.00
124535d	53.33	2.64	24.91	0	10.60	138.50	44.00
124535e	53.15	3.29	31.04	0	10.60	138.50	44.00
124535f	53.39	3.84	36.23	0	10.60	138.50	44.00
124535g	52.85	4.28	40.38	0	10.60	138.50	44.00
124535h	51.72	5.08	47.92	0	10.60	138.50	44.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, Q = 11.25 m <sup>3</sup> /h							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 2</b>							
114012a	76.79	0.50	5.60	0	8.93	35.00	70.00
114012b	87.47	1.30	14.56	1	8.93	35.00	70.00
114012c	79.26	1.95	21.84	4	8.93	35.00	70.00
<b>Sección 3</b>							
114013a	39.55	0.49	4.64	0	10.56	52.50	70.00
114013b	45.33	1.16	10.98	0	10.56	52.50	70.00
114013c	48.71	1.77	16.76	0	10.56	52.50	70.00
114013d	53.42	2.56	24.24	1	10.56	52.50	70.00
114013e	53.83	3.26	30.87	1	10.56	52.50	70.00
114013f	54.27	4.39	41.57	1	10.56	52.50	70.00
<b>Sección 4</b>							
114014a	39.60	0.49	4.52	0	10.84	70.00	70.00
114014b	41.21	1.31	12.08	0	10.84	70.00	70.00
114014c	43.14	2.00	18.45	0	10.84	70.00	70.00
114014d	43.80	2.68	24.72	0	10.84	70.00	70.00
114014e	44.18	3.37	31.09	0	10.84	70.00	70.00
114014f	45.98	3.94	36.35	1	10.84	70.00	70.00
114014g	46.56	4.64	42.80	1	10.84	70.00	70.00
<b>Sección 5</b>							
114015a	40.20	0.64	5.90	0	10.84	124.00	70.00
114015b	40.91	1.27	11.72	0	10.84	124.00	70.00
114015c	41.48	1.91	17.62	0	10.84	124.00	70.00
114015d	40.91	2.75	25.37	0	10.84	124.00	70.00
114015e	40.63	3.46	31.92	0	10.84	124.00	70.00
114015f	41.38	3.88	35.79	0	10.84	124.00	70.00
114015g	41.60	4.46	41.14	0	10.84	124.00	70.00
114015h	41.55	5.13	47.32	0	10.84	124.00	70.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, $Q = 11.25 \text{ m}^3/\text{h}$							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 1</b>							
114001a	114.82	0.45	6.52	2	6.90	29.00	60.00
<b>Sección 2</b>							
114002a	80.66	0.51	5.54	1	9.20	44.00	60.00
114002b	85.48	1.10	11.96	1	9.20	44.00	60.00
114002c	86.49	1.79	19.46	2	9.20	44.00	60.00
114002d	70.02	2.59	28.15	4	9.20	44.00	60.00
<b>Sección 3</b>							
114003a	49.14	0.43	4.16	1	10.34	59.00	60.00
114003b	55.39	1.23	11.90	0	10.34	59.00	60.00
114003c	59.66	1.90	18.38	0	10.34	59.00	60.00
114003d	61.35	2.51	24.27	1	10.34	59.00	60.00
114003e	57.92	3.38	32.69	1	10.34	59.00	60.00
114003f	61.10	4.18	40.43	1	10.34	59.00	60.00
<b>Sección 4</b>							
114004a	40.18	0.38	3.64	0	10.45	74.00	60.00
114004b	44.15	1.10	10.53	0	10.45	74.00	60.00
114004c	47.91	1.92	18.37	1	10.45	74.00	60.00
114004d	49.86	2.53	24.21	1	10.45	74.00	60.00
114004e	50.51	3.50	33.49	0	10.45	74.00	60.00
114004f	53.51	4.26	40.77	0	10.45	74.00	60.00
114004g	51.48	5.10	48.80	1	10.45	74.00	60.00
<b>Sección 5</b>							
114005a	40.87	0.38	3.58	0	10.62	125.50	60.00
114005b	42.20	1.25	11.77	0	10.62	125.50	60.00
114005c	42.89	1.97	18.55	0	10.62	125.50	60.00
114005d	43.47	2.79	26.27	0	10.62	125.50	60.00
114005e	42.56	3.54	33.33	0	10.62	125.50	60.00
114005f	44.32	4.46	42.00	0	10.62	125.50	60.00
114005g	43.63	5.23	49.25	0	10.62	125.50	60.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 28 cm de compuerta, Q = 11.25 m <sup>3</sup> /h							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 2</b>							
114022a	71.36	0.28	3.08	0	9.09	54.50	53.00
114022b	83.43	0.99	10.89	1	9.09	54.50	53.00
<b>Sección 3</b>							
114023a	52.69	0.26	2.56	0	10.14	67.75	53.00
114023b	56.21	0.84	8.28	0	10.14	67.75	53.00
114023c	60.60	1.88	18.54	1	10.14	67.75	53.00
114023d	66.58	2.57	25.35	1	10.14	67.75	53.00
114023e	58.39	3.45	34.02	1	10.14	67.75	53.00
114023f	55.77	4.73	46.65	1	10.14	67.75	53.00
<b>Sección 4</b>							
114024a	45.52	0.31	2.98	0	10.40	81.00	53.00
114024b	48.65	1.01	9.71	0	10.40	81.00	53.00
114024c	52.87	1.81	17.40	0	10.40	81.00	53.00
114024d	55.32	2.71	26.06	1	10.40	81.00	53.00
114024e	54.99	3.76	36.15	1	10.40	81.00	53.00
114024f	53.22	4.66	44.81	1	10.40	81.00	53.00
<b>Sección 5</b>							
114025a	41.94	0.41	3.85	0	10.66	129.00	53.00
114025b	43.27	1.32	12.38	0	10.66	129.00	53.00
114025c	44.52	2.04	19.14	0	10.66	129.00	53.00
114025d	44.56	3.16	29.64	0	10.66	129.00	53.00
114025e	44.92	4.26	39.96	0	10.66	129.00	53.00
114025f	44.98	4.83	45.31	0	10.66	129.00	53.00

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 56 cm de compuerta, Q = 11.25 m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 2</b>							
<b>114032a</b>	69.14	0.38	4.09	0	9.28	81.00	50.00
<b>114032b</b>	81.26	1.03	11.10	0	9.28	81.00	50.00
<b>114032c</b>	84.47	1.61	17.35	1	9.28	81.00	50.00
<b>Sección 3</b>							
<b>114033a</b>	50.82	0.26	2.59	1	10.03	93.50	50.00
<b>114033b</b>	58.53	0.96	9.57	1	10.03	93.50	50.00
<b>114033c</b>	65.41	1.75	17.45	1	10.03	93.50	50.00
<b>114033d</b>	64.16	2.87	28.61	1	10.03	93.50	50.00
<b>114033e</b>	56.86	3.38	33.70	1	10.03	93.50	50.00
<b>114033f</b>	62.50	4.17	41.58	1	10.03	93.50	50.00
<b>Sección 4</b>							
<b>114034a</b>	46.51	0.34	3.29	0	10.32	106.00	50.00
<b>114034b</b>	50.45	0.87	8.43	1	10.32	106.00	50.00
<b>114034c</b>	53.62	1.79	17.34	1	10.32	106.00	50.00
<b>114034d</b>	57.18	2.94	28.49	0	10.32	106.00	50.00
<b>114034e</b>	56.36	3.84	37.21	1	10.32	106.00	50.00
<b>114034f</b>	54.30	4.72	45.74	1	10.32	106.00	50.00
<b>Sección 5</b>							
<b>114035a</b>	43.31	0.39	3.73	0	10.46	141.50	50.00
<b>114035b</b>	45.09	1.27	12.14	0	10.46	141.50	50.00
<b>114035c</b>	46.56	2.62	25.05	0	10.46	141.50	50.00
<b>114035d</b>	45.33	3.58	34.23	0	10.46	141.50	50.00
<b>114035e</b>	46.89	4.58	43.79	0	10.46	141.50	50.00

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, Q = 10.5a m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>104613a</b>	49.19	0.63	7.44	0	8.47	23.00	46.00
<b>104613b</b>	64.74	1.58	18.65	1	8.47	23.00	46.00
<b>104613c</b>	72.09	2.24	26.45	1	8.47	23.00	46.00
<b>104613d</b>	69.28	2.91	34.36	1	8.47	23.00	46.00
<b>Sección 4</b>							
<b>104614a</b>	41.18	0.49	5.46	0	8.98	46.00	46.00
<b>104614b</b>	51.46	1.34	14.92	0	8.98	46.00	46.00
<b>104614c</b>	56.11	2.11	23.50	1	8.98	46.00	46.00
<b>104614d</b>	55.32	3.14	34.97	0	8.98	46.00	46.00
<b>Sección 5</b>							
<b>104615a</b>	42.43	0.62	6.79	0	9.13	111.50	46.00
<b>104615b</b>	43.55	1.14	12.49	0	9.13	111.50	46.00
<b>104615c</b>	44.87	2.27	24.86	0	9.13	111.50	46.00
<b>104615d</b>	44.55	2.92	31.98	0	9.13	111.50	46.00
<b>104615e</b>	40.01	3.63	39.76	1	9.13	111.50	46.00

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, Q = 10.5a m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 3</b>							
<b>104603a</b>	49.15	0.38	4.43	0	8.58	44.00	40.00
<b>104603b</b>	60.97	1.14	13.29	1	8.58	44.00	40.00
<b>104603c</b>	66.73	2.16	25.17	1	8.58	44.00	40.00
<b>104603d</b>	65.39	3.02	35.20	1	8.58	44.00	40.00
<b>Sección 4</b>							
<b>104604a</b>	45.33	0.31	3.48	0	8.92	54.00	40.00
<b>104604b</b>	51.63	1.01	11.32	0	8.92	54.00	40.00
<b>104604c</b>	54.69	1.69	18.95	1	8.92	54.00	40.00
<b>104604d</b>	57.63	2.54	28.48	0	8.92	54.00	40.00
<b>104604e</b>	51.36	3.52	39.46	0	8.92	54.00	40.00
<b>Sección 5</b>							
<b>104605a</b>	44.69	0.35	3.88	0	9.01	115.50	40.00
<b>104605b</b>	47.65	1.22	13.54	0	9.01	115.50	40.00
<b>104605c</b>	48.35	2.36	26.19	0	9.01	115.50	40.00
<b>104605d</b>	47.30	3.28	36.40	0	9.01	115.50	40.00



Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 28 cm de compuerta, $Q = 10.5a \text{ m}^3/\text{h}$							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 3</b>							
104623a	39.86	0.3	3.44	0	8.72	54.25	35.00
104623b	56.05	0.89	10.21	0	8.72	54.25	35.00
104623c	61.82	1.68	19.27	0	8.72	54.25	35.00
104623d	67.89	2.56	29.36	1	8.72	54.25	35.00
<b>Sección 4</b>							
104624a	40.39	0.38	4.25	0	8.95	63.00	35.00
104624b	49.63	0.84	9.39	0	8.95	63.00	35.00
104624c	54.73	1.78	19.89	1	8.95	63.00	35.00
104624d	57.68	2.67	29.83	1	8.95	63.00	35.00
<b>Sección 5</b>							
104625a	45.14	0.37	4.12	0	8.99	120.00	35.00
104625b	48.02	0.83	9.23	0	8.99	120.00	35.00
104625c	49.35	1.77	19.69	0	8.99	120.00	35.00
104625d	49.62	2.41	26.81	0	8.99	120.00	35.00
104625e	49.79	3.09	34.37	0	8.99	120.00	35.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 56 cm de compuerta, $Q = 10.5a \text{ m}^3/\text{h}$							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 3</b>							
104633a	52.94	0.49	5.76	0	8.50	78.50	30.00
104633b	69.73	1.08	12.71	0	8.50	78.50	30.00
104633c	77.82	1.89	22.24	1	8.50	78.50	30.00
104633d	67.57	2.54	29.88	1	8.50	78.50	30.00
<b>Sección 4</b>							
104634a	52.44	0.54	6.26	0	8.63	86.00	30.00
104634b	74.36	1.32	15.30	0	8.63	86.00	30.00
104634c	66.18	1.99	23.06	1	8.63	86.00	30.00
104634d	66.98	2.53	29.32	1	8.63	86.00	30.00
<b>Sección 5</b>							
104635a	48.48	0.49	5.59	0	8.76	131.50	30.00
104635b	51.31	1.18	13.47	0	8.76	131.50	30.00
104635c	52.12	1.72	19.63	0	8.76	131.50	30.00
104635d	52.49	2.29	26.14	1	8.76	131.50	30.00
104635e	52.53	2.90	33.11	0	8.76	131.50	30.00

<b>Datos filtrados de resalto hidráulico libre al pie de compuerta, Q = 10.5b m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>Archivo</b>	<b>ux (cm/s)</b>	<b>Distancia al límite (cm)</b>	<b>% calado</b>	<b>Filtros</b>	<b>Calado superior</b>	<b>x</b>	<b>Lj</b>
<b>Sección 2</b>							
<b>105612a</b>	86.07	0.41	5.59	0	7.34	18.00	36.00
<b>105612b</b>	87.61	1.04	14.17	0	7.34	18.00	36.00
<b>105612c</b>	86.40	2.10	28.61	0	7.34	18.00	36.00
<b>Sección 3</b>							
<b>105613a</b>	70.19	0.56	7.24	0	7.73	27.00	36.00
<b>105613b</b>	77.77	1.25	16.17	0	7.73	27.00	36.00
<b>105613c</b>	77.65	1.84	23.80	1	7.73	27.00	36.00
<b>105613d</b>	75.99	2.53	32.73	1	7.73	27.00	36.00
<b>105613e</b>	63.28	3.12	40.36	1	7.73	27.00	36.00
<b>Sección 4</b>							
<b>105614a</b>	57.34	0.46	5.91	0	7.78	36.00	36.00
<b>105614b</b>	67.87	1.20	15.42	1	7.78	36.00	36.00
<b>105614c</b>	71.52	2.04	26.22	1	7.78	36.00	36.00
<b>105614d</b>	69.82	2.83	36.38	1	7.78	36.00	36.00
<b>105614e</b>	57.63	3.43	44.09	0	7.78	36.00	36.00
<b>Sección 5</b>							
<b>105615a</b>	45.05	0.58	7.41	0	7.83	106.50	36.00
<b>105615b</b>	46.35	1.06	13.54	0	7.83	106.50	36.00
<b>105615c</b>	47.67	1.84	23.50	0	7.83	106.50	36.00
<b>105615d</b>	48.23	2.50	31.93	0	7.83	106.50	36.00
<b>105615e</b>	48.55	3.06	39.08	0	7.83	106.50	36.00

Datos filtrados de resalto hidráulico libre a 14 cm de compuerta, $Q = 10.5b \text{ m}^3/\text{h}$							
Archivo	ux (cm/s)	Distancia al límite (cm)	% calado	Filtros	Calado superior	x	Lj
<b>Sección 2</b>							
105602a	61.66	0.43	5.86	0	7.34	28.00	28.00
105602b	74.93	1.15	15.67	0	7.34	28.00	28.00
<b>Sección 3</b>							
105603a	58.65	0.57	7.54	0	7.56	35.00	28.00
105603b	64.48	1.20	15.87	0	7.56	35.00	28.00
105603c	72.10	2.09	27.65	1	7.56	35.00	28.00
<b>Sección 4</b>							
105604a	52.96	0.33	4.37	0	7.56	42.00	28.00
105604b	58.77	1.22	16.14	0	7.56	42.00	28.00
105604c	65.05	2.20	29.10	0	7.56	42.00	28.00
105604d	67.63	2.74	36.24	2	7.56	42.00	28.00
<b>Sección 5</b>							
105605a	50.53	0.35	4.63	1	7.56	109.50	28.00
105605b	54.76	1.12	14.81	1	7.56	109.50	28.00
105605c	55.41	1.61	21.30	0	7.56	109.50	28.00
105605d	53.43	2.46	32.54	0	7.56	109.50	28.00



## **ANEXO 2.**

# **GRÁFICAS DE VELOCIDAD FRENTE CALADO**



Una vez recogidos en el anexo anterior los valores de velocidad medidos en cada punto de muestreo, se representan a continuación los perfiles de velocidad clasificados por secciones muestreadas y caudal de trabajo para cada resalto hidráulico analizado.

El muestreo se realizó usando una frecuencia de 5 Hz y a continuación se filtraron las muestras que requiriesen esta operación para eliminar datos negativos y homogeneizar la serie inicial.

Como se observa a continuación, en determinadas secciones, tan solo se han podido muestrear puntos en algunos resaltos, ya que para los demás tipos de resaltos fue imposible realizar medición alguna debido a que el calado en esa sección era insuficiente. El porcentaje de calado hasta el que se han podido obtener medidas es variable.

Las velocidades más altas se localizan, lógicamente, al inicio del resalto, debido fundamentalmente a la influencia del chorro principal saliente de la compuerta, y por este mismo motivo se localizan a porcentajes de calado bajos. Se observa generalmente un descenso rápido de las velocidades con el incremento del calado.

Igualmente, observamos que al muestrear secciones más alejadas de la compuerta, y aún dentro del seno del resalto, las velocidades van siendo cada vez más bajas conforme nos encontramos a mayor distancia de la compuerta. Esta reducción de velocidades indica el efecto de la disipación de energía dentro del resalto hidráulico. En estas secciones más alejadas de la compuerta el descenso de las velocidades es mucho más paulatino conforme aumenta el porcentaje del calado que en la sección inicial localizada inmediatamente aguas debajo de la compuerta.

Por último, observamos que en la sección denominada intermedia y localizada aguas abajo de la compuerta, la distribución de velocidades es muy uniforme, y la reducción de velocidades con respecto a las secciones iniciales es muy notable, lo que confirma de nuevo la disipación de energía producida dentro del resalto hidráulico.

En el caudal de  $10.5 \text{ m}^3/\text{h}$  con menor Froude, sólo hemos podido medir dos resaltos, pues al tener un Froude muy cercano a 1, el resalto es muy inestable, y el equipo no permite medir los desplazamientos de 28 y 56 cm.

En muchos caudales no se han podido completar los perfiles de velocidad, por la ya comentada, falta de calado, así para muchos cálculos hemos tenido que extrapolar valores.

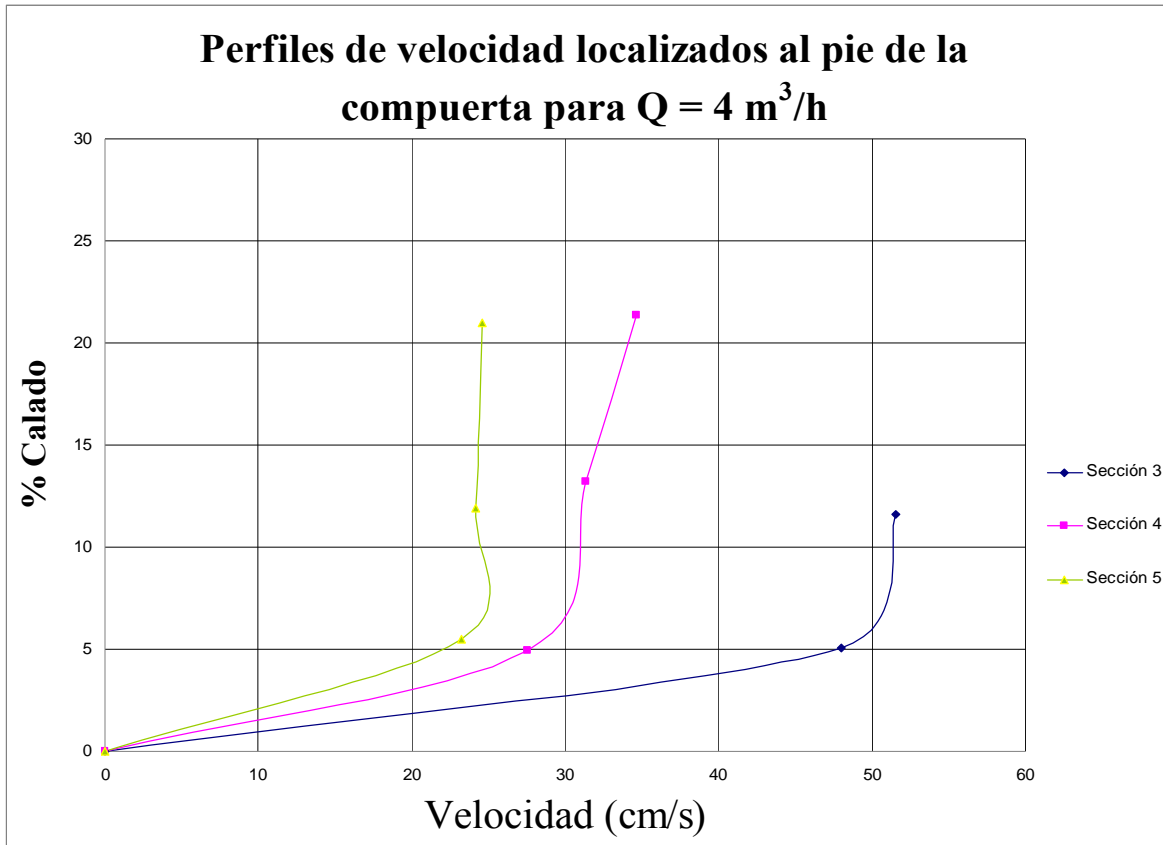


Figura 1

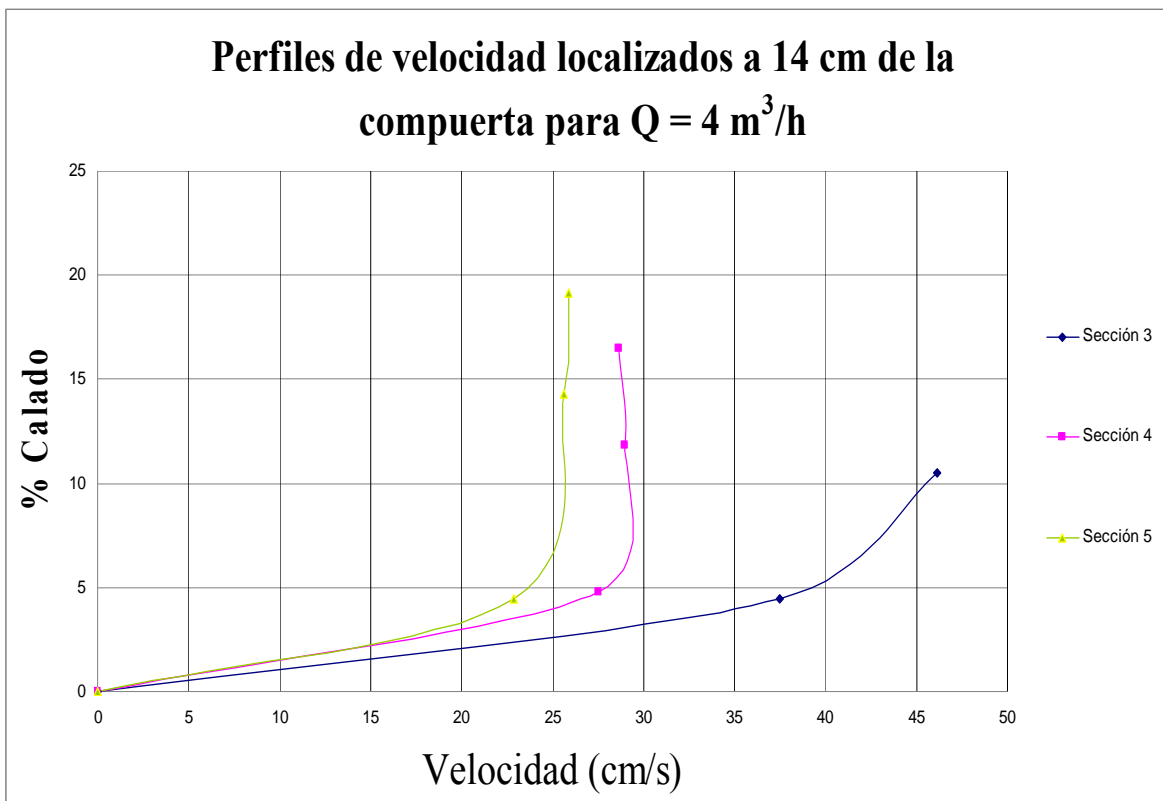


Figura 2



**Perfiles de velocidad localizados a 28 cm de la compuerta para  $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$**

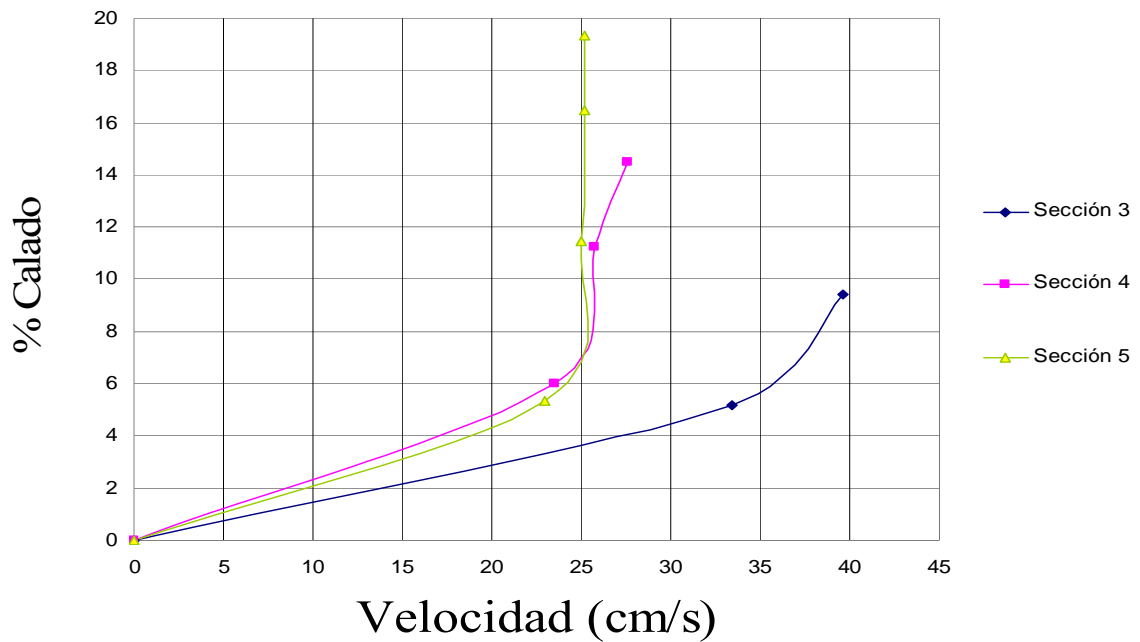


Figura 3

**Perfiles de velocidad localizados a 56 cm de la compuerta para  $Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$**

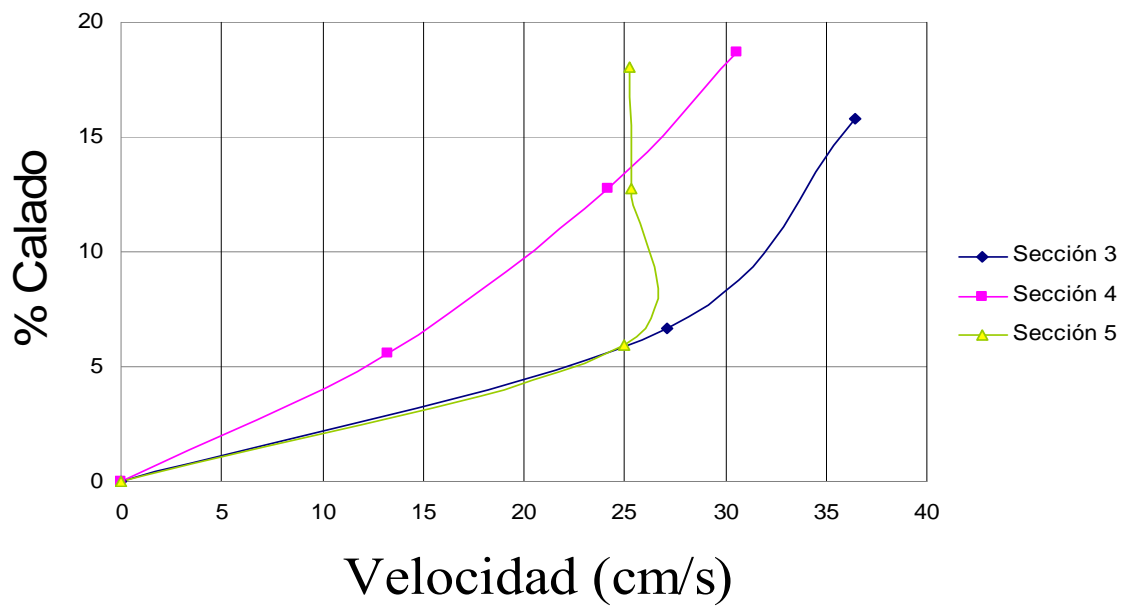


Figura 4

### Perfiles de velocidad localizados al pie de la compuerta para $Q = 5 \text{ m}^3/\text{h}$

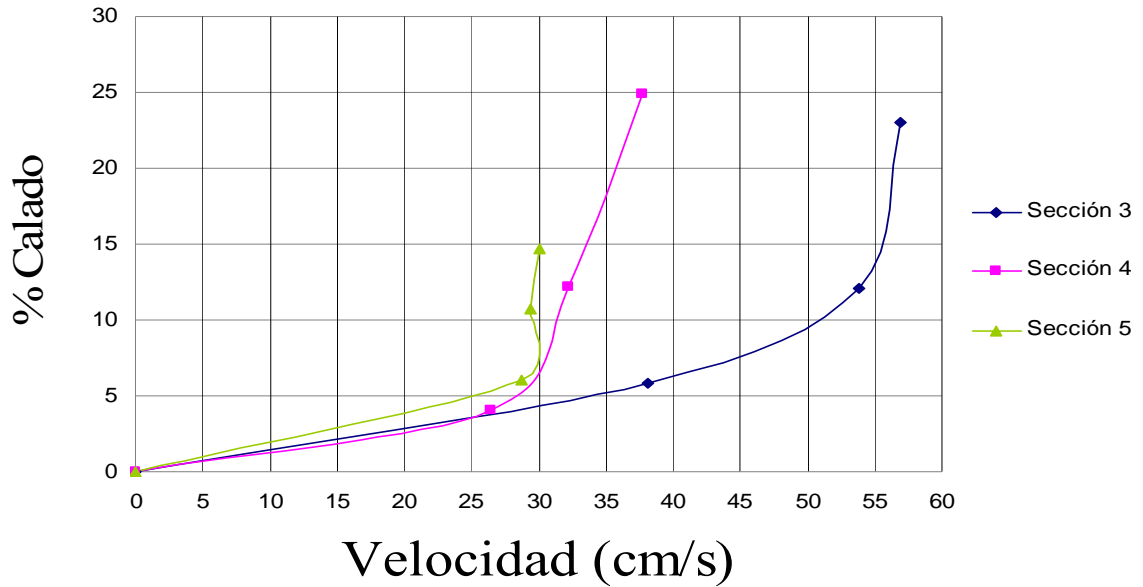


Figura 5

### Perfiles de velocidad localizados a 14 cm de la compuerta para $Q = 5 \text{ m}^3/\text{h}$

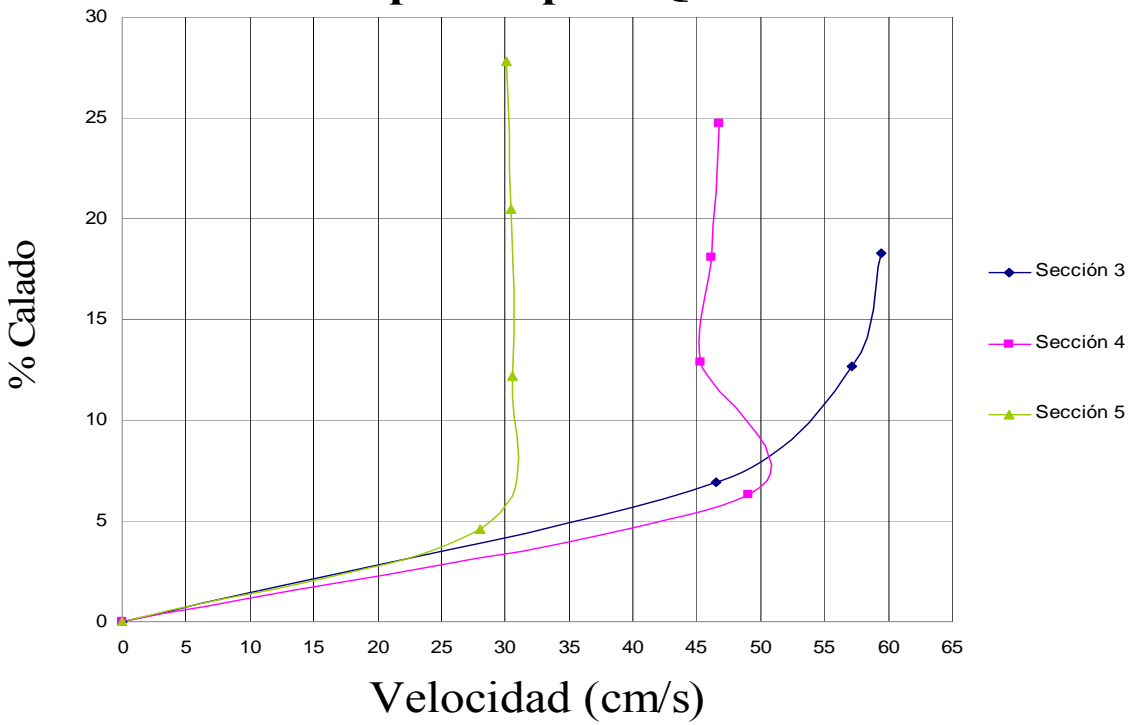


Figura 6

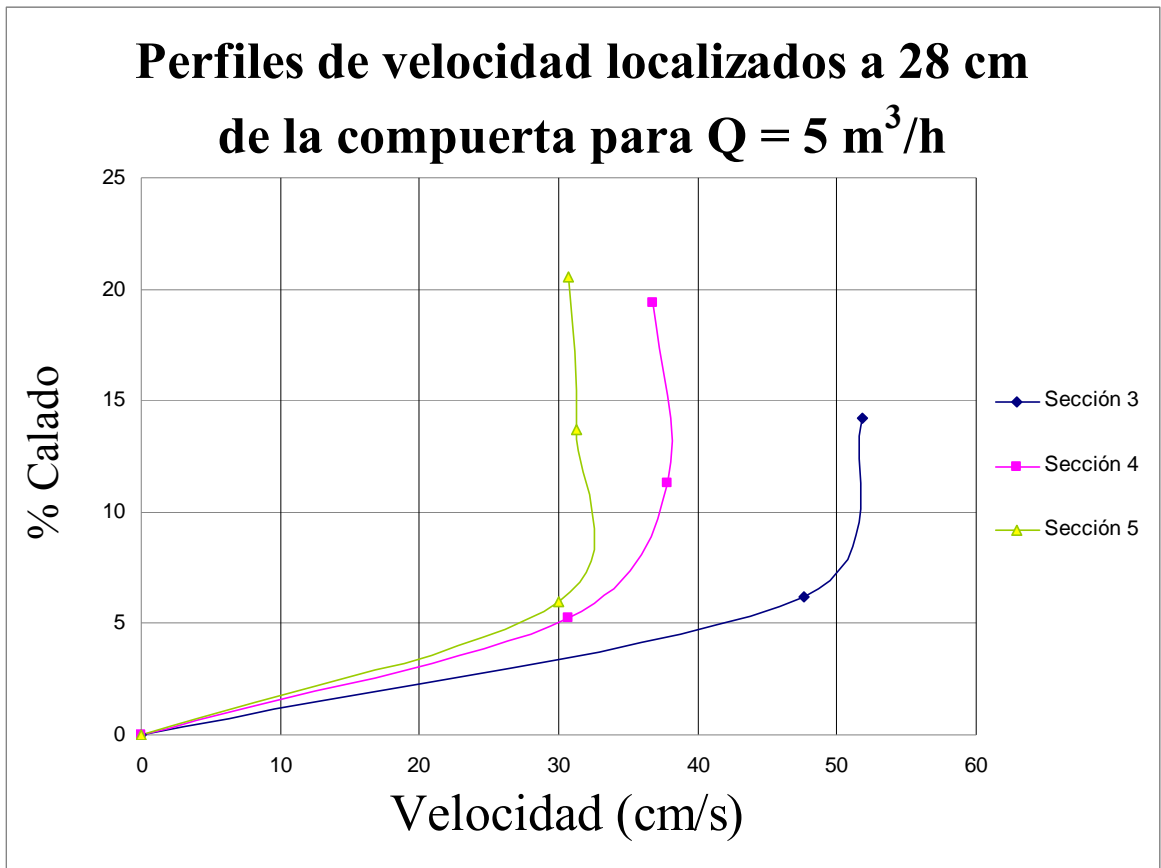


Figura 7

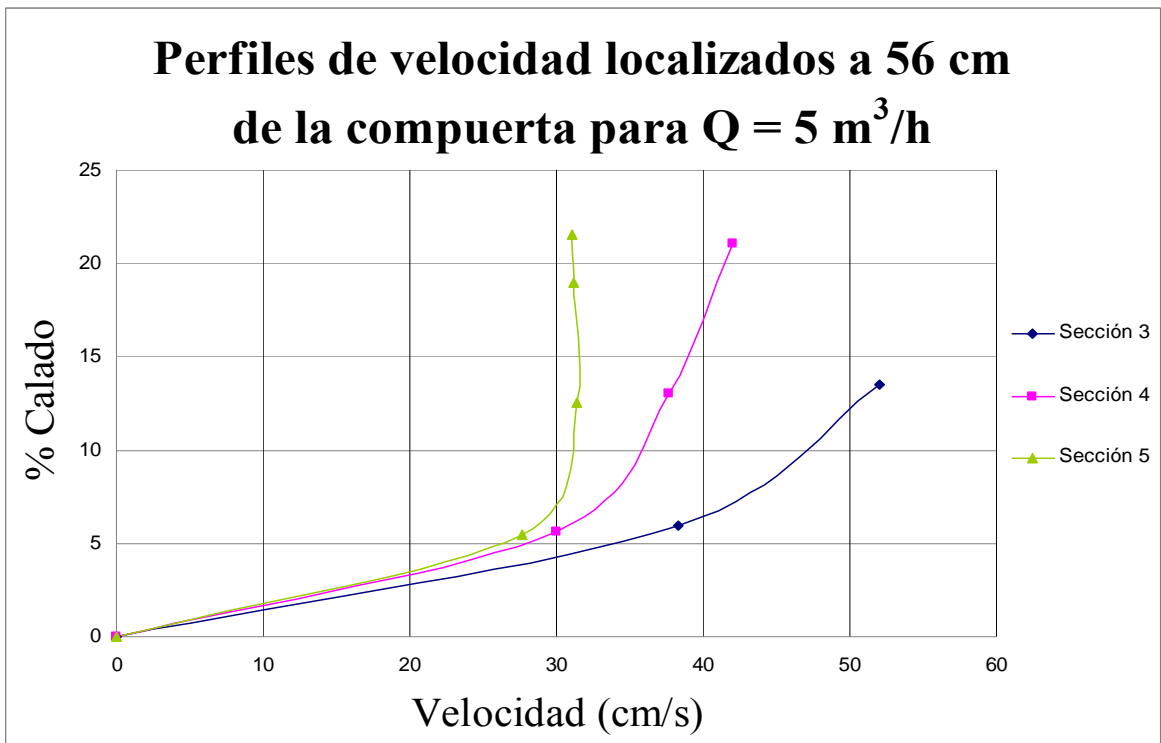


Figura 8

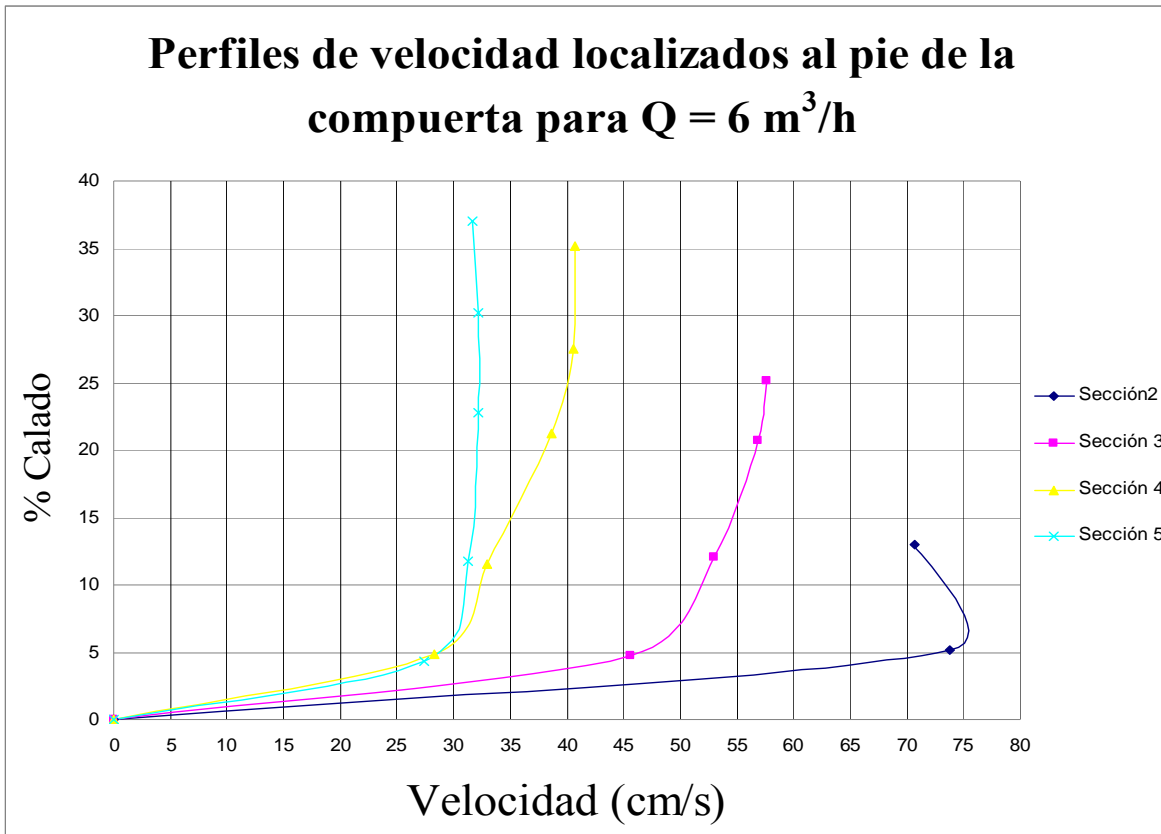


Figura 9

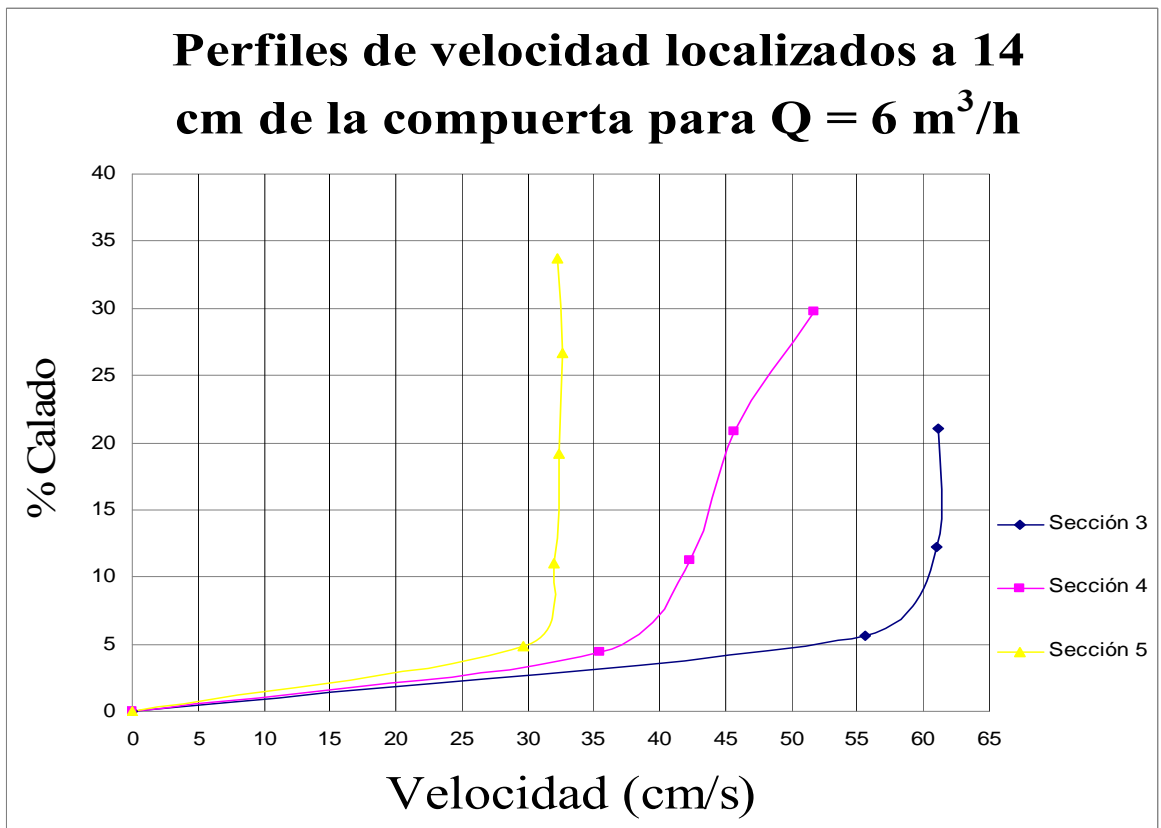


Figura 10

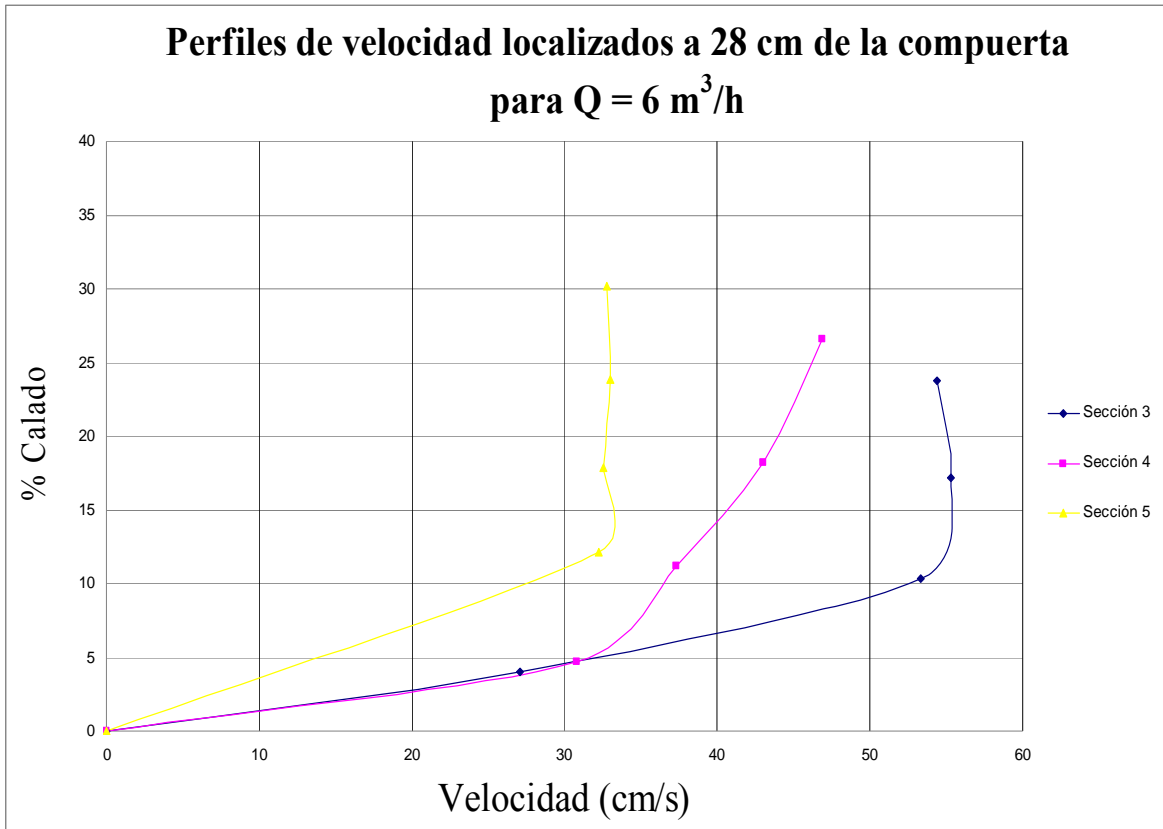


Figura 11

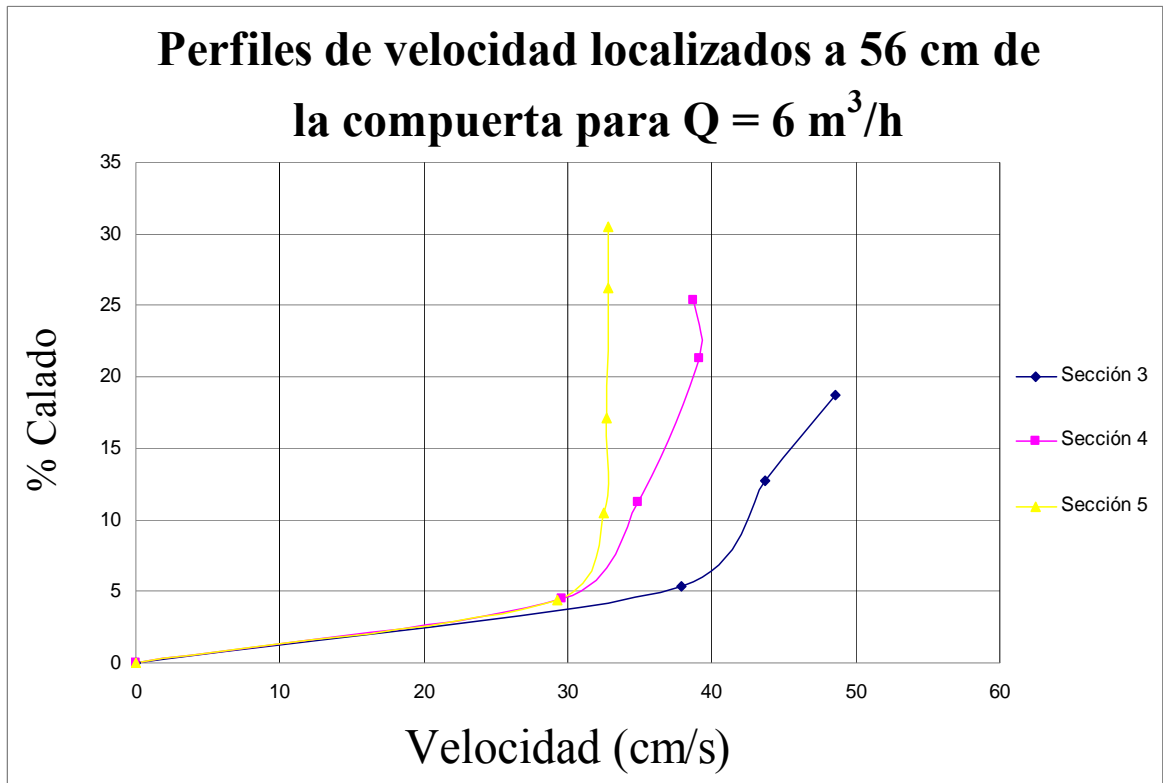


Figura 12

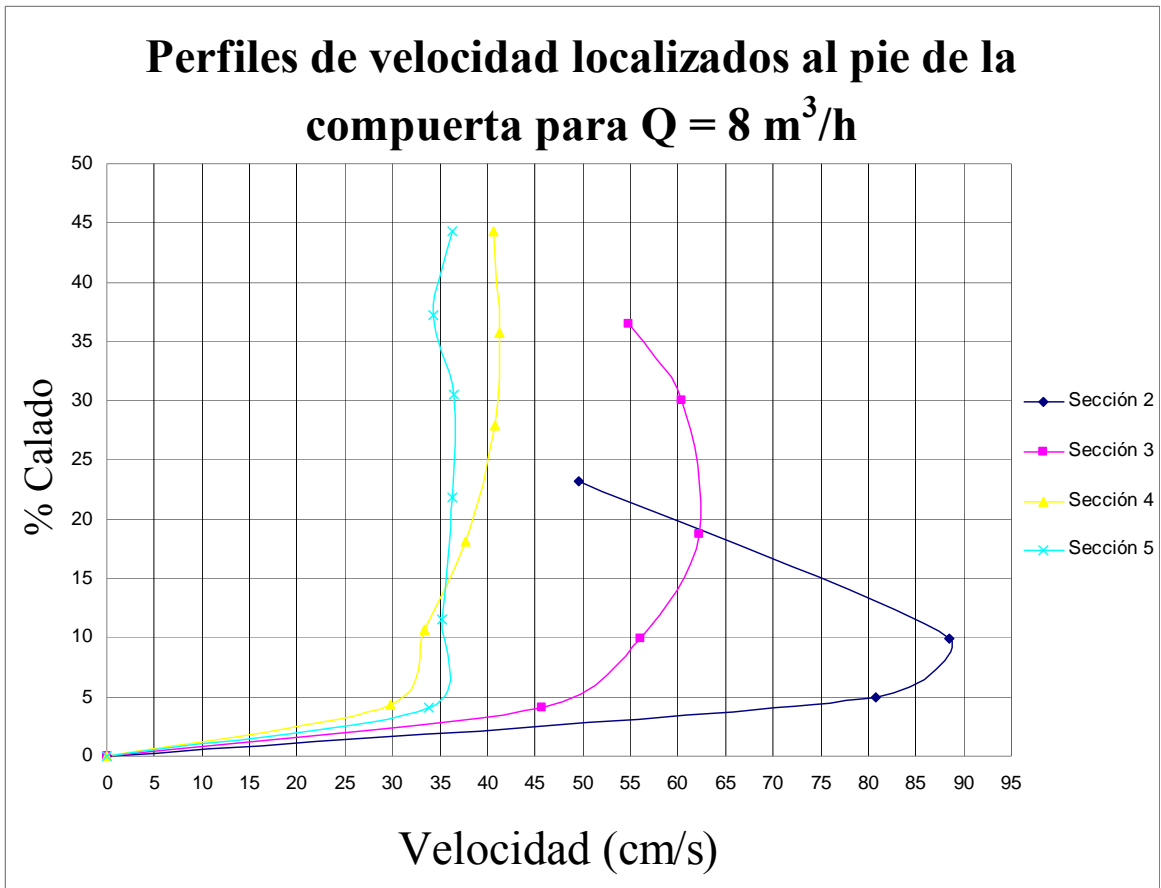


Figura 13

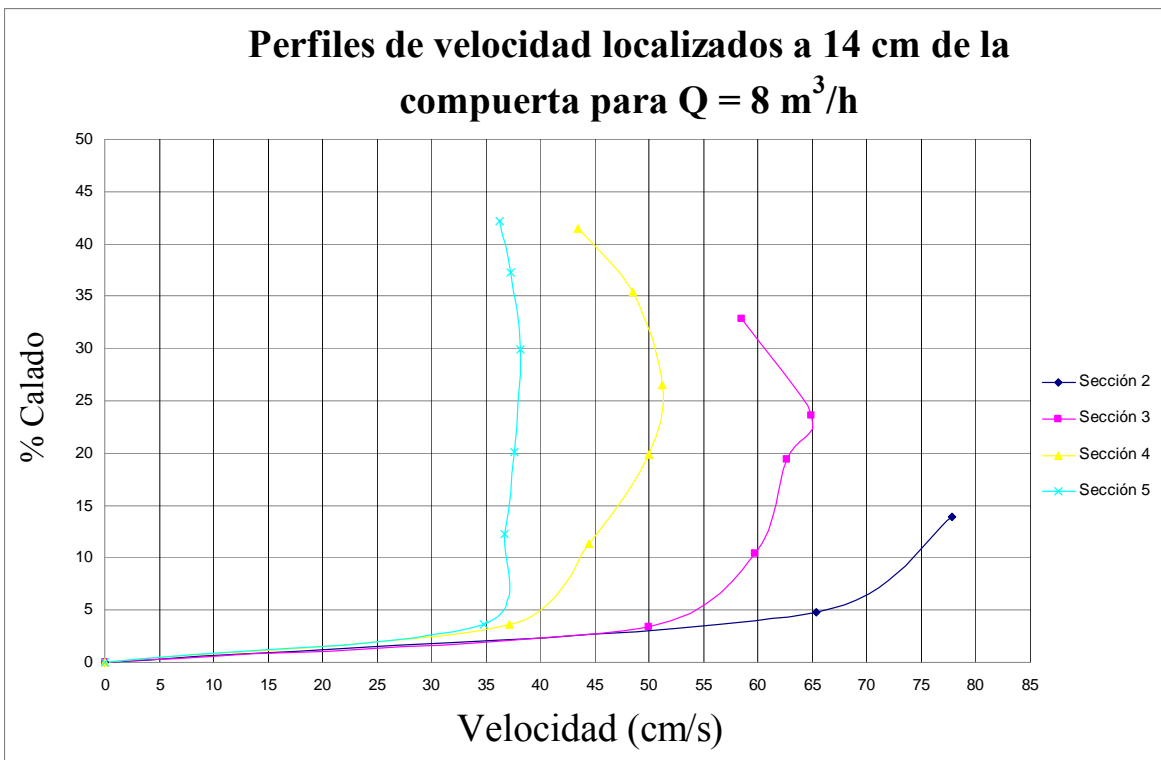
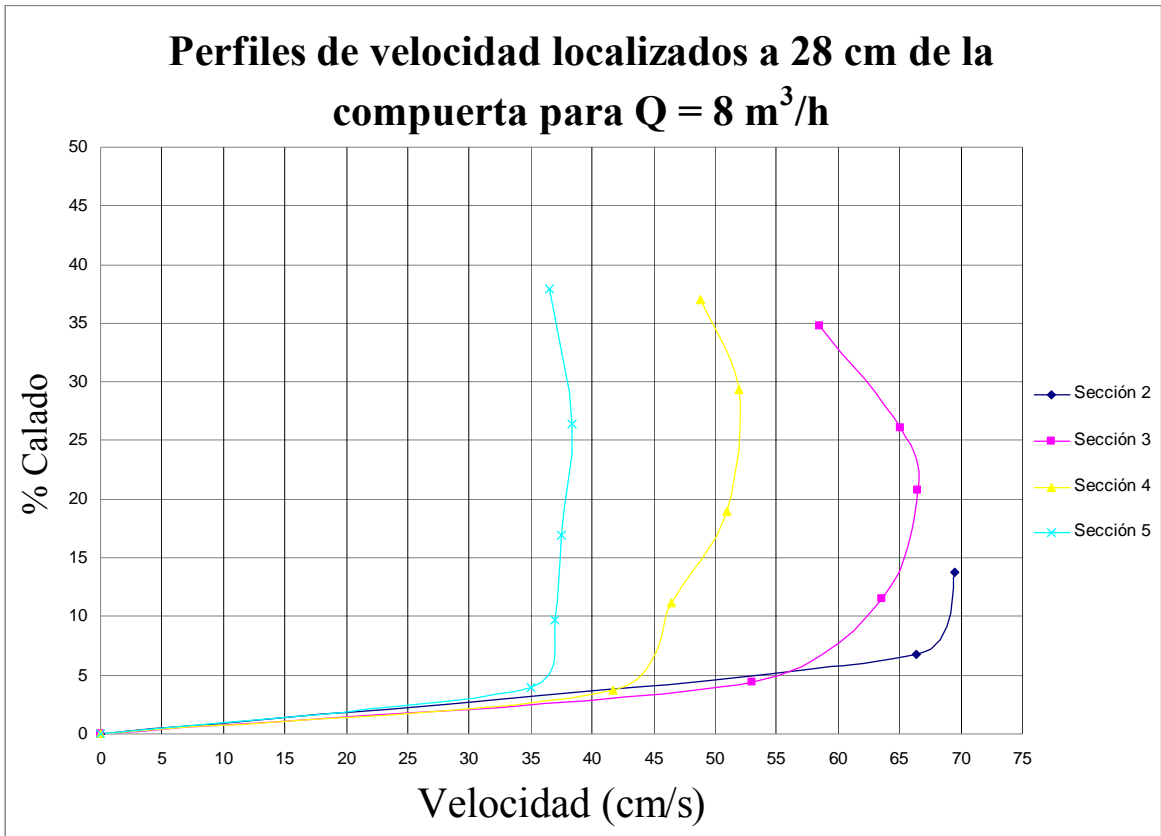
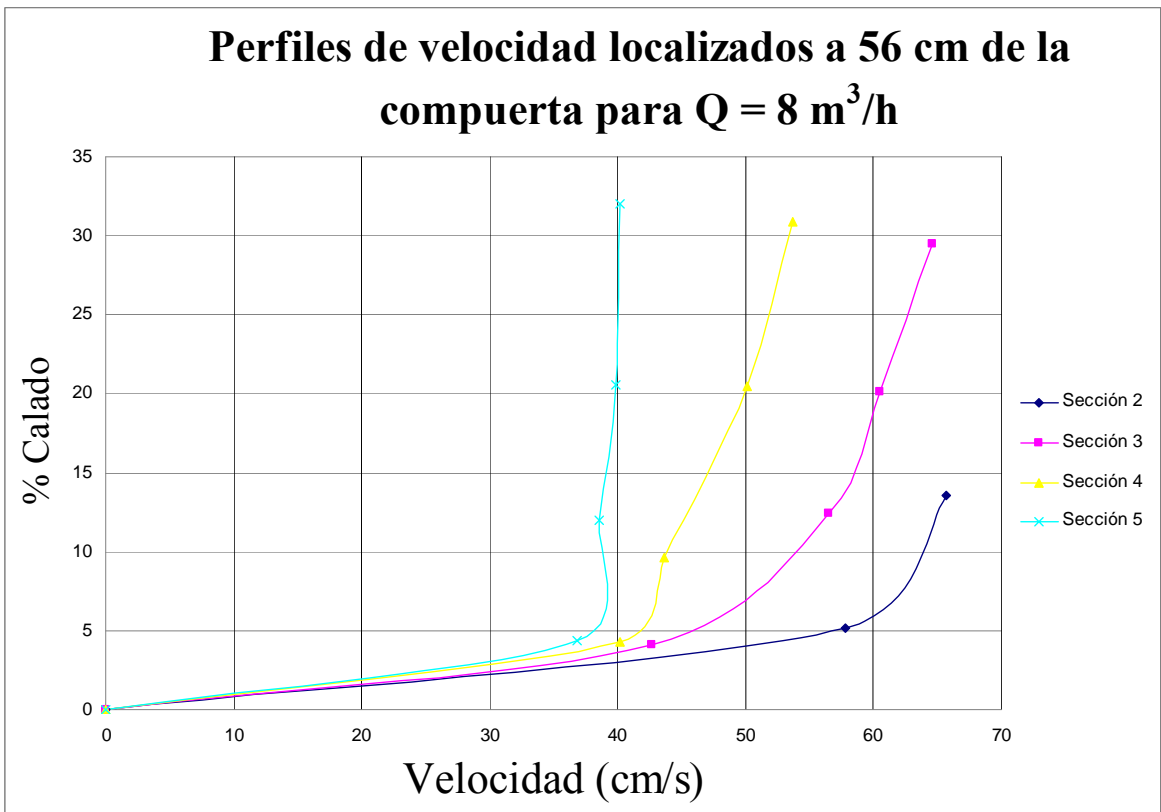


Figura 14



**Figura 15**



**Figura 16**

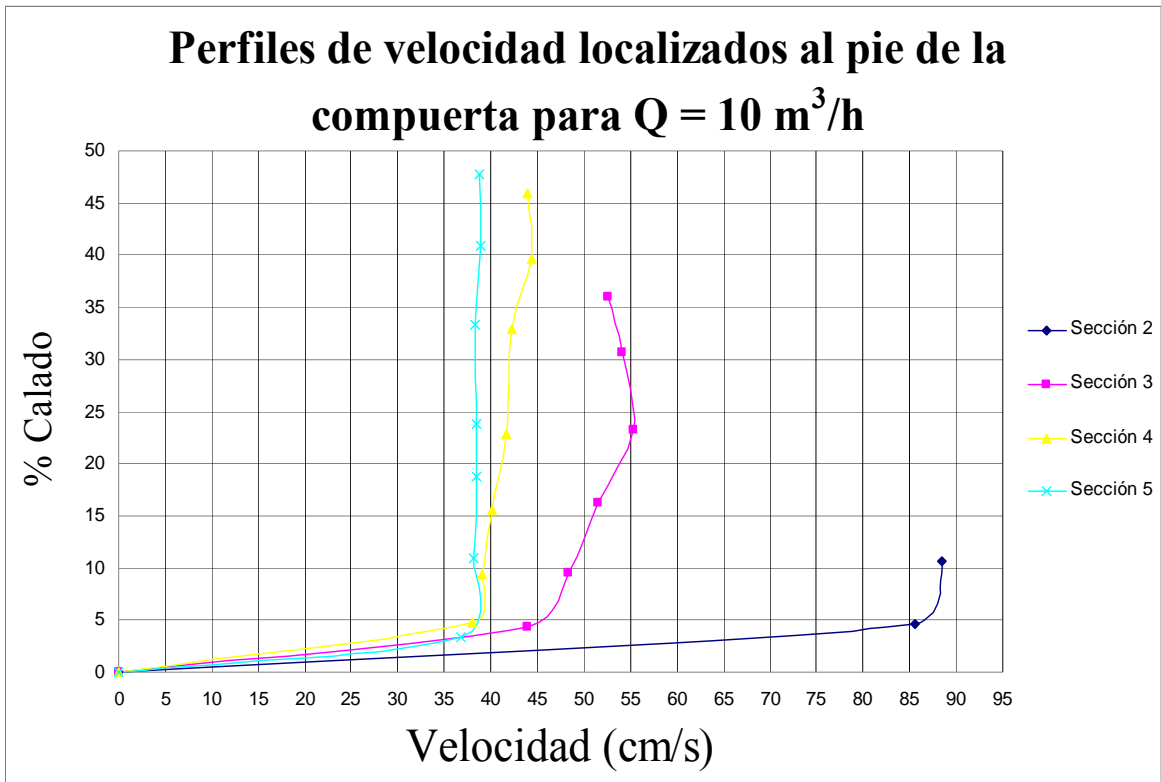


Figura 17

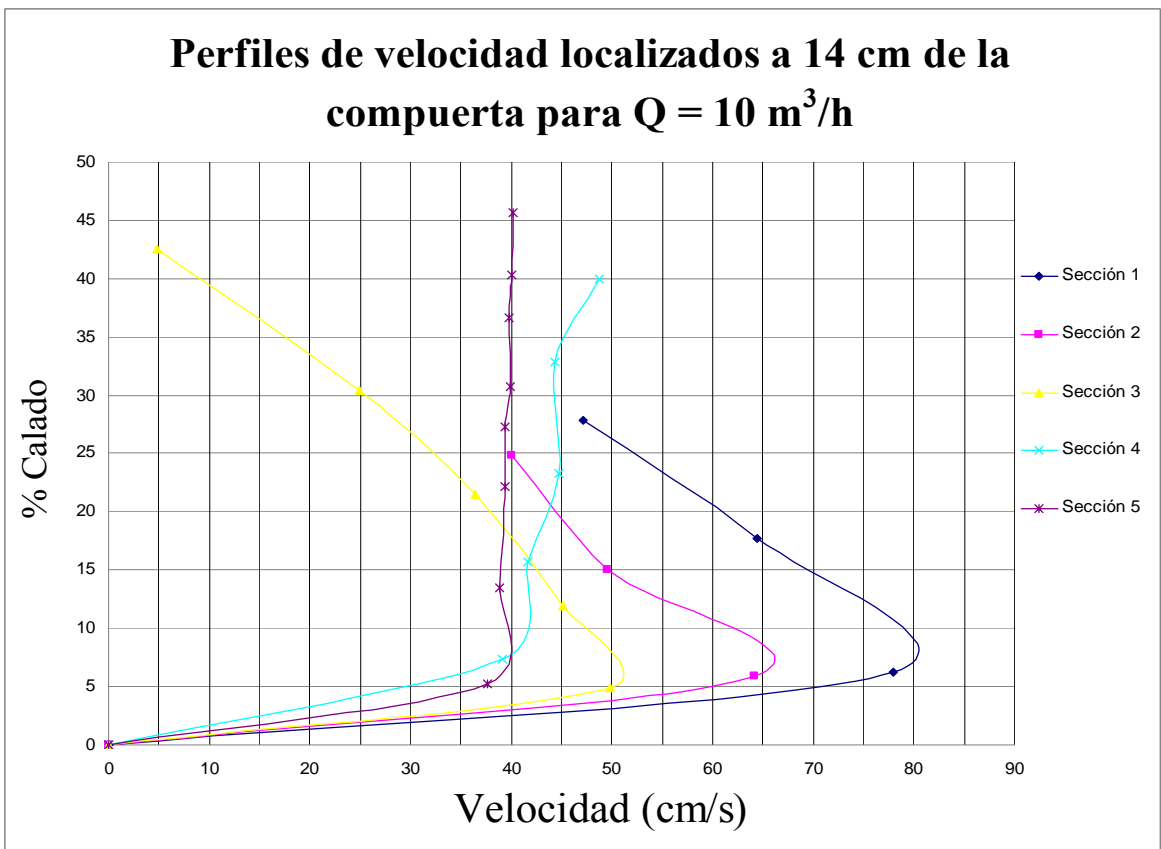
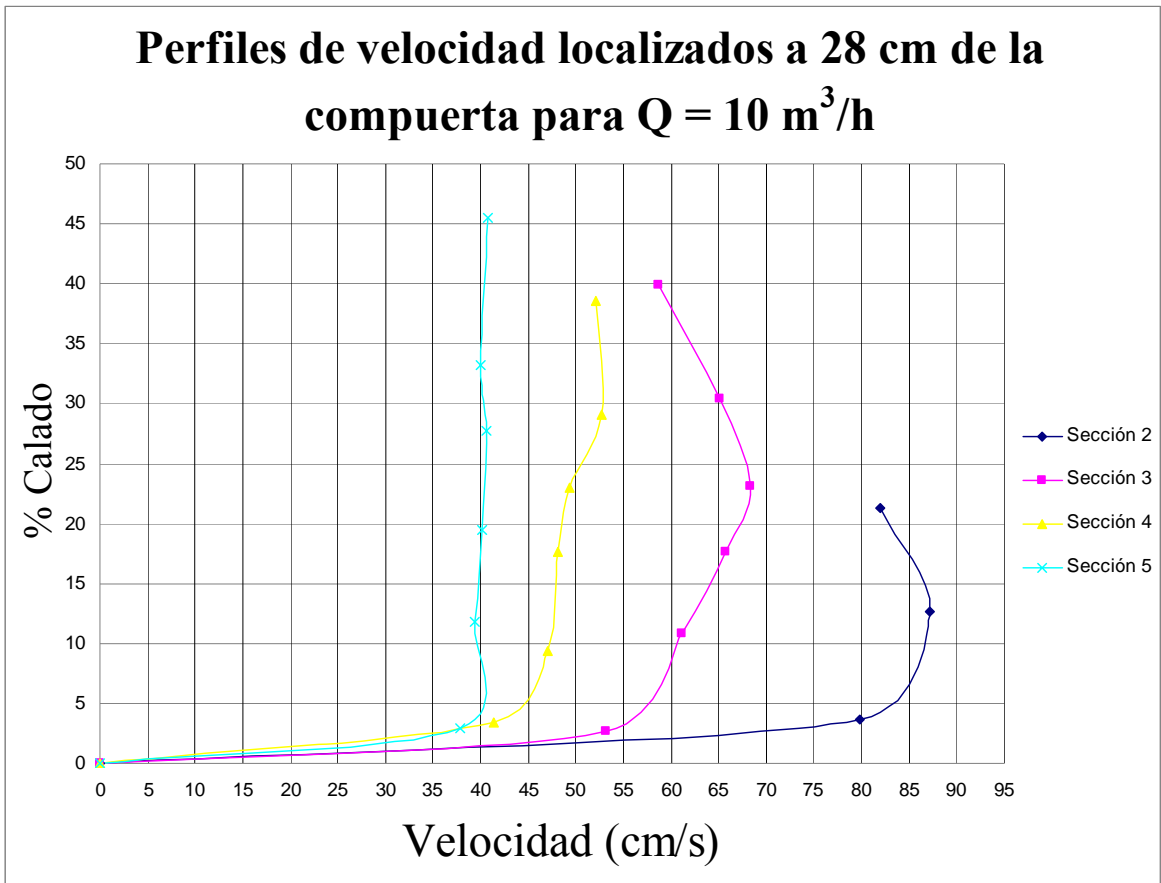
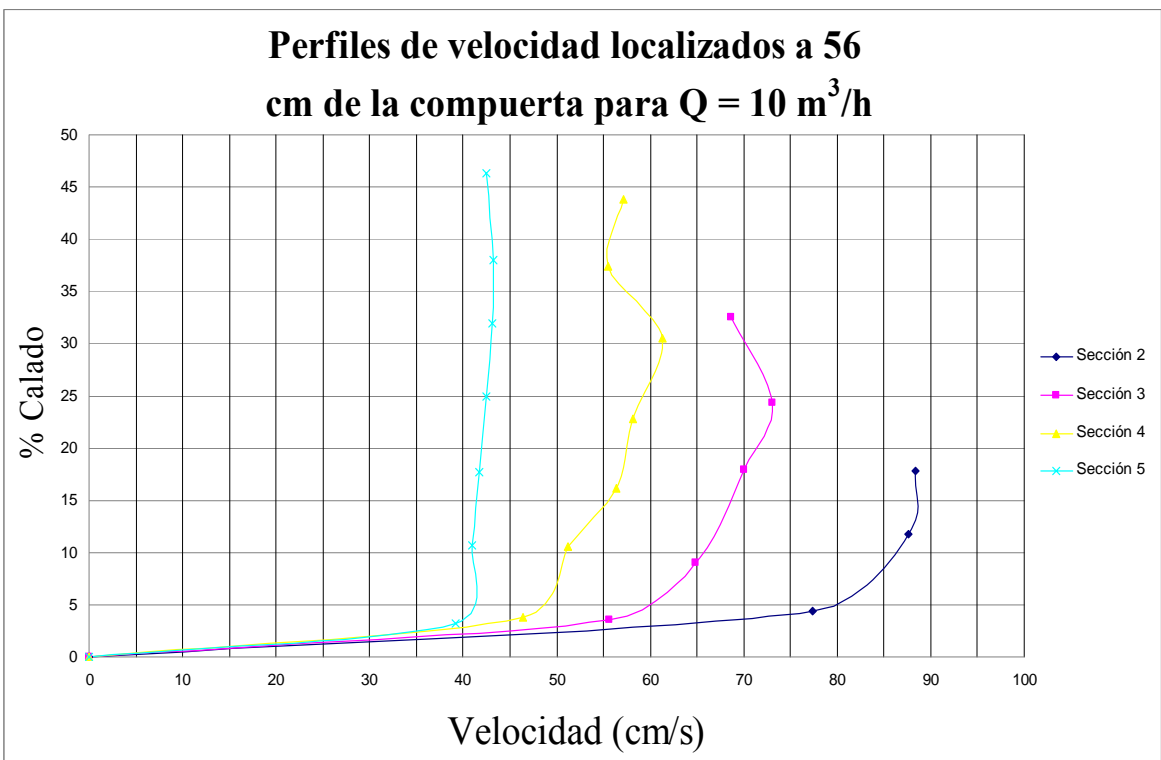


Figura 18





**Figura 19**



**Figura 20**

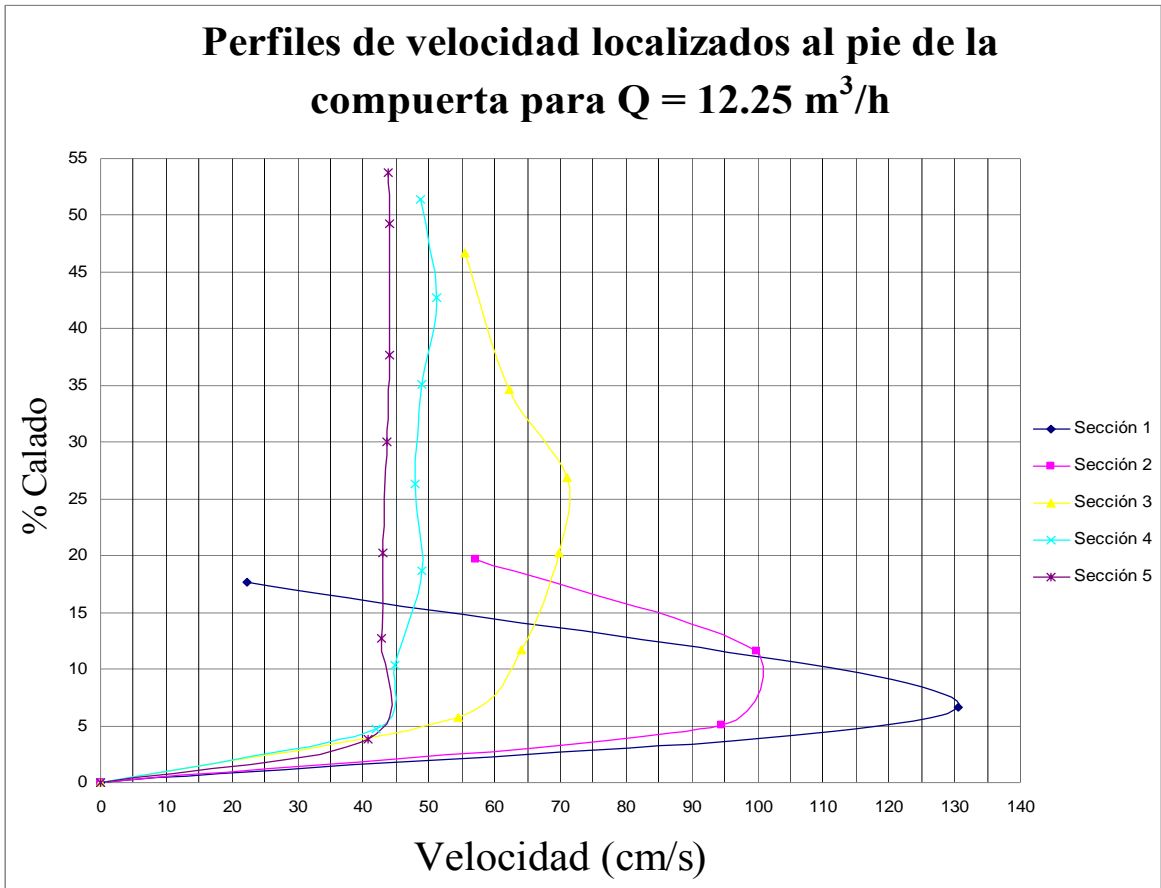


Figura 21

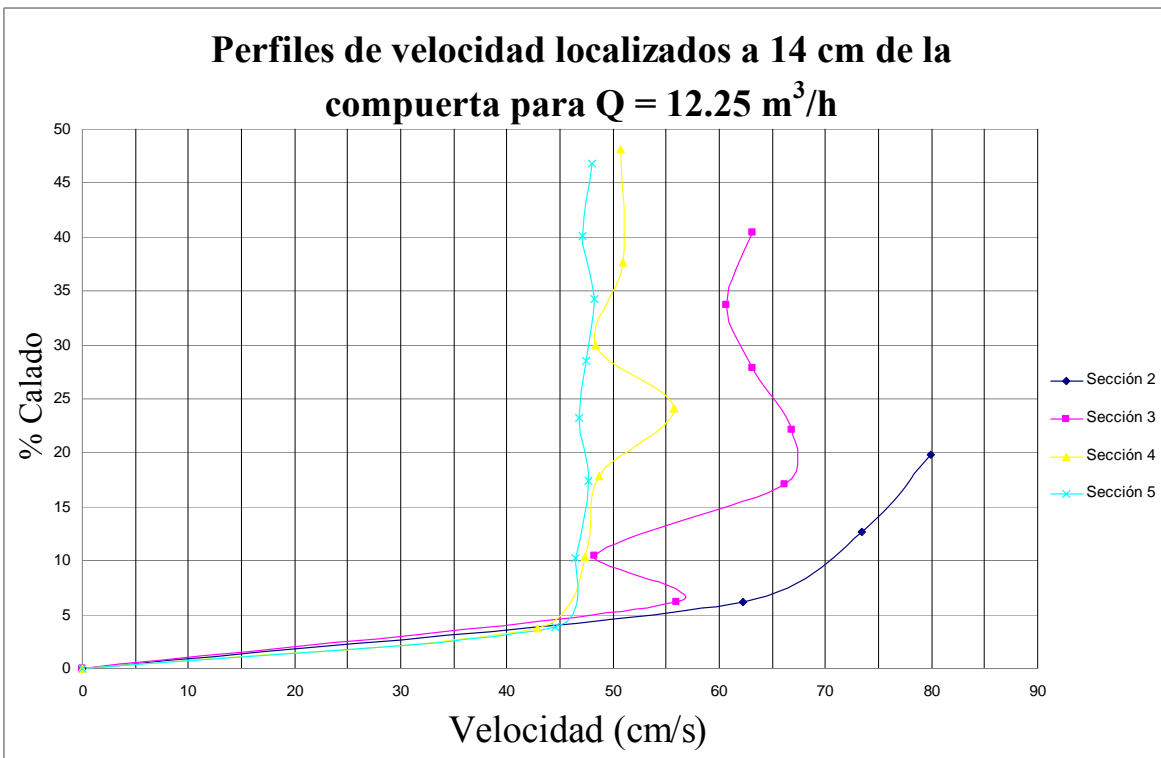


Figura 22

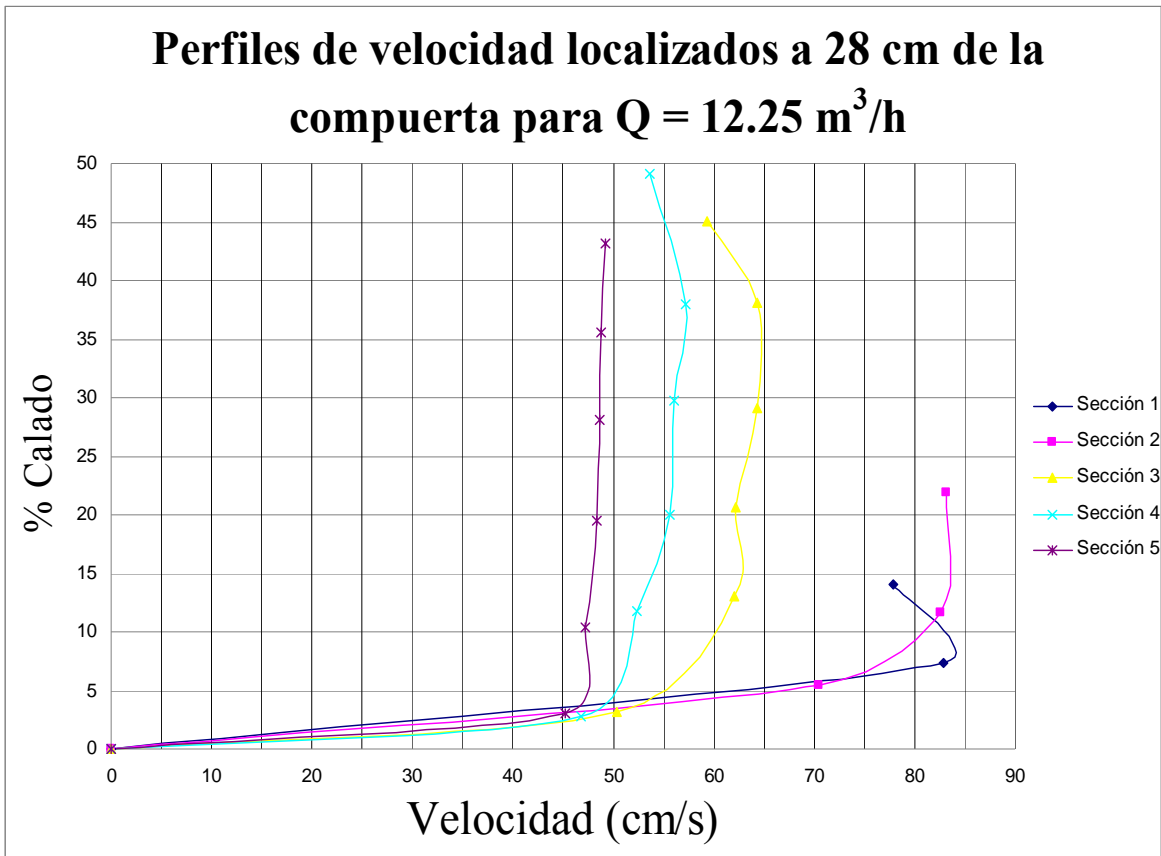


Figura 23

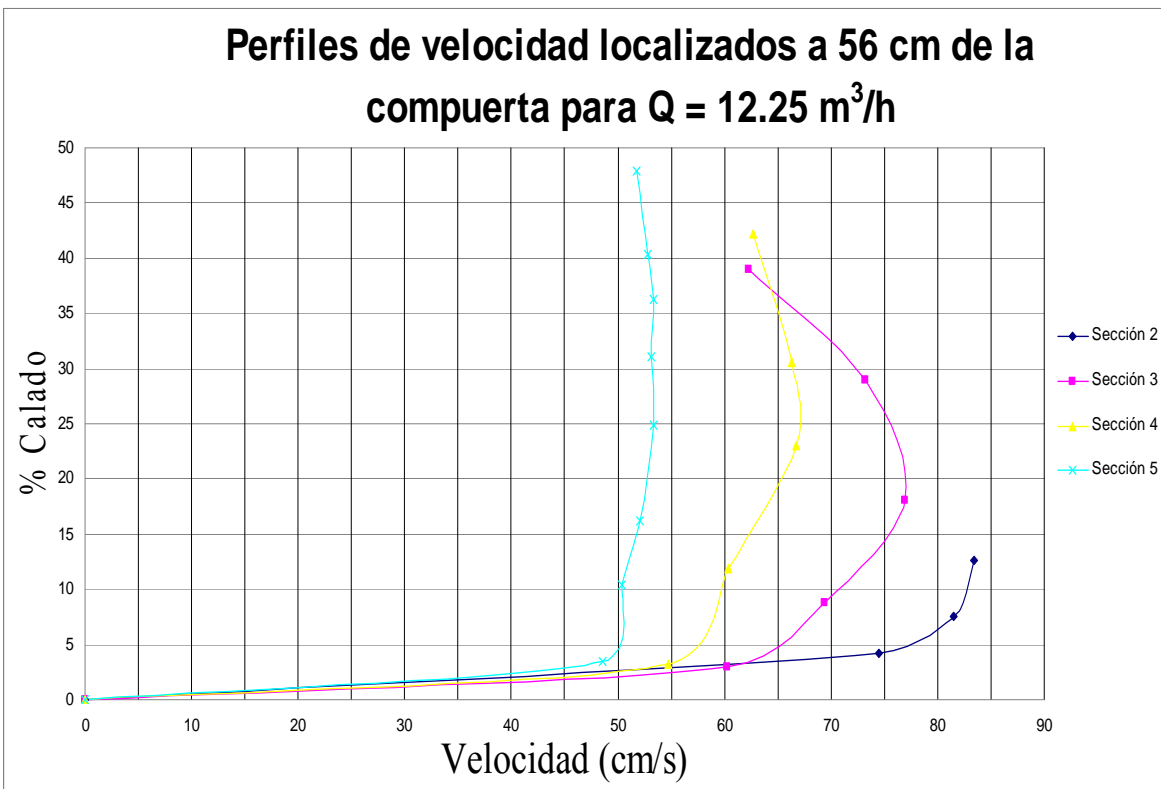


Figura 24

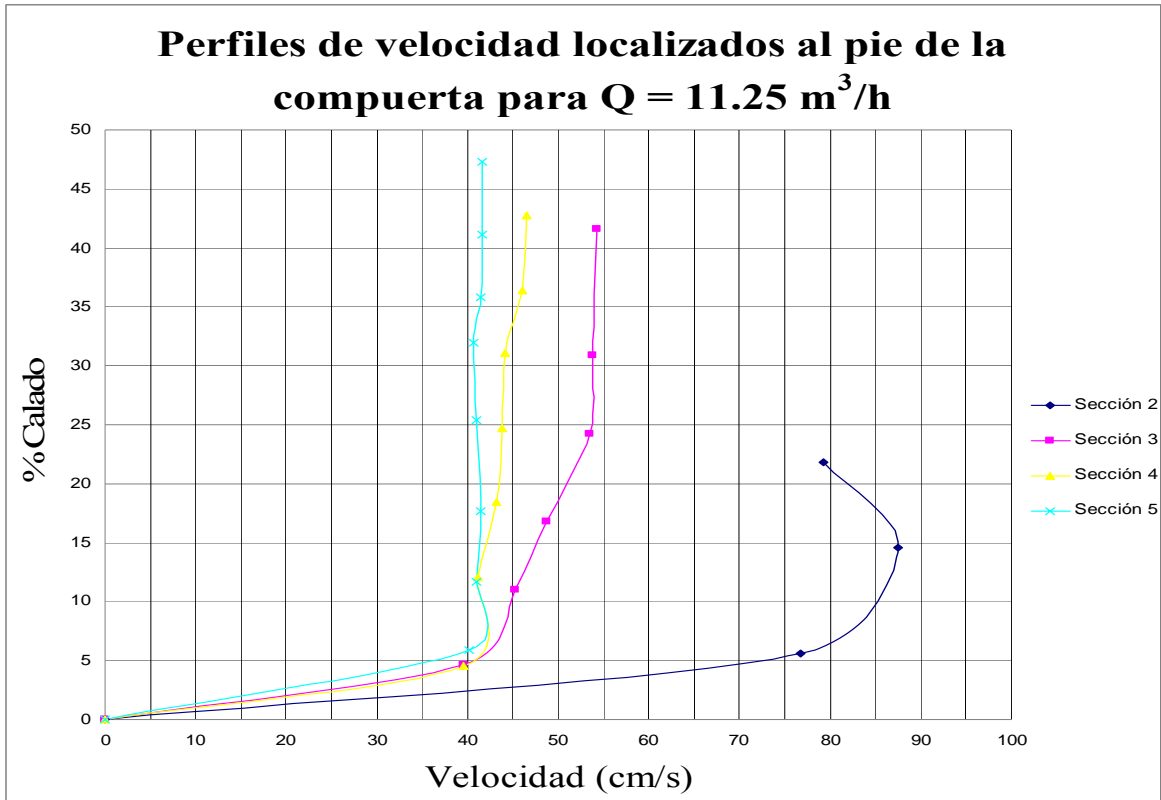


Figura 25

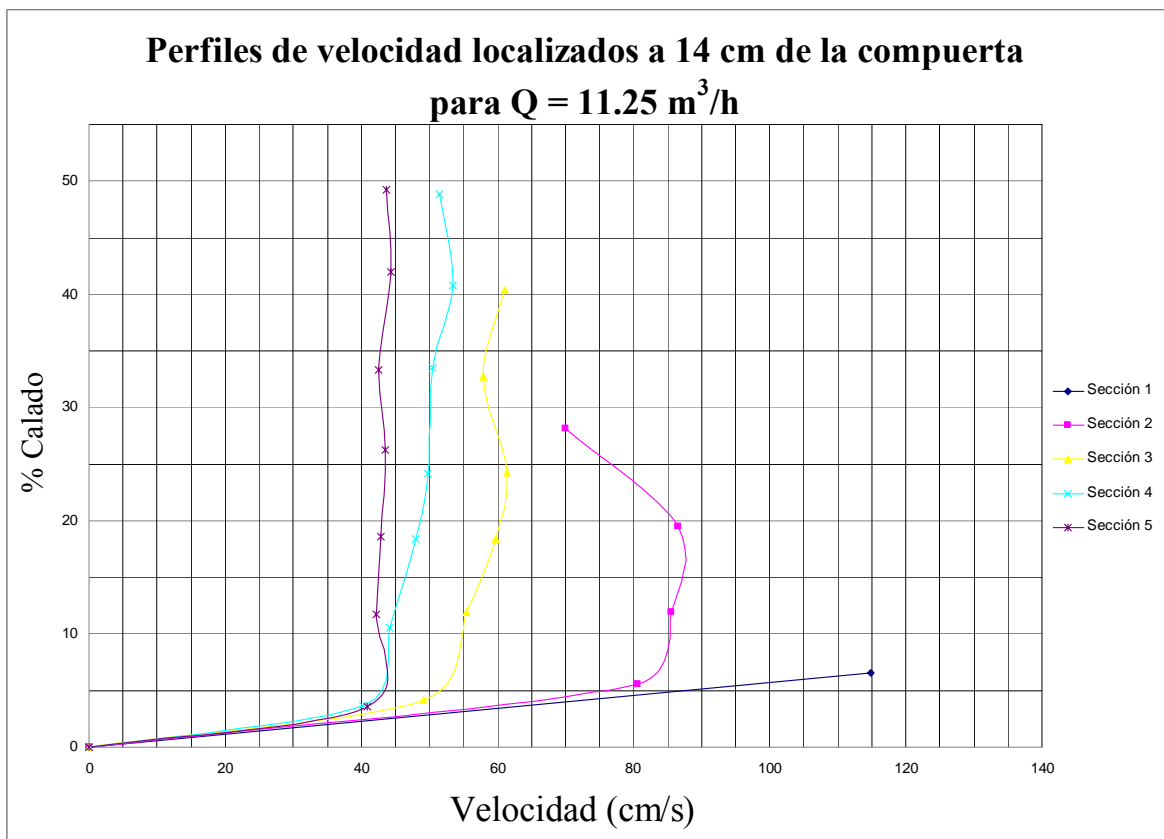


Figura 26

### Perfiles de velocidad localizados a 28 cm de la compuerta para $Q = 11.25 \text{ m}^3/\text{h}$

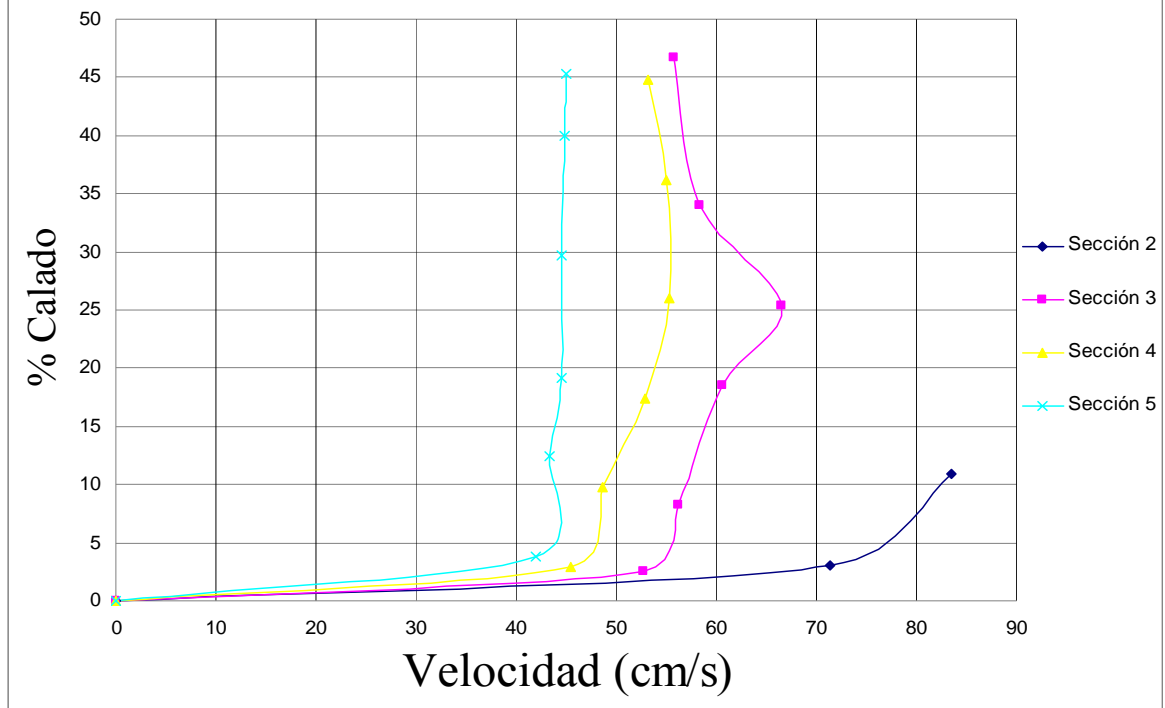


Figura 27

### Perfiles de velocidad localizados a 56 cm de la compuerta para $Q = 11.25 \text{ m}^3/\text{h}$

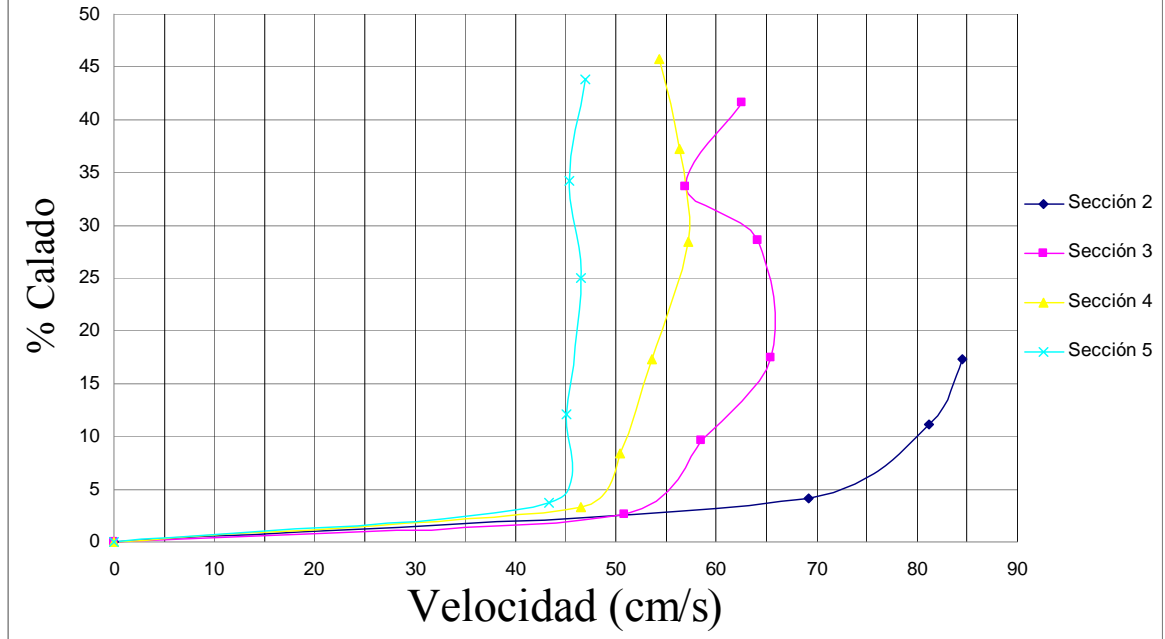


Figura 28

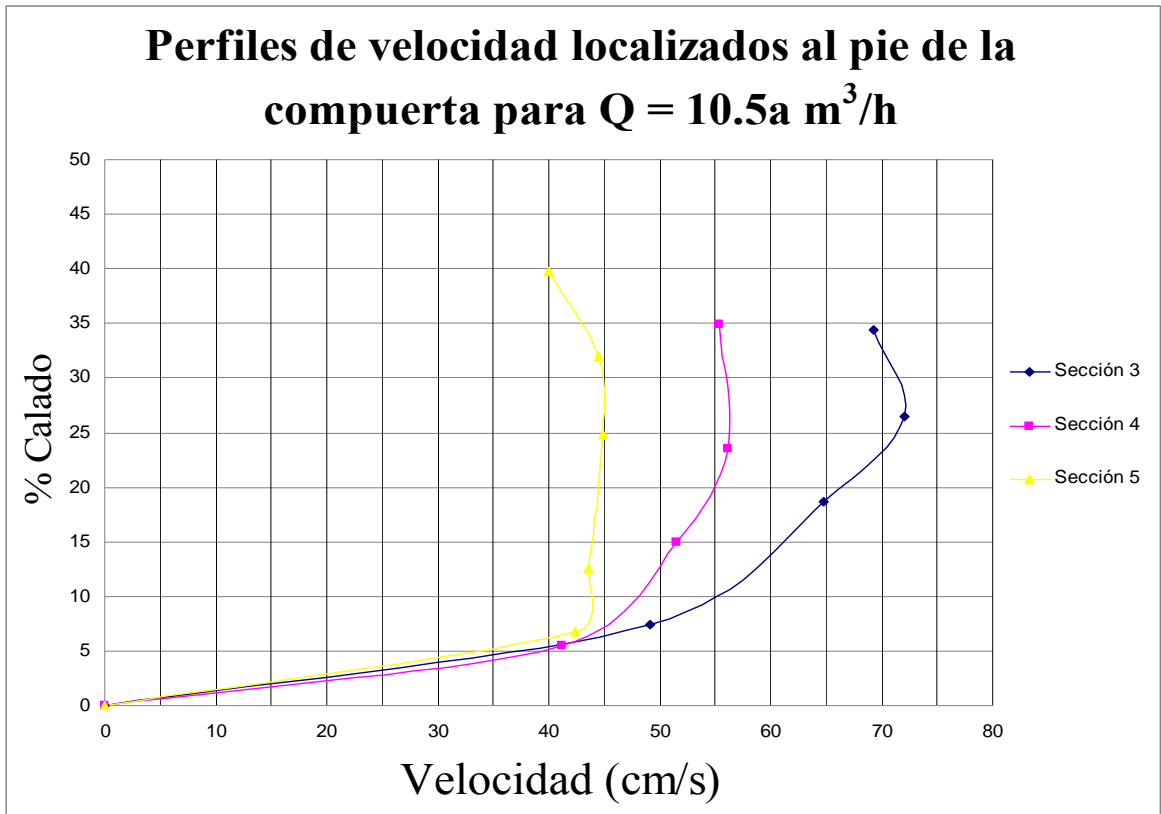


Figura 29

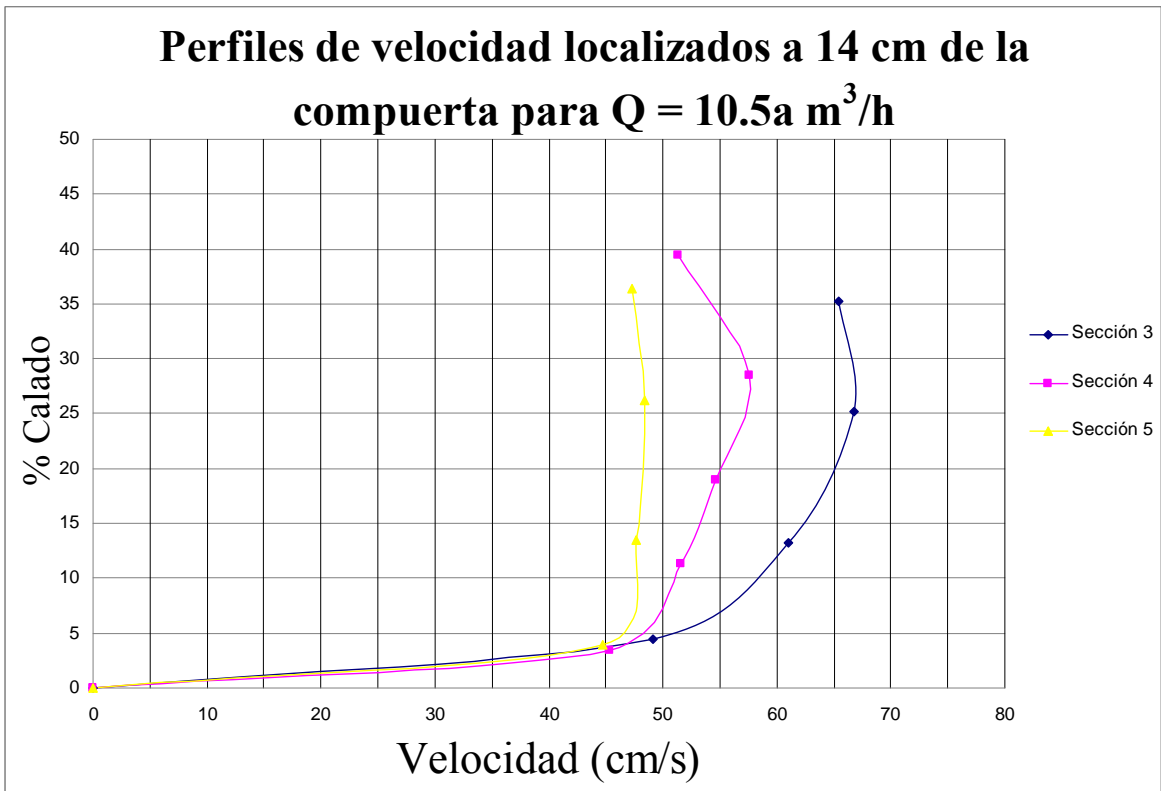


Figura 30

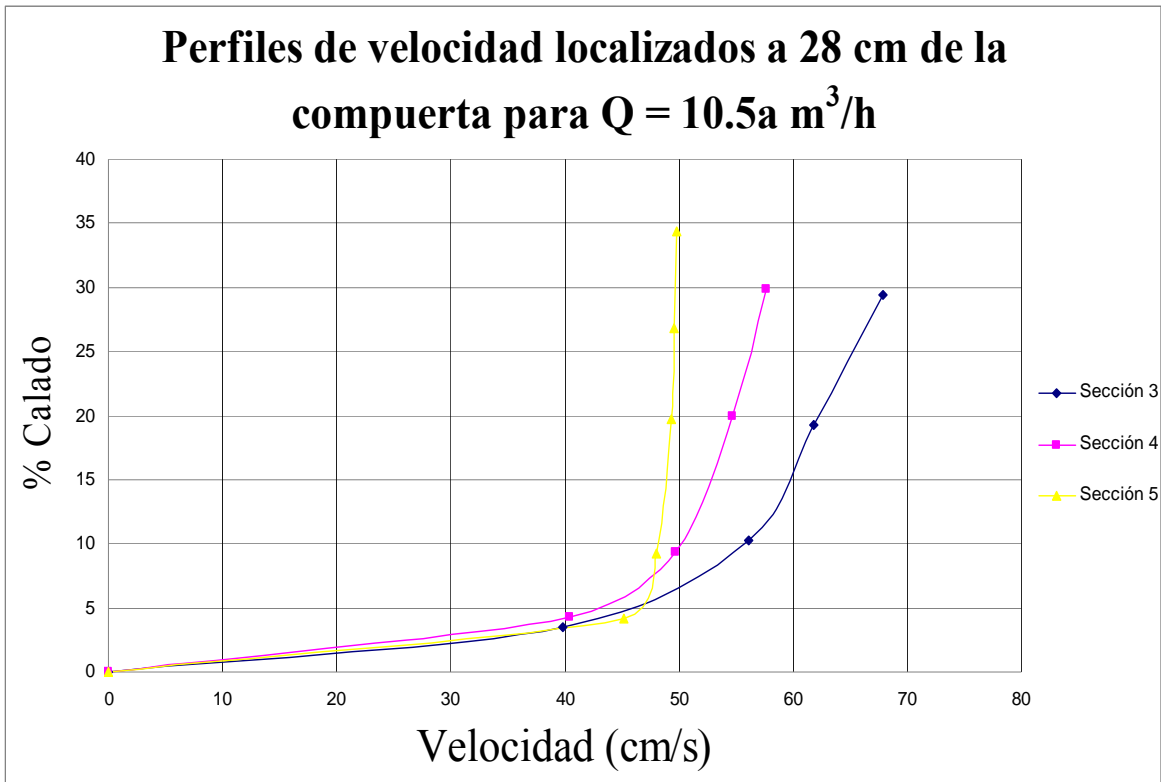


Figura 31

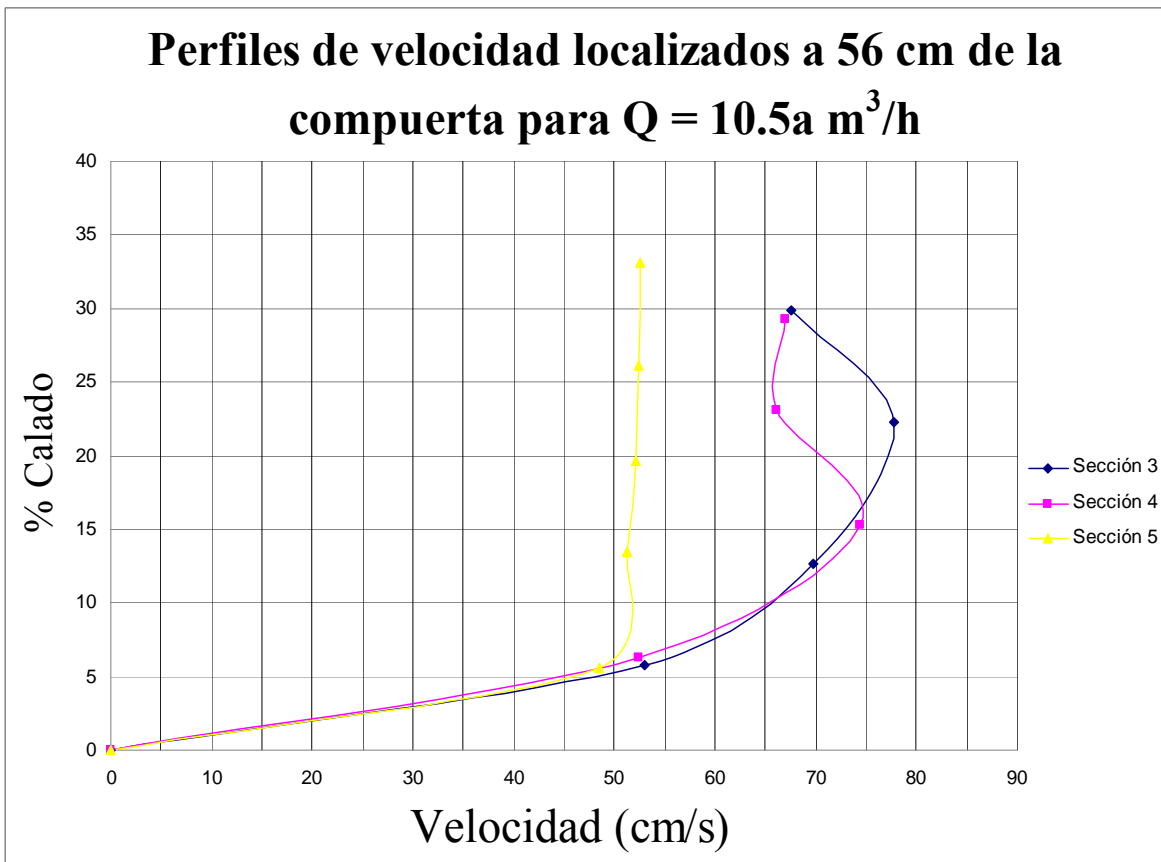


Figura 32

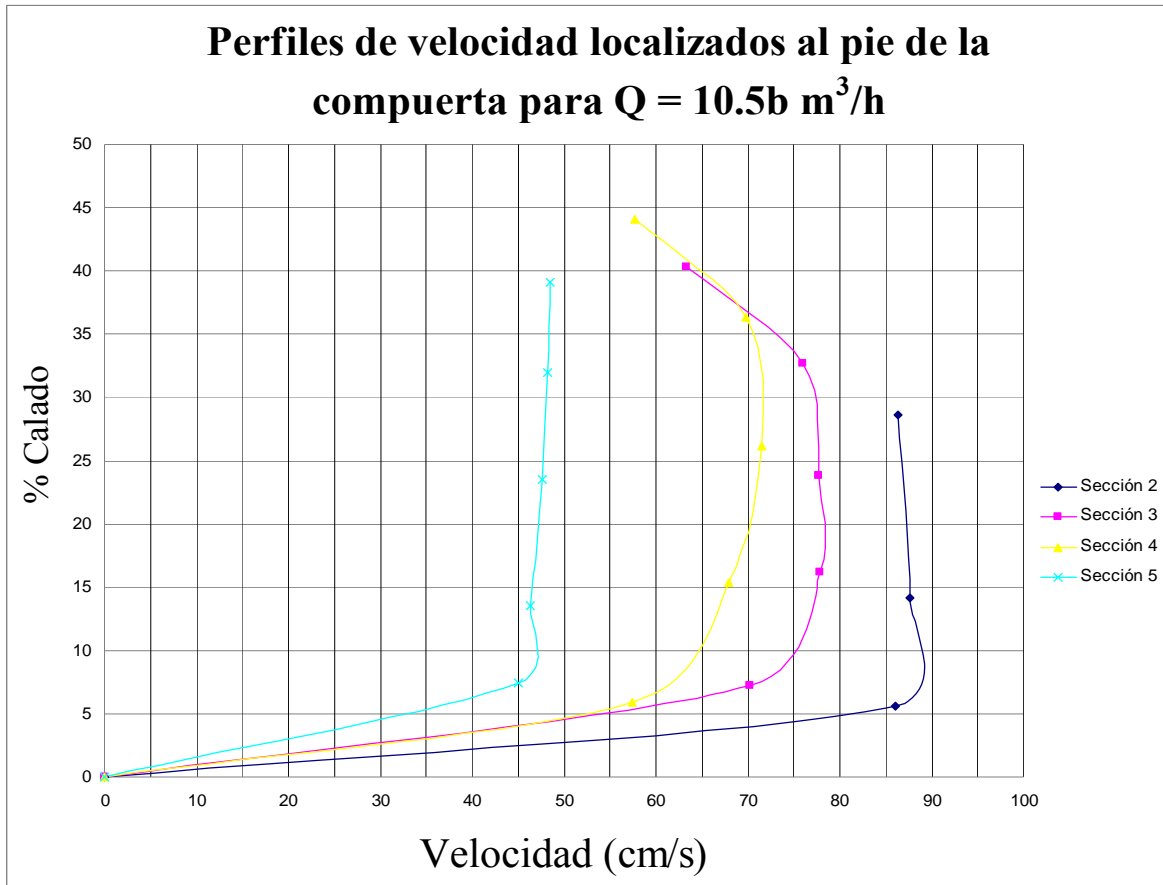


Figura 33

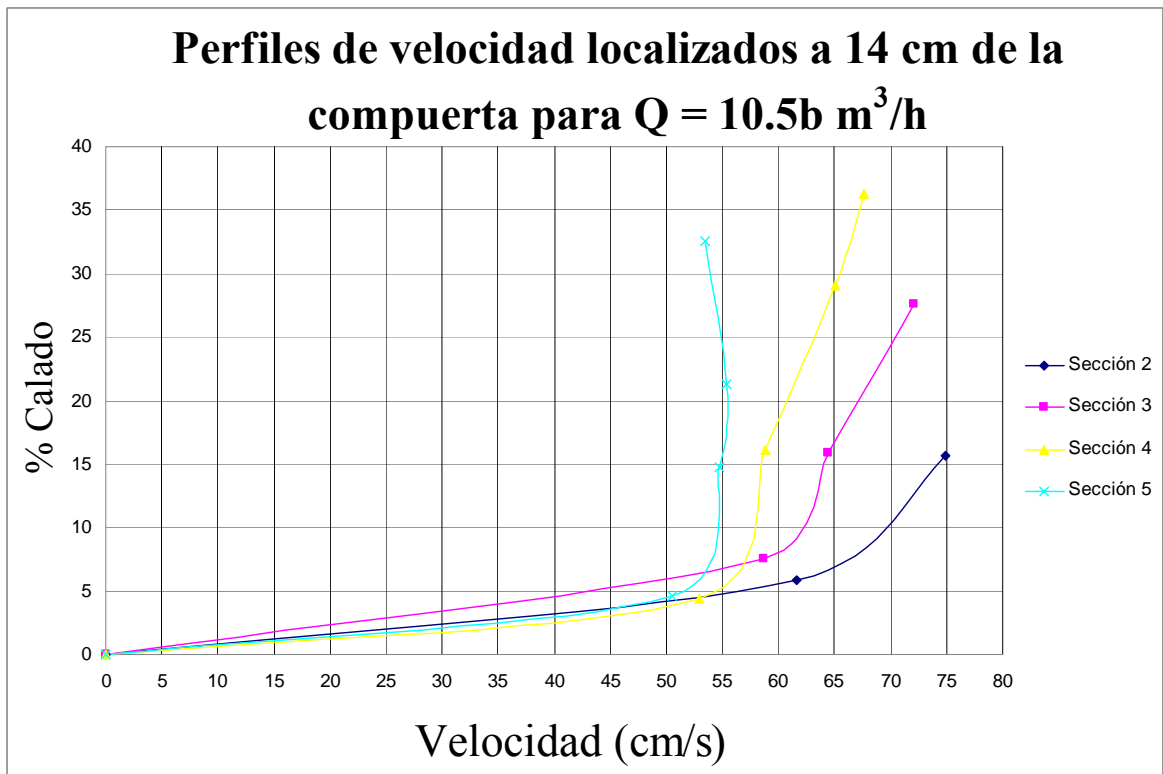


Figura 34



## **ANEXO 3.**

# **CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS A LOS RESALTOS HIDRÁULICOS ANALIZADOS**



En este último anexo se recogen las características asociadas a cada uno de los resaltos hidráulicos analizados.

En el cuadro 1 se describen características asociadas a cada caudal de trabajo, como son la apertura de compuerta para cada caudal, el calado contraído medido  $y_0$  y su correspondiente calado conjugado  $y_2$  según la ecuación de Bélanger,

$y_2 = (y_0 \sqrt{8F_1^2 + 1} - 1) / 2$ , la velocidad teórica al inicio del resalto, calculada como

$V_1 = \frac{Q}{y_0 b}$ , donde  $b$  es el ancho del canal ( $b=8,1$  cm), y el valor de *Froude*

correspondiente,  $F = \frac{V_1}{\sqrt{g y_0}}$ , además del nº de *Reynolds*.

Características asociadas a cada caudal de trabajo						
Q Caudalímetro	Apertura	$y_0$ calado contraído	$y_2$ calado conjugado Bélanger	$V_1$ teorica	Froude	Reynolds
m3/h	a (cm)	cm		m/s		
4	1.71	1.05	8.10	1.747	5.44	14616
5	2.2	1.43	8.22	1.518	4.05	16090
6	2.4	1.54	9.49	1.688	4.34	18892
8	3.1	2.01	10.76	1.674	3.76	22553
10	3.5	2.24	12.36	1.822	3.88	26352
10.5	4.6	2.93	11.50	1.477	2.75	25178
10.5	5.6	4.00	9.96	1.082	1.72	21831
11.25	4	2.62	12.99	1.769	3.48	28230
12.25	4.5	3.00	12.67	1.609	2.96	27807

**Cuadro 1**

A continuación se describen las características de cada resalto hidráulico estudiado.

- En la 1ª columna el caudal que marca el caudalímetro, no es el caudal real.
- En la 2ª, el caudal real obtenido a partir del factor de corrección calculado.
- En la 3ª, la velocidad teórica del agua al pie del resalto.
- En la 4ª, la velocidad teórica del agua al final del resalto.
- En la 5ª, el número de *Froude* correspondiente al pie del resalto.
- En la 6ª, el calado  $y_1$  al principio del resalto.
- En la 7ª, el calado  $y_2$  al final del resalto.
- En la 8ª, la carga de agua,  $H$ , aguas arriba de la compuerta.
- En la 9ª, la longitud del resalto  $L_j$ .
- En la 10ª, el  $Re$  correspondiente, los datos más importantes son los que tengan un  $Re > 25.000$ .

Clasificamos las tablas según la distancia del inicio del resalto a la compuerta, por tanto obtenemos cuatro tablas para los cuatro resaltos en los que hemos medido las velocidades, y dos tablas más que recogen los resaltos a 70 y 90 cm, resaltos en los que no hemos medido velocidades, sólo características principales.

Por este motivo, en los resaltos a 70 y 90 cm, sólo hemos medido los caudales más grandes, los que mayor  $Re$  poseen, pues para pequeños caudales, las fuerzas viscosas son muy importantes y alteran las medidas.

<b>Resaltos al pie</b>									
<b>Caudalímetro</b>	<b>Real</b>	<b><math>V_1</math></b>	<b><math>V_2</math></b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>Y_1</math></b>	<b><math>Y_2</math></b>	<b><math>H_{total}</math></b>	<b><math>L_j</math></b>	<b>Reynolds</b>
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m/s</b>	<b>m/s</b>		<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	
4	0.00148644	1.75	0.26	5.45	1.05	7.06	19.4	39	14617
5	0.00175828	1.52	0.32	4.05	1.43	6.82	13.49	37	16091
6	0.00210585	1.69	0.33	4.34	1.54	7.9	15.8	42.5	18892
8	0.00272526	1.67	0.37	3.77	2.01	9.06	16.7	48	22553
10	0.00330527	1.82	0.39	3.89	2.24	10.48	19.6	58	26353
10.5	0.00350438	1.48	0.47	2.75	2.93	9.13	14.2	46	25178
10.5	0.00350438	1.08	0.55	1.73	4	7.83	10.81	36	21832
11.25	0.00375469	1.77	0.43	3.49	2.62	10.84	19.2	62	28231
12.25	0.0039091	1.61	0.44	2.97	3	10.94	19.1	57.5	27807

**Cuadro 2. Características principales para los resaltos al pie de la compuerta**

<b>Resaltos a 14 cm</b>									
<b>Caudalímetro</b>	<b>Real</b>	<b><math>V_1</math></b>	<b><math>V_2</math></b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>Y_1</math></b>	<b><math>Y_2</math></b>	<b><math>H_{total}</math></b>	<b><math>L_j</math></b>	<b>Reynolds</b>
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m/s</b>	<b>m/s</b>		<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>	
4	0.00148644	1.52	0.27	4.40	1.21	6.78	17.1	35.3	14172
5	0.00175828	1.38	0.32	3.52	1.57	6.73	12.49	33.5	15690
6	0.00210585	1.49	0.34	3.62	1.74	7.68	15.3	37.5	18240
8	0.00272526	1.63	0.38	3.61	2.07	8.84	15.6	43.5	22332
10	0.00330527	1.67	0.39	3.40	2.45	10.45	19.8	55	25501
10.5	0.00350438	1.49	0.48	2.78	2.91	9.01	13.5	40	25251
10.5	0.00350438	1.18	0.57	1.96	3.68	7.56	10.37	28	22735
11.25	0.00375469	1.78	0.44	3.51	2.61	10.62	18.8	60	28273
12.25	0.0039091	1.66	0.45	3.10	2.91	10.82	18	54	28167

**Cuadro 3. Características principales para los resaltos a 14 cm de la compuerta**

Resaltos a 28 cm									
<i>Caudalímetro</i>	<i>Real</i>	$V_1$	$V_2$	$F_1$	$Y_1$	$Y_2$	$H_{total}$	$L_j$	<i>Reynolds</i>
$m^3/h$	$m^3/s$	$m/s$	$m/s$		$cm$	$cm$	$cm$	$cm$	
4	0.0014864	1.56	0.28	4.57	1.18	6.56	16.70	31.10	14253
5	0.0017583	1.43	0.32	3.70	1.52	6.72	13.24	33.00	15831
6	0.0021058	1.56	0.34	3.85	1.67	7.60	15.60	35.50	18463
8	0.0027253	1.60	0.38	3.53	2.10	8.76	16.00	39.00	22223
10	0.0033053	1.69	0.40	3.46	2.42	10.32	19.30	50.00	25620
10.5	0.0035044	1.45	0.48	2.69	2.98	8.99	13.70	35.00	24999
11.25	0.0037547	1.73	0.43	3.37	2.68	10.66	18.80	53.00	27979
12.25	0.0039091	1.61	0.44	2.98	2.99	10.85	17.50	53.00	27847

**Cuadro 4. Características principales para los resaltos a 28 cm de la compuerta**

Resaltos a 56 cm									
<i>Caudalímetro</i>	<i>Real</i>	$V_1$	$V_2$	$F_1$	$Y_1$	$Y_2$	$H_{total}$	$L_j$	<i>Reynolds</i>
$m^3/h$	$m^3/s$	$m/s$	$m/s$		$cm$	$cm$	$cm$	$cm$	
4	0.0014864	1.31	0.30	3.54	1.40	6.21	16.90	26.30	13678
5	0.0017583	1.25	0.33	3.02	1.74	6.60	12.69	28.50	15229
6	0.0021058	1.41	0.35	3.30	1.85	7.43	15.10	34.50	17900
8	0.0027253	1.45	0.39	3.04	2.32	8.61	15.70	36.00	21456
10	0.0033053	1.61	0.40	3.22	2.54	10.20	19.20	39.00	25153
10.5	0.0035044	1.37	0.49	2.47	3.15	8.76	13.24	30.00	24409
11.25	0.0037547	1.62	0.44	3.06	2.86	10.46	18.70	50.00	27250
12.25	0.0039091	1.48	0.46	2.63	3.25	10.60	17.80	44.00	26855

**Cuadro 5. Características principales para los resaltos a 56 cm de la compuerta**

Resalto a 70 cm									
<i>Caudalímetro</i>	<i>Real</i>	$V_1$	$V_2$	$F_1$	$Y_1$	$Y_2$	$H_{total}$	$L_j$	<i>Reynolds</i>
$m^3/h$	$m^3/s$	$m/s$	$m/s$		$cm$	$cm$	$cm$	$cm$	
8	0.0027253	1.50	0.40	3.18	2.25	8.40	16.00	34.00	21694
10	0.0033053	1.57	0.41	3.11	2.60	9.95	19.10	36.00	24926
11.25	0.0037547	1.57	0.45	2.92	2.95	10.28	18.90	34.00	26900
12.25	0.0039091	1.46	0.48	2.56	3.31	10.06	17.50	30.00	26636

**Cuadro 6. Características principales para los resaltos a 70 cm de la compuerta**

<b>Resalto a 90 cm</b>									
<b>Caudalímetro</b>	<b>Real</b>	<b><math>V_1</math></b>	<b><math>V_2</math></b>	<b><math>F_1</math></b>	<b><math>Y_1</math></b>	<b><math>Y_2</math></b>	<b><math>H_{total}</math></b>	<b><math>L_j</math></b>	<b>Reynolds</b>
<b><math>m^3/h</math></b>	<b><math>m^3/s</math></b>	<b><math>m/s</math></b>	<b><math>m/s</math></b>		<b><math>cm</math></b>	<b><math>cm</math></b>	<b><math>cm</math></b>	<b><math>cm</math></b>	
8	0.0027253	1.40	0.41	2.89	2.40	8.17	16.10	29.00	21189
10	0.0033053	1.55	0.42	3.05	2.63	9.73	19.20	34.00	24814
11.25	0.0037547	1.57	0.46	2.91	2.96	10.09	19.00	29.00	26861
12.25	0.0039091	1.42	0.49	2.47	3.39	9.95	17.50	28.00	26350

**Cuadro 7.** Características principales para los resaltos a 90 cm de la compuerta

## BIBLIOGRAFÍA

- **Canales, A (2000).** “Estudio teórico-experimental de los criterios metodológicos de adaptación del diseño de las presas con cuenco amortiguador de resalto o trampolín semisumergido, a caudales de avenida superiores a los de diseño”. Tesis Doctoral.

E.T.S.I. de Caminos, C. y P. de Valencia UPV.

- **Carrillo, J. M. (2004).** “Determinación Experimental de distribuciones de velocidades e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos”. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.

- **Castillo-E, L.G. (2002).** “Apuntes de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos”. Universidad Politécnica de Cartagena.

- **Castillo-E, L.G. (2008).** “Validation of instantaneous velocities measurements with ADV equipment in turbulent high two-phase flows”. The Eight International Conference on Hydro-Science and Engineering (ICHE-2008). Nagoya, Japan, September, 8-12 (Aceptado para publicación).

- **Chanson, H. (2005).** “Air bubble entrainment in hydraulic jumps. Similitude and scale effects”. The University of Queensland.

- **French H. R. (1988).** “Hidráulica de canales abiertos”. McGraw-Hill.

- **Hager, W. H. (1992).** “Energy dissipators and hydraulic jump”. Water Science and Technology Library. Ed. Kluwer Academic Publishers.

- **Harleman, D. R. F. (1958).** “Discussion of Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump”. Proc. ASCE, Hy., 6, Nov.

- **Leutheusser, H. J. y Kartha, V. C., (1972).** “Effects of Inflow Condition on Hydraulic Jump”. Proc. ASCE, Hy., Aug.

- **Márquez Mulero, A. (2005).** “Adaptación de un canal de laboratorio, medidas de velocidades instantáneas y filtrado de datos en algunos tipos de resaltos hidráulicos”. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniero Técnico de Obras Públicas, especialidad en Hidrología. Universidad Politécnica de Cartagena.

- **Márquez, MC. (2006).** “Caracterización paramétrica de resaltos hidráulicos libres y sumergidos a partir de medidas de velocidades instantáneas con equipo Doppler”. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.
- **Naudascher, E. (2002).** “Hidráulica de canales. Diseño de estructuras”. Ed. Limusa.
- **Rajaratnam, N. (1965).** “The Hydraulic Jump as a Wall Jet”. Proc. ASCE, Hy., Sept.
- **Ranga Raju, K. G. (1998).** “Flow Through Open Channels” Ed. Tata McGraw-Hill.
- **Silvester, R. (1964).** “Hydraulic Jump in All Shapes on Horizontal Channels”. ASCE. Journal of the Hydraulic Division, vol. 90, no. Hy. 1, January, pp. 23-55.
- **Sontek ADV Field (2001).** “Acoustic Doppler Velocimeter”. Technical Documentation.
- **Ven Te Chow (1998)** “Hidráulica de canales abiertos” Ed. McGraw-Hill.
- **Wilson, E. H. y Turner, A. A., (1972).** “Boundary Layer Effects on Hydraulic Jump Location”. Proc. ASCE, Hy., July.