

Proyecto Fin de Carrera

Universidad Politécnica de Cartagena

*Determinación de la distribución de velocidades en un
cuenco de disipación de energía de un vertedero de caída
libre.*

Daniel Sánchez Peña

Dirigido por:

D. Luis G. Castillo Elsitdié

Dr. Ingeniero de Caminos, C y P.

Cartagena, Diciembre 2012

*Quiero agradecer a todas las
personas que han hecho posible
la realización de este proyecto.*

Índice

1. INTRODUCCION	4
2. OBJETIVOS	5
3. RESUMEN.....	6
3.1. Configuración de la sonda.....	6
3.2. Resaltos hidráulicos sumergidos estudiados	6
3.3. Filtrado de datos.....	6
3.4. Análisis de las velocidades.....	10
3.5. Longitud de resalto.....	12
3.6. Campos de velocidad	13
3.7. Perdidas de energía.....	15
4. BASES TEORICAS.....	18
4.1 Disipadores de energía	20
4.2. Resalto hidráulico.....	22
4.2.1. Resalto hidráulico sumergido.....	25
4.3. Análisis de la disipación de energía	27
4.3.1. Características generales del flujo en el cuenco.....	28
4.3.2 Condiciones de flujo en el cuenco en función del calado aguas abajo.....	31
5. MATERIAL UTILIZADO.....	35
5.1. Infraestructura	35
5.2. Vertedero triangular	39
5.3. Sonda ADV.....	42
5.3.1. Método biestático y transformación Doppler.....	42
5.3.2. Geometría de la sonda y mediciones de velocidad.....	45
5.3.3. Definición del volumen de muestreo.....	46
5.3.4. Datos ADV.....	47
5.3.5. Novedades de la sonda Vectrino ADV.....	50
5.4. Vectrino plus	51
5.5. Explore V pro.....	53
5.5.1. Opciones del programa.....	57
6. CAMPAÑA DE MUESTREO.....	59
7. FILTRADO DE VELOCIDADES.....	62

7.1. Métodos de filtrado.....	64
7.2. Resultados del filtrado.....	67
7.2.1. Varianza baja.....	67
7.2.2. Varianza media.....	72
7.2.3. Varianza alta.....	77
8. ANALISIS DE VELOCIDADES	82
8.1. Caudal de 0.01945 m ³ /s.....	82
8.2. Caudal de 0.03067 m ³ /s.....	93
8.3. Caudal de 0.04531 m ³ /s.....	104
9. LONGITUD EN RESALTO HIDRÁULICO SUMERGIDO	115
10. CAMPOS DE VELOCIDAD MEDIA EN LOS RESALTOS HIDRAULICOS.....	119
11. PERDIDA DE ENERGÍA EN RESALTOS HIDRÁULICOS SUMERGIDOS	124
12. CONCLUSIONES	134
ANEXO 1: TABLAS DE VELOCIDADES.....	137
ANEXO 2: TABLAS DE RESALTOS HIDRÁULICOS SUMERGIDOS.....	223
ANEXO 3: TABLAS DE DISTRIBUCION DE VELOCIDAD	224
BIBLIOGRAFIA.....	260

1. INTRODUCCION

En este Proyecto Fin de Carrera se realiza el análisis de velocidades medidas en la formación de resaltos hidráulicos sumergidos obtenidos en un cuenco de amortiguación de un vertedero de caída libre.

El fenómeno hidráulico se desarrolla en flujo permanente rápidamente variado, caracterizado por una elevada turbulencia y arrastre de altas tasas de aireación.

La campaña de toma de datos se realiza en una infraestructura que consiste en un vertedero de pared delgada que descarga sobre un cuenco de amortiguación de metacrilato, en el cual se puede ajustar tanto el caudal circulante como el colchón de agua en el cuenco.

La medida de velocidades instantáneas se ha realizado con una sonda ADV (Acústic Doppler Velocímeter) que funciona por medio del efecto Doppler.

Los datos medidos se analizan mediante un programa de postprocesado (explore V pro). Se han probado varios métodos para tratar de filtrar los distintos datos anómalos que se producen en la medición de un flujo bifásico agua-aire.

Podemos dividir el trabajo en tres partes diferenciadas:

-Campaña de mediciones. Ha consistido en la medición de velocidades instantáneas en distintas secciones del cuenco de amortiguación, separadas cada 10 cm, registrándose 5000 muestras a una frecuencia de 10 Hz con equipo ADV.

-Filtrado de los datos. Se analizan los datos recogidos para su evaluación y validación. Para ello, se usan diferentes criterios y metodologías de filtrado de datos. Esta fase surge de la especial importancia que requiere la correcta interpretación de los datos medidos para su posterior caracterización de los diferentes parámetros hidráulicos.

-Análisis de los resultados. Se estudian los perfiles de velocidad horizontal y vertical para cada sección y cada colchón. Con la ayuda de gráficas, agrupando las secciones del mismo colchón se obtiene una visión general de la tendencia de las velocidades y las características de los resaltos hidráulicos sumergidos.

2. OBJETIVOS

Los principales objetivos de este Proyecto Fin de Carrera son:

-Ahondar en el conocimiento de las estructuras hidráulicas sometidas a la acción de las cargas hidrodinámicas, y en particular de disipadores de energía a pie de una presa de bóveda. Los problemas a resolver son multidisciplinarios, necesitándose un conocimiento profundo de ingeniería hidráulica. Todos los análisis dependerán de la calidad de información obtenida en laboratorio.

- Aprendizaje y correcto uso de una de las nuevas técnicas e instrumentación asociada para la medición de las velocidades instantáneas en flujos en lámina libre.

- Adquisición de datos por medio de un equipo Doppler, validación de datos y filtrado numérico, contrastación teórico-experimental de las distribuciones de velocidad e índice turbulentos.

- Estudio paramétrico de la distribución de velocidades instantáneas, medias y fluctuantes en distintas posiciones del resalto hidráulico sumergido en distintas secciones de un cuenco amortiguador de un aliviadero de vertido libre.

-Análisis de pérdida de carga y eficiencias del resalto hidráulico sumergido.

3. RESUMEN

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

3.1. 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 250 cm/s y la frecuencia de muestreo que fue de 10 Hz. Otro parámetro fundamental es la salinidad, cuyo valor estimado fue de 2 ppm.

3.2. Resaltos hidráulicos sumergidos estudiados

Se han seleccionado 3 caudales de trabajo diferentes, controlados con un aforo de vertedero triangular, del cual obtenemos la medida de caudal a través de la lectura del calado en un limnómetro. Los caudales seleccionados son 19.45 l/s, 30.67 l/s y 45.31 l/s.

Para cada caudal se han creado 6 colchones diferentes con la colocación de barreras aguas abajo del cuenco a modo de contrapresa. Por tanto, hemos estudiado 6 resaltos hidráulicos sumergidos para cada caudal de trabajo, un total de 18 resaltos hidráulicos sumergidos.

Para la correcta caracterización de la velocidad del flujo, el cuenco de disipación se dividió en secciones transversales espaciadas cada 10cm, tomando como sección de referencia la zona de impacto directo del chorro sin ninguna barrera.

3.3. Filtrado de datos

La medición de velocidades instantáneas mediante instrumentación Doppler ADV, es de gran ayuda en hidráulica a la hora de caracterizar el flujo, ya sea en laboratorio o en el campo (ríos, canales, estructuras hidráulicas, etc.).

El equipo es muy fiable en flujos unifásicos sin presencia de aire, puesto que el agua constituye el elemento fundamental de transmisión de la señal. Sin embargo, para el caso de flujos bifásicos (agua-aire) las señales suelen estar afectadas, en mayor o menor grado, por la presencia de burbujas de aire que se interponen en la recepción de datos, y que provocan la aparición de datos erróneos denominados “spikes”.

De ahí la necesidad de elaborar métodos de filtrado de datos que permitan depurar las patologías presentes en este tipo de flujos.

Mediante el tratamiento y filtrado de los datos se pueden eliminar los spikes sin comprometer la integridad del registro.

En este apartado se comparan los resultados de las diversas metodologías de filtrado mediante la observación de las gráficas de series de datos, desviación estándar y el número de spikes obtenidos.

En la siguiente tabla se exponen a modo de ejemplo los resultados obtenidos mediante los diferentes filtrados utilizados para la serie de mayor turbulencia.

	Umbral de velocidad	Umbral de aceleración λ	Ux (cm/s)	Varianza (cm ² /s ²)	Desviación (cm/s)	n°Spikes	%Datos originales
ORIGINAL			14.28	17021.82	130.47		
Gorin y Nikora (2009)	1.5	1.25	18.62	4940.28	70.29	4712	5.76
Molina (2010)	2.5	0.5	28.94	9138.05	95.59	4957	0.78
	1	–	19.21	4397.80	66.32	3306	33.88
	1.5	–	21.03	9117.64	95.49	1892	62.16
	1.75	–	21.42	11493.10	107.21	1234	75.32
	2	–	19.54	13623.61	116.72	736	85.28
	2.25	–	17.96	15473.43	124.39	340	93.20
	2.5	–	16.30	16605.33	128.86	106	97.88
	3	–	14.34	17052.11	130.58	11	99.78
		1.5	16.87	6712.60	81.93	4531	9.38
	–	2	19.47	6380.93	79.88	4173	16.54
	–	2.5	21.66	6667.97	81.66	3791	24.18
	–	4	20.05	9434.30	97.13	2344	53.12
	–	5	18.94	11390.81	106.73	1555	68.9
	–	6	18.00	12852.40	113.37	956	80.88
	–	6.5	18.59	13723.16	117.15	692	86.16
	–	7	17.40	14204.46	119.18	516	89.68
	–	7.5	16.83	15031.91	122.60	363	92.74
	–	8	15.82	15526.70	124.61	253	94.94
	–	8.5	15.21	16016.28	126.56	163	96.74
	2	7	19.82	12520.54	111.90	1002	79.96
	2	8	18.96	13168.97	114.76	845	83.10
	2.5	6	18.52	12859.65	113.40	1020	79.60
	2.5	7	18.03	14198.66	119.16	588	88.24
	2.5	8	16.88	15400.92	124.10	333	93.34
	3	6	18.08	12877.89	113.48	967	80.66
	3	7	17.47	14230.86	119.29	527	89.46
	3	8	15.89	15554.92	124.72	264	94.72

Tabla 1: Resultados de filtrados para la serie con mayor varianza.

Con los datos anteriores se puede observar que los valores de Gorin y Nikora (2009) disminuyen la desviación típica pero consideran 4712 spikes, conservando únicamente un 5.76% de los datos originales. Por tanto, este filtrado desecha demasiados datos.

El filtrado de Molina utiliza un valor bajo de λ , lo que conlleva a detectar 4957 spikes, conservando un 0.7 % de los datos originales y desechando casi toda la serie de datos.

El filtrado de umbral de correlación no se ha utilizado por presentar muy malos resultados y requerir valores muy bajos del coeficiente de correlación (inferiores al 30%).

Los valores de umbral de velocidad k entre 1.75 y 2.5 dan buenos resultados, disminuyendo los datos anómalos a ambos lados de las líneas de referencia y manteniendo un gran porcentaje de datos.

A continuación se exponen algunos de los resultados gráficos de los filtrados de datos con los diferentes parámetros de la serie mayor varianza.

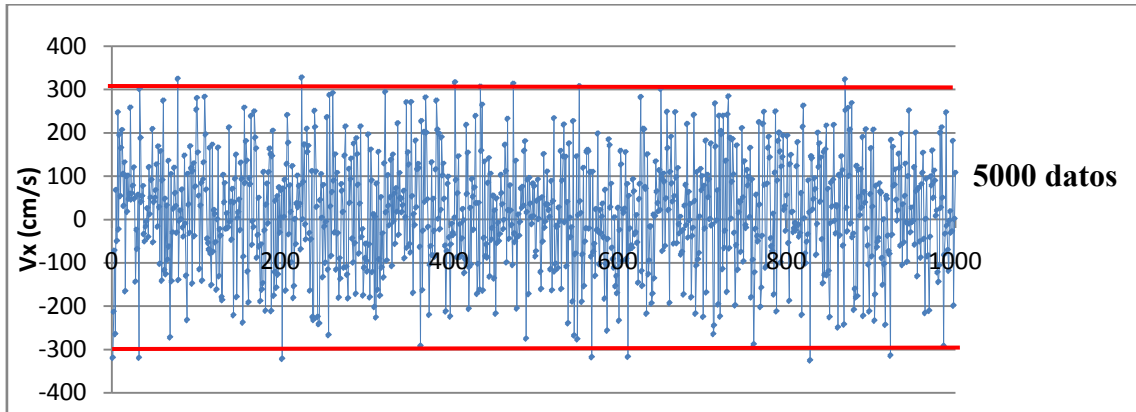


Figura 1: Serie de varianza alta original.

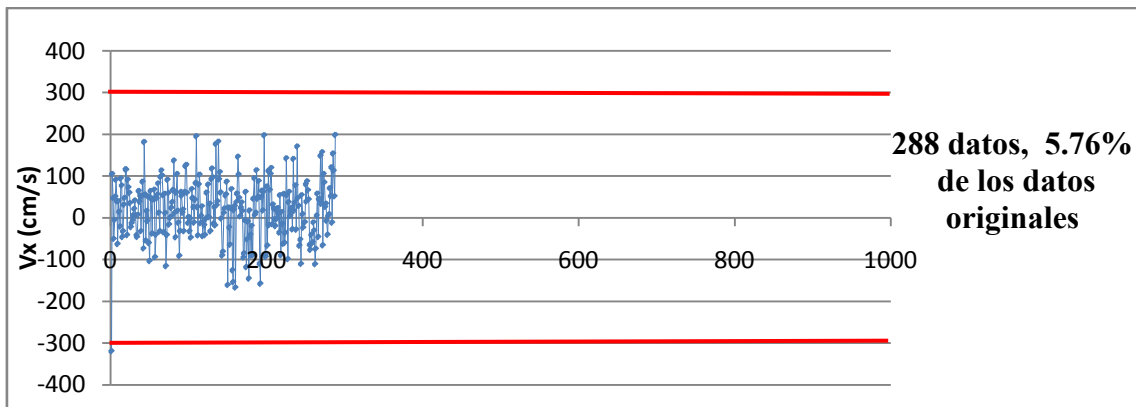


Figura 2: Serie de varianza alta con filtrado $k=1.5$ y $\lambda=1.25$.

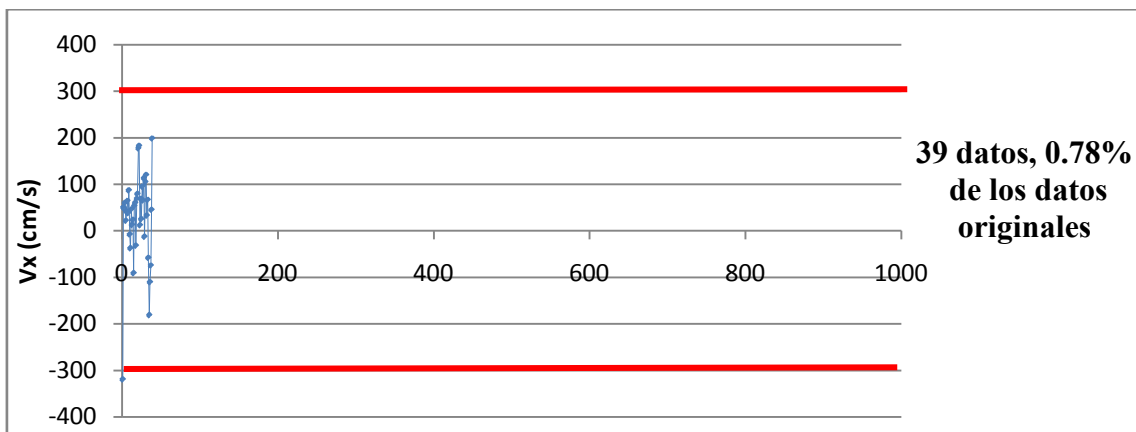


Figura 3: Serie de varianza alta con filtrado $k=2.5$ y $\lambda=0.5$.

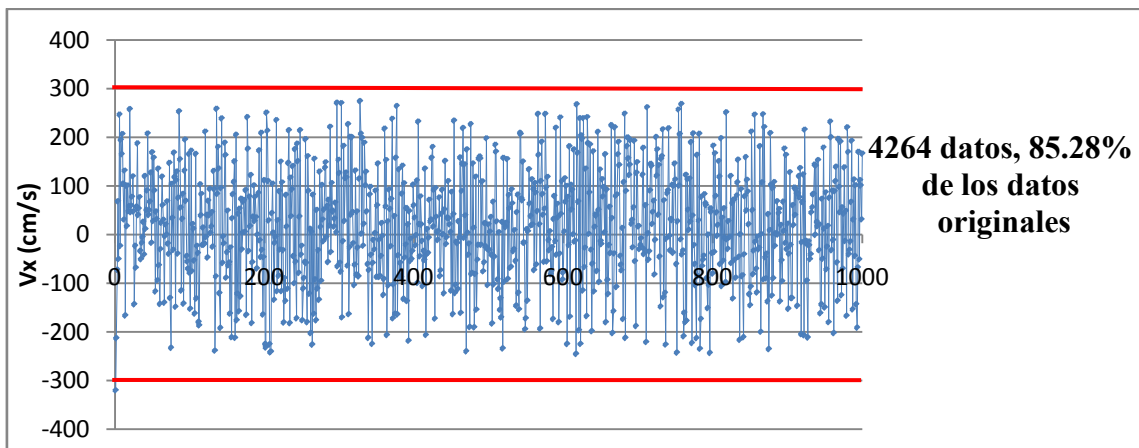


Figura 4: Serie de varianza alta con filtrado $k=2$.

Se concluye que el parámetro que mejores resultados presenta en todas las series es el umbral de velocidad k .

3.4. Análisis de las velocidades

En este apartado se estudian las distribuciones de velocidades medias en las direcciones horizontal (en el sentido del flujo) y vertical. Se grafican conjuntamente todas las secciones de un mismo colchón para ver la evolución de las velocidades a lo largo del cuenco de amortiguación. Posteriormente se analizan por separado para estudiarlas más detalladamente.

A modo de ejemplo se muestran los resultados obtenidos con el caudal de 19.45 l/s para un colchón $y = 0.3$ m formado por 3 barreras en la zona de la contrapresa.

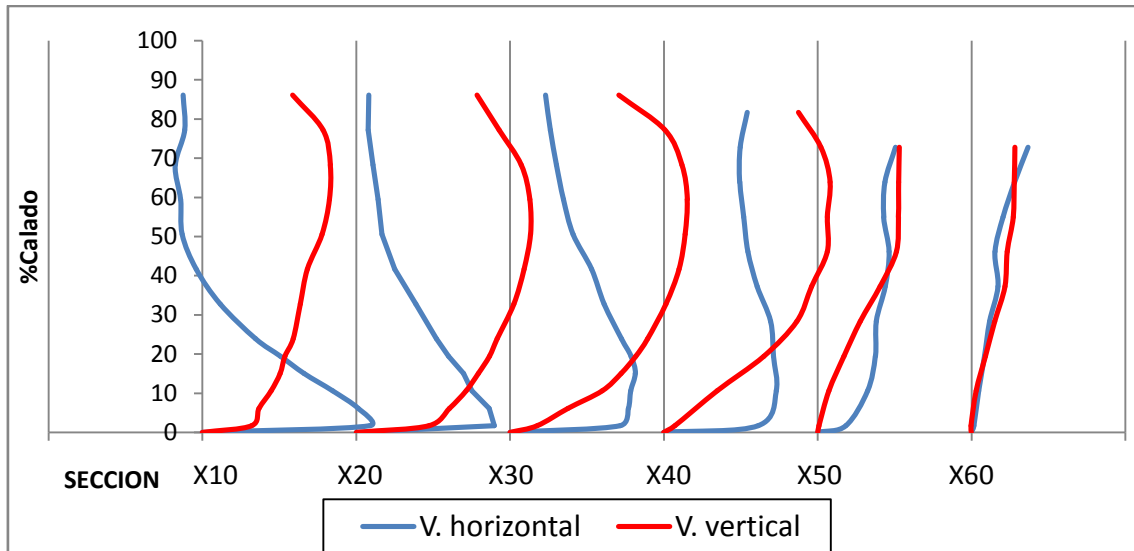


Figura 5: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.3$ m.

En el perfil de velocidades horizontales medias se puede observar como en este caso las velocidades disminuyen en las secciones más lejanas al chorro. Las velocidades máximas se encuentran pegadas a la solera alcanzando el máximo (54.45cm/s) para la sección más cercana al chorro (X=10) y disminuyendo al alejarse de la solera llegando a ser negativa partir del 40% del calado.

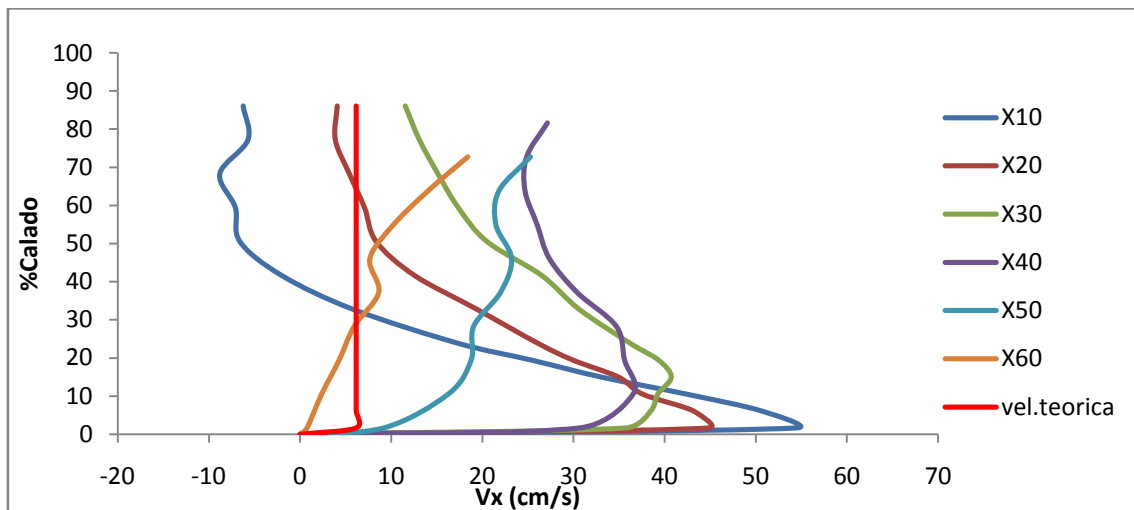


Figura 6: Velocidades horizontales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.3$ m.

Las velocidades verticales aumentan a medida que se aumenta la distancia al fondo, y disminuyen al aumentar la distancia al chorro incidente

A partir de la sección X=40 se deja de percibir el chorro de fondo en la velocidad horizontal. Por tanto, el final del resalto hidráulico está comprendido entre esta sección y la siguiente.

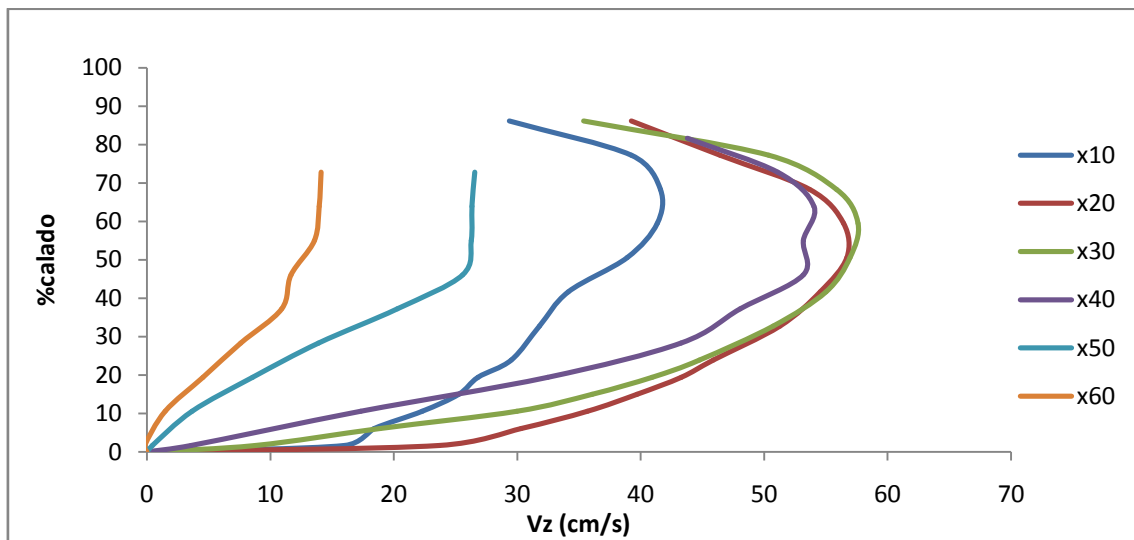


Figura 7: Velocidades verticales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.3$ m.

3.5. Longitud de resalto

Considerando y_0 como el calado contraído e y_3 como la profundidad al comienzo del resalto sumergido, se generaron diferentes resaltos sumergidos para observar las condiciones de flujo, y medir el perfil superficial y los campos de velocidad.

Como en el caso de los resaltos libres, el final del resalto sumergido ($x=L_{sj}$) se determina como la primera sección donde casi no existe una variación de la velocidad máxima del flujo. Así, L_{sj} es la longitud del resalto, siendo y_4 la profundidad del agua donde $x=L_{sj}$.

Con el estudio de las gráficas del apartado 8 (Análisis de velocidades), se ha fijado la longitud del resalto hidráulico observando las secciones donde casi no existe una variación de velocidad. Los resultados obtenidos en laboratorio se han comparado con las formulaciones propuestas por Ohtsu et al. (1990), Márquez (2009), Silvester (1964) y Rao y Rajaratnam (1963).

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos:

Y0	Y3	V0	F0	y2	Y4	V4	y4/y2	Ohtsu		Marquez		Silvester	Rajarat.	Bureau	observ.
								Lj	Lj/y2	Lj	Lj/y2	Lj	Lj	Lj	
0.0150	0.1150	1.2349	3.2193	0.0612	0.1250	0.1482	2.0424	0.6801	11.1121	0.7439	12.1556	0.3188	0.6859	0.3733	0.4
0.0150	0.1950	1.2349	3.2193	0.0612	0.2000	0.0926	3.2679	1.0551	17.2394	1.3019	21.2730	0.3188	1.0534	0.3733	0.4
0.0150	0.3080	1.2349	3.2193	0.0612	0.3130	0.0592	5.1142	1.6201	26.4711	2.1427	35.0098	0.3188	1.6071	0.3733	0.4
0.0150	0.3900	1.2349	3.2193	0.0612	0.3875	0.0478	6.3315	1.9926	32.5575	2.6969	44.0664	0.3188	1.9722	0.3733	0.4
0.0150	0.4700	1.2349	3.2193	0.0612	0.4670	0.0397	7.6305	2.3901	39.0524	3.2884	53.7308	0.3188	2.3617	0.3733	0.3
0.0150	0.5650	1.2349	3.2193	0.0612	0.5550	0.0334	9.0684	2.8301	46.2418	3.9431	64.4285	0.3188	2.7929	0.3733	0.3

Tabla 2: Longitudes de resalto para $Q=19.45$ l/s.

Y0	Y3	V0	F0	y2	Y4	V4	y4/y2	Ohtsu		Marquez		Silvester	Rajarat.	Bureau	observ.
								Lj	Lj/y2	Lj	Lj/y2	Lj	Lj	Lj	
0.0200	0.1225	1.4605	3.2972	0.0838	0.1050	0.2782	1.2531	0.6004	7.1654	0.5265	6.2829	0.4401	0.6151	0.5111	0.6
0.0200	0.2250	1.4605	3.2972	0.0838	0.2335	0.1251	2.7866	1.2429	14.8331	1.4825	17.6924	0.4401	1.2447	0.5111	0.6
0.0200	0.3300	1.4605	3.2972	0.0838	0.3250	0.0899	3.8786	1.7004	20.2929	2.1633	25.8167	0.4401	1.6931	0.5111	0.6
0.0200	0.4250	1.4605	3.2972	0.0838	0.4150	0.0704	4.9527	2.1504	25.6633	2.8329	33.8078	0.4401	2.1341	0.5111	0.5
0.0200	0.5000	1.4605	3.2972	0.0838	0.4900	0.0596	5.8477	2.5254	30.1386	3.3909	40.4670	0.4401	2.5016	0.5111	0.3
0.0200	0.5870	1.4605	3.2972	0.0838	0.5800	0.0504	6.9218	2.9754	35.5089	4.0605	48.4581	0.4401	2.9426	0.5111	0.2

Tabla 3: Longitudes de resalto para $Q= 30.67$ l/s.

Y0	Y3	V0	F0	y2	Y4	V4	y4/y2	Ohtsu		Marquez		Silvester	Rajarat.	Bureau	observ.
								Lj	Lj/y2	Lj	Lj/y2	Lj	Lj	Lj	
0.0230	0.0800	1.8762	3.9498	0.1175	0.1200	0.3596	1.0214	0.7057	6.0068	0.5356	4.5590	0.6515	0.729	0.7167	0.3
0.0230	0.2325	1.8762	3.9498	0.1175	0.2550	0.1692	2.1704	1.3807	11.7520	1.5400	13.1078	0.6515	1.3905	0.7167	0.4
0.0230	0.3400	1.8762	3.9498	0.1175	0.3450	0.1251	2.9364	1.8307	15.5822	2.2096	18.8071	0.6515	1.8315	0.7167	0.7
0.0230	0.4550	1.8762	3.9498	0.1175	0.4400	0.0981	3.7450	2.3057	19.6251	2.9164	24.8229	0.6515	2.297	0.7167	0.8
0.0230	0.5450	1.8762	3.9498	0.1175	0.5225	0.0826	4.4472	2.7182	23.1360	3.5302	30.0472	0.6515	2.7012	0.7167	0.5
0.0230	0.6200	1.8762	3.9498	0.1175	0.6000	0.0719	5.1068	3.1057	26.4342	4.1068	34.9549	0.6515	3.081	0.7167	0.5

Tabla 4: Longitudes de resalto para $Q=45.31$ l/s.

Se observa que el método de Ohtsu (1990), el método ajustado por Márquez (2006) y el método de Rao y Rajaratnam (1963) dan valores mayores a los de laboratorio, mientras que los métodos de Silvester (1964) y Bureau of Reclamation se ajustan mejor.

3.6. Campos de velocidad

Rajaratnam (1965) realizó una investigación del campo de velocidades en resaltos libres, los que asemeja a chorros de pared, pero los cambios en las características de la velocidad dependientes de F_l no han sido totalmente descritos.

Examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, se observa una distribución de velocidades semejante dentro del rango $0.2 \leq x/L_j \leq 0.7$ independiente de F_l y x , donde la longitud escalar Y es la distancia perpendicular a la solera en la que la velocidad media u es la mitad de la velocidad media máxima u_m de la

sección, con gradiente de velocidad negativo, e y_{max} es la distancia perpendicular a la solera en la que $u=u_m$.

En la siguiente figura se representa y/Y en función de u/u_m junto con las leyes teóricas general y para resaltos sumergidos de Márquez (2006) y la ley de resaltos sumergidos obtenidas para relaciones y_4/y_0 elevadas.

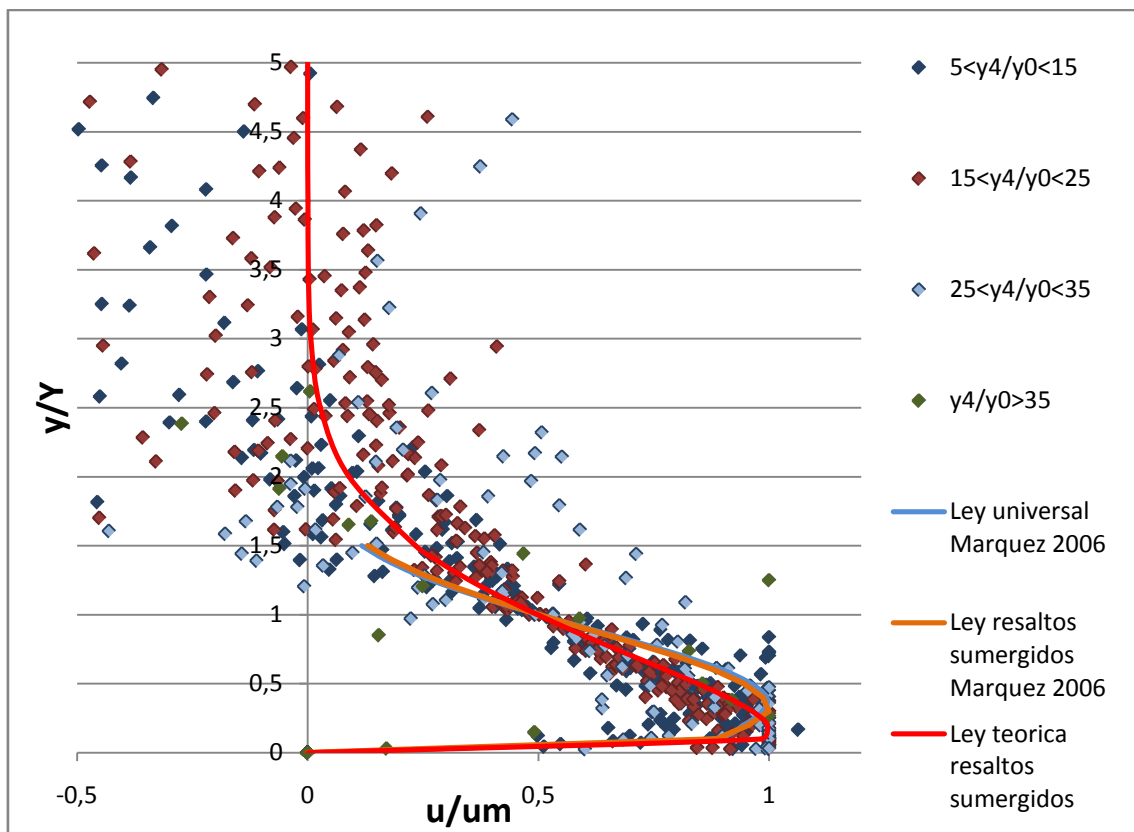


Figura 8: Distribución de velocidades en resaltos sumergidos.

Las ecuaciones de Ohtsu con los coeficientes propuestos por Márquez para la ley universal y resaltos sumergidos no se ajustan bien a nuestro caso, mientras que la ley teórica propuesta se ajusta mejor para los resaltos sumergidos que presentan una relación y_4/y_0 alta.

3.7. Pérdidas de energía

En la siguiente grafica se analizan los resultados de pérdida de energía relativa en los resaltos hidráulicos sumergidos estudiados. Se representan los valores obtenidos experimentalmente en grupos según la relación y_3/y_0 junto con los resultados obtenidos por Márquez (2006) e Inglés (2009).

Con el fin de ver el grado de ajuste a los resultados obtenidos, se han realizado leyes teóricas para determinados valores de y_3/y_0 .

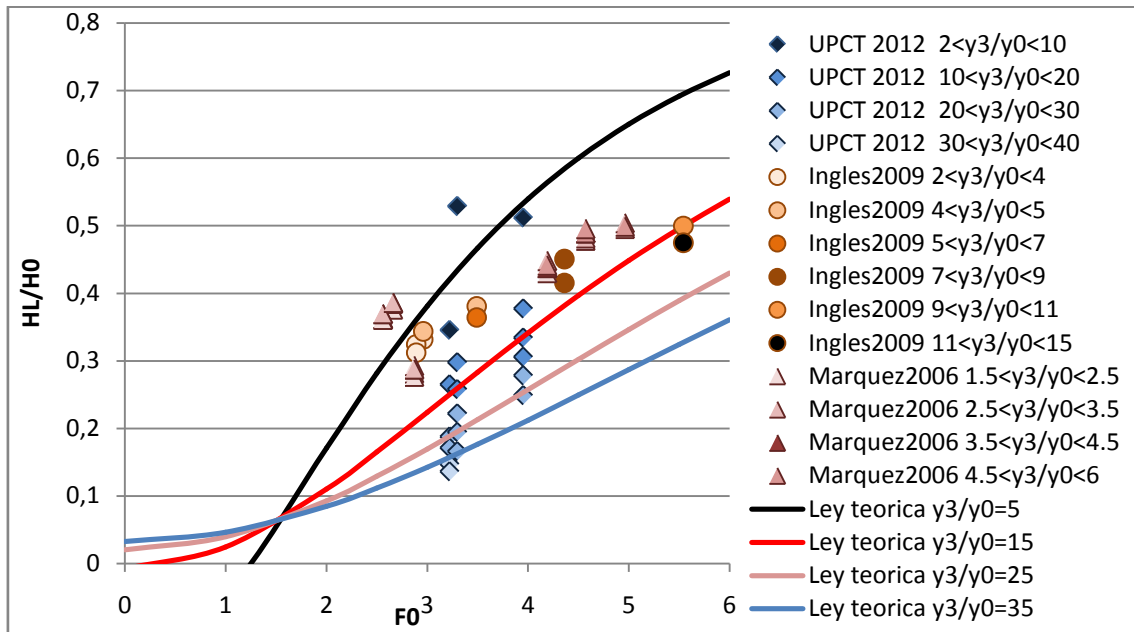


Figura 9: Pérdida relativa de energía en resaltos sumergidos, H_L/H_0 vs F_0 .

En nuestro caso, los resultados se encuentran dentro de los márgenes establecidos por la formulación teórica, observándose como las leyes teóricas pasan por el centro de la nube de puntos en cada intervalo y_3/y_0 definido.

En la siguiente figura se grafica la relación $H_L/H_0 = f(y_3/y_0, F_0)$ junto con unas leyes teóricas establecidas en función de F_0 .

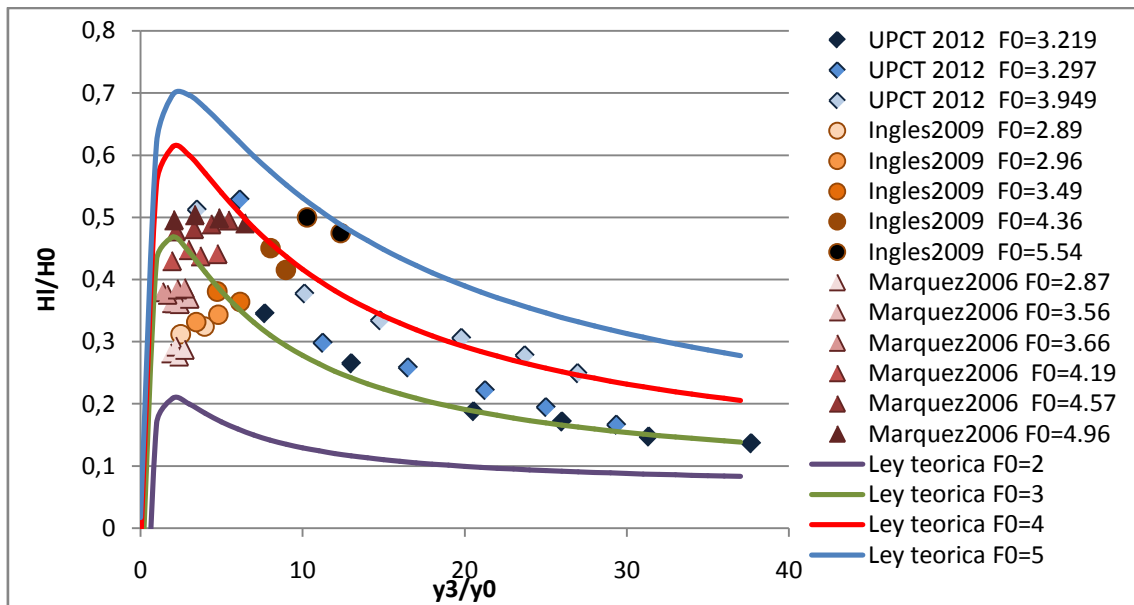


Figura 10: Pérdida de energía relativa para resaltos sumergidos. H_1/H_0 vs y_3/y_0 .

En general, los resultados se ajustan a las leyes teóricas, obteniéndose los valores entre las curvas teóricas correspondientes a $F_0=3$ y $F_0=4$.

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

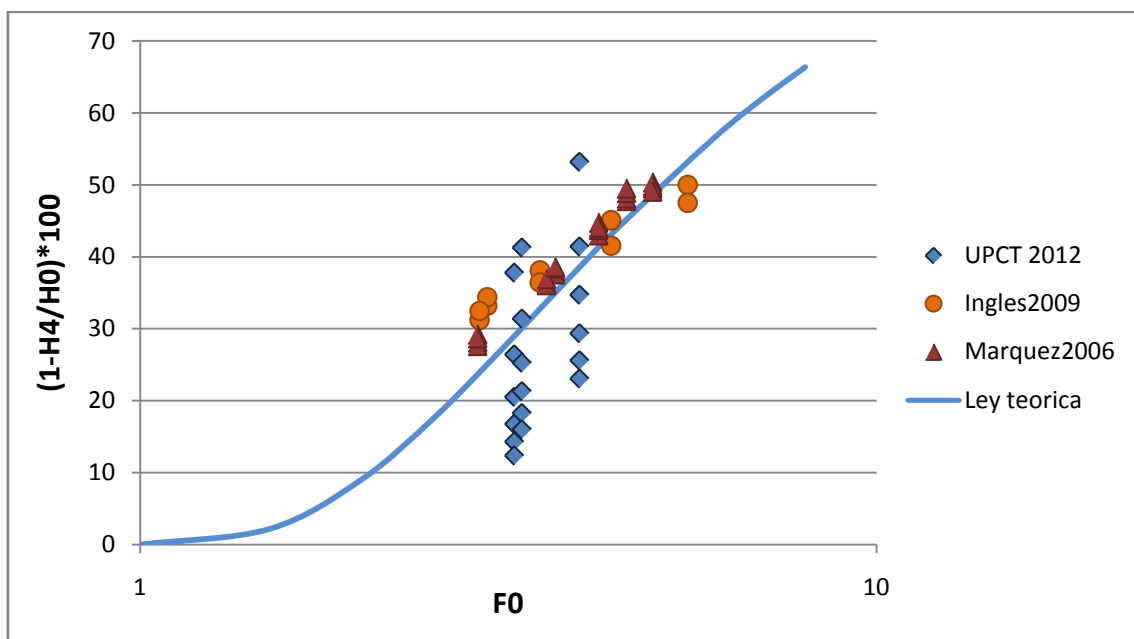


Figura 11: Disipación de energía en resaltos sumergidos para velocidades medias.

Se observa que el porcentaje de disipación de energía aumenta con el Número de Froude.

Por último, se ha evaluado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos sumergidos debida a la reducción de velocidades máximas entre la sección inicial del resalto ($x=0$) y la sección final del mismo ($x=L_j$).

En la siguiente figura se han representado los resultados obtenidos, junto con los de Márquez (2006) e Inglés (2009). Se ha graficado la ley teórica de disipación de energía debida a la reducción de velocidades máximas para resaltos hidráulicos libres obtenida por Inglés (2009), quien no observó una gran diferencia entre el caso de resaltos libres y sumergidos.

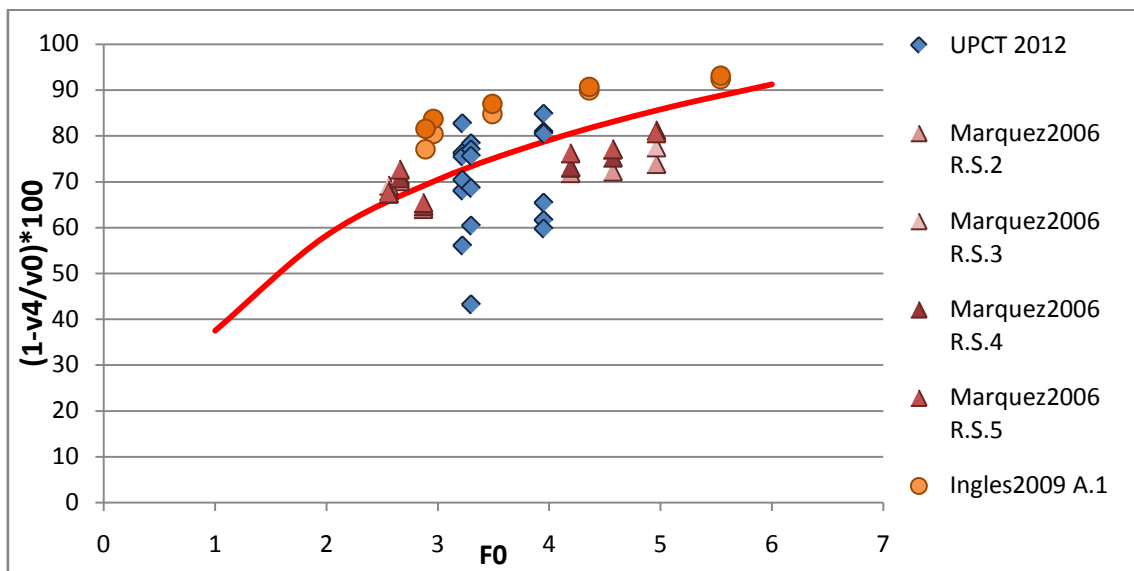


Figura 12: Disipación de energía en resaltos sumergidos debido a la reducción de velocidades máximas.

Los resultados obtenidos en el cuenco de disipación se encuentran bastante dispersos, tendiendo a situarse entre el 60% y el 90% de disipación de energía.

4. BASES TEORICAS

Una presa es una estructura hidráulica que se asienta sobre un cauce provocando el cierre del río, de forma que el agua se remansa en un embalse. De este modo, la presa y el embalse son dos conceptos separados que forman un conjunto indivisible (Figura 13).



Figura 13: Embalse de Porma (www.chduero.es, 2012).

El agua almacenada se evacua por medio de aliviaderos y desagües. La función principal de los aliviaderos es desaguar las aportaciones de agua cuando se sobrepasa la capacidad del embalse, evitando situaciones de desborde por coronación. Los aliviaderos llevan asociada una estructura de disipación, pudiendo presentarse diferentes tipologías (Figura 14).

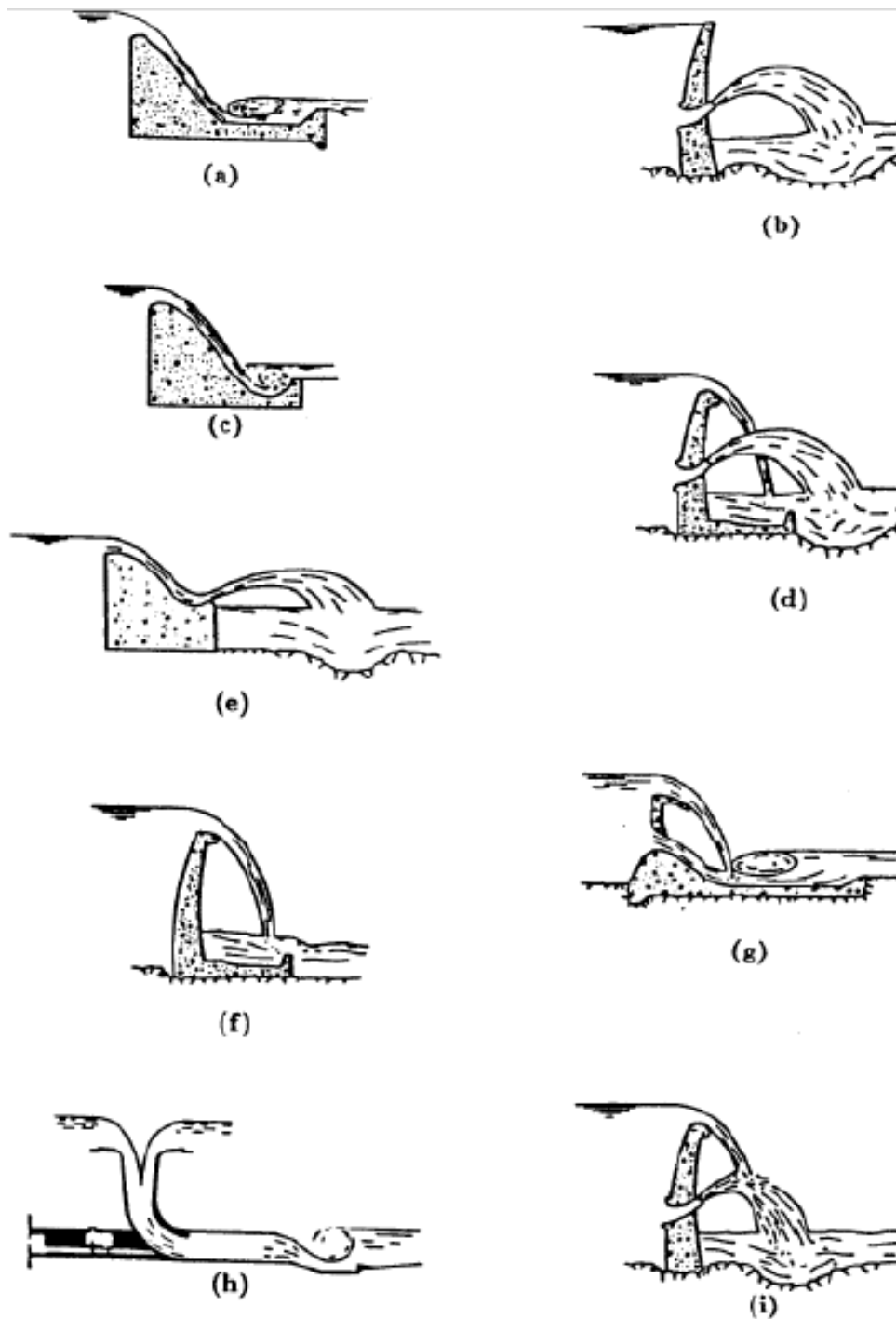


Figura 14: Tipología de los Disipadores de Energía Hidráulica de las Presas: (a) Por Resalto; (b) Salto de Ski de Medio Fondo; (c) Trampolín Sumergido; (d) Lámina libre y Medio Fondo; (e) Salto de Ski; (f) Lámina Libre; (g) Lámina libre y Compuerta de Fondo; (h) En Pozo con terminal en resalto; (i) Chorros Cruzados entre Lámina Libre y Medio Fondo (Lencastre, 1985; citado por Castillo, 1989).

4.1 Disipadores de energía

El objetivo de los disipadores de energía es eliminar gran parte de la energía en flujos de alta velocidad, ya sea por fricción del agua con el aire, con la estructura disipadora o por fricción interna; limitando las erosiones en el punto de restitución al cauce natural y proporcionando un régimen de circulación lo más estable posible aguas abajo.

De las tipologías existentes, el vertido libre por coronación (figura 16) constituye una forma de disipación de energía simple, cómoda y económica (Castillo, 1989).

Estos vertederos están asociados a presas arco o de contrafuertes donde el espesor de la obra de fábrica y la geometría general no son favorables para guiar la vena líquida desde la cresta hasta el pie de presa.

Si la roca de cimentación es resistente a la erosión, el agua se puede dejar caer libremente sin protección. En caso contrario se debe prever alguna estructura para disipar la energía cinética del agua y amortiguar el impacto



Figura 15: Presa de AldeaDávila (Ingeniería y Computación, 2012).

En el vertido libre por coronación, el flujo cae libremente por la atmósfera a partir de la coronación de la presa hasta alcanzar el cuenco disipador ubicado a pie de presa, donde la vena líquida se difunde. A continuación se forma un resalto hidráulico sumergido, para posteriormente retomar el cauce del río a través del perfil hidrodinámico de la contrapresa (figura 16).

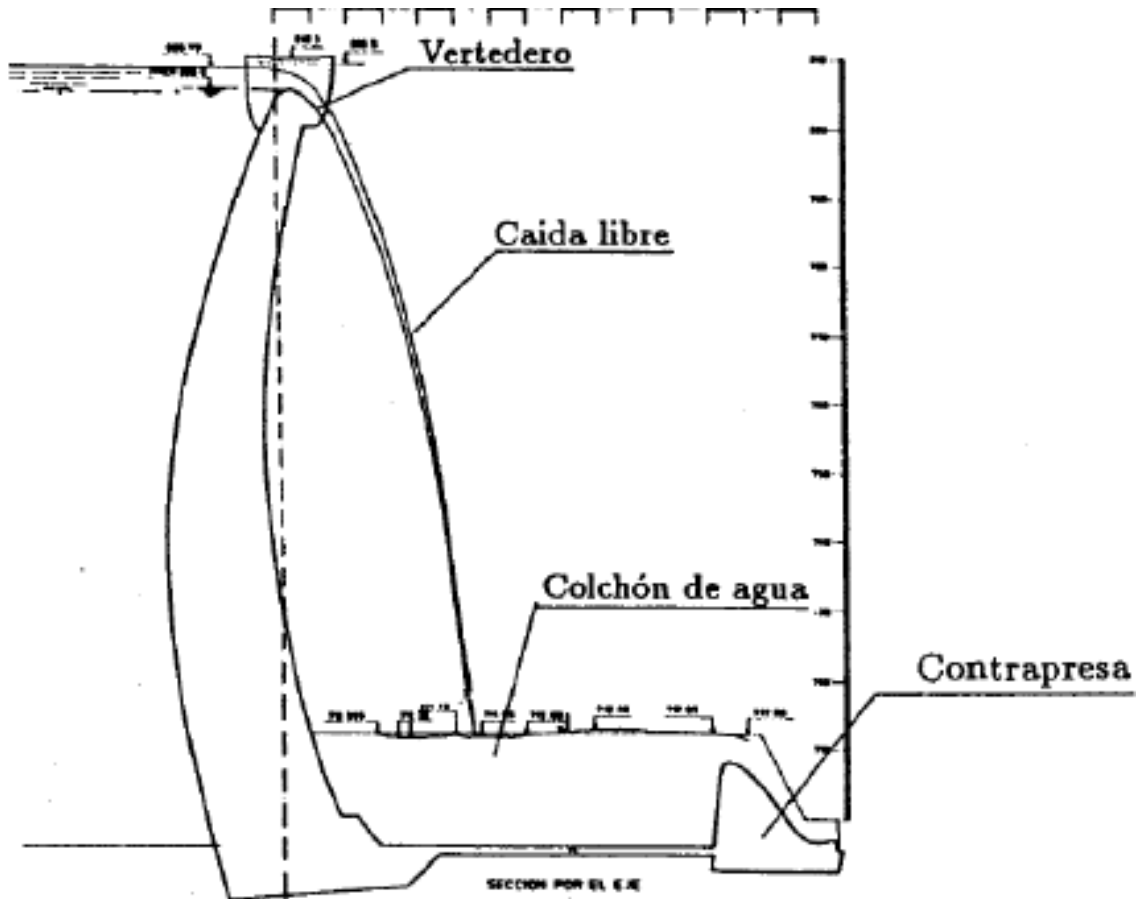


Figura 16: Perfil del vertedero de la presa bóveda LLosa del Cavall, con su disipador de energía al pie de la presa (Castillo, 1989).

Cuencos amortiguadores:

El cuenco de amortiguación disipa la energía cinética del flujo supercrítico al pie de presa antes de que el agua retorne al cauce del río. Los diseños se basan en el principio del resalto hidráulico, el cual transforma las altas velocidades del flujo incidente a velocidades que no puedan dañar el régimen de aguas abajo. La longitud del cuenco debe ser aproximadamente la longitud del resalto. Ésta se puede disminuir construyendo bloques de hormigón, dientes o sobrelevando la salida. El número de Froude indica la forma y características del resalto, lo que permite definir el tipo de cuenco.

Los cuencos disipadores de energía se encuentran sometidos a una fuerte acción erosiva como consecuencia de las altas velocidades que se obtienen de la transformación de la energía potencial creada por el embalse. Además de estas acciones, se producen altas presiones hidrodinámicas debido al efecto del impacto y de flexión del chorro turbulento sobre la solera.

El estudio realizado en este Proyecto se limita a caracterizar las velocidades del flujo, tanto horizontales como verticales, en una infraestructura de este tipo de disipadores de energía.

A continuación, se realiza un breve análisis teórico de la disipación de energía hidráulica en la base de las estructuras de caída, donde se definen las características generales de la disipación y la geometría del flujo. Seguidamente, se determinan de una forma más detallada, las condiciones del flujo en el cuenco disipador a pie de presa en función del calado aguas abajo. Por último, se analizan las principales características hidrodinámicas de los resaltos hidráulicos sumergidos.

4.2. Resalto hidráulico

Un resalto hidráulico es un fenómeno de variación rápida de la superficie libre del flujo, en la cual se produce una transición discontinua de flujo supercrítico a subcrítico en canales abiertos.

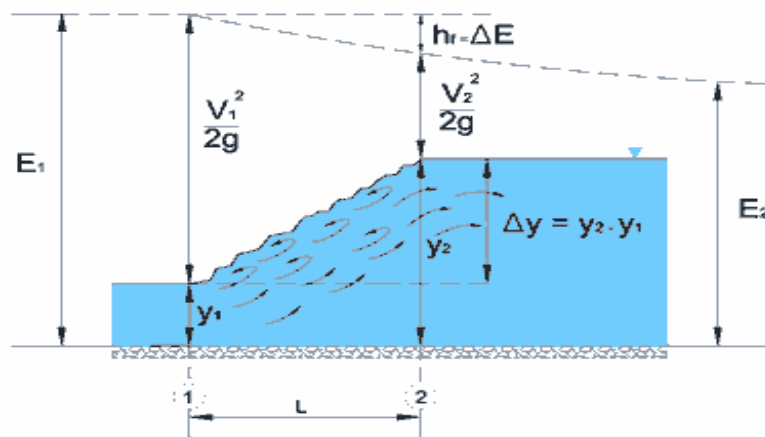


Figura 17: Resalto hidráulico (Cueva del ingeniero civil, 2012).

Generalmente, el resalto se forma cuando en una corriente rápida existe algún obstáculo o un cambio brusco de pendiente. Esto sucede al pie de estructuras hidráulicas tales como vertederos, rápidas, salidas de compuertas con descarga por el fondo, etc...

La condición de flujo se define por el número de Froude. Para el caso de un canal rectangular se tiene:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad 1$$

dónde $V=Q/A$ es la velocidad media de la sección transversal, Q es el caudal, A es el área de la sección, \sqrt{gy} es la celeridad de la onda superficial del agua, g es la aceleración de la gravedad e y es el calado.

Para $F < 1$ se produce un flujo subcrítico, mientras que el flujo es supercrítico si $F > 1$. Cuando $F = 1$ la velocidad del flujo es igual a la celeridad de la onda y el flujo se denomina crítico.

Tipos de resaltos hidráulicos:

De acuerdo con los estudios del U. S. Bureau of Reclamation los resaltos hidráulicos en fondos horizontales pueden clasificarse convenientemente según el número de Froude del flujo entrante, F_1 (figura 18):

-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 forma un *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 el extremo 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.

Los rangos del número de Froude dados arriba para los diferentes tipos de resalto no están claramente demarcados sino que se traslapan en cierto modo según las condiciones locales.

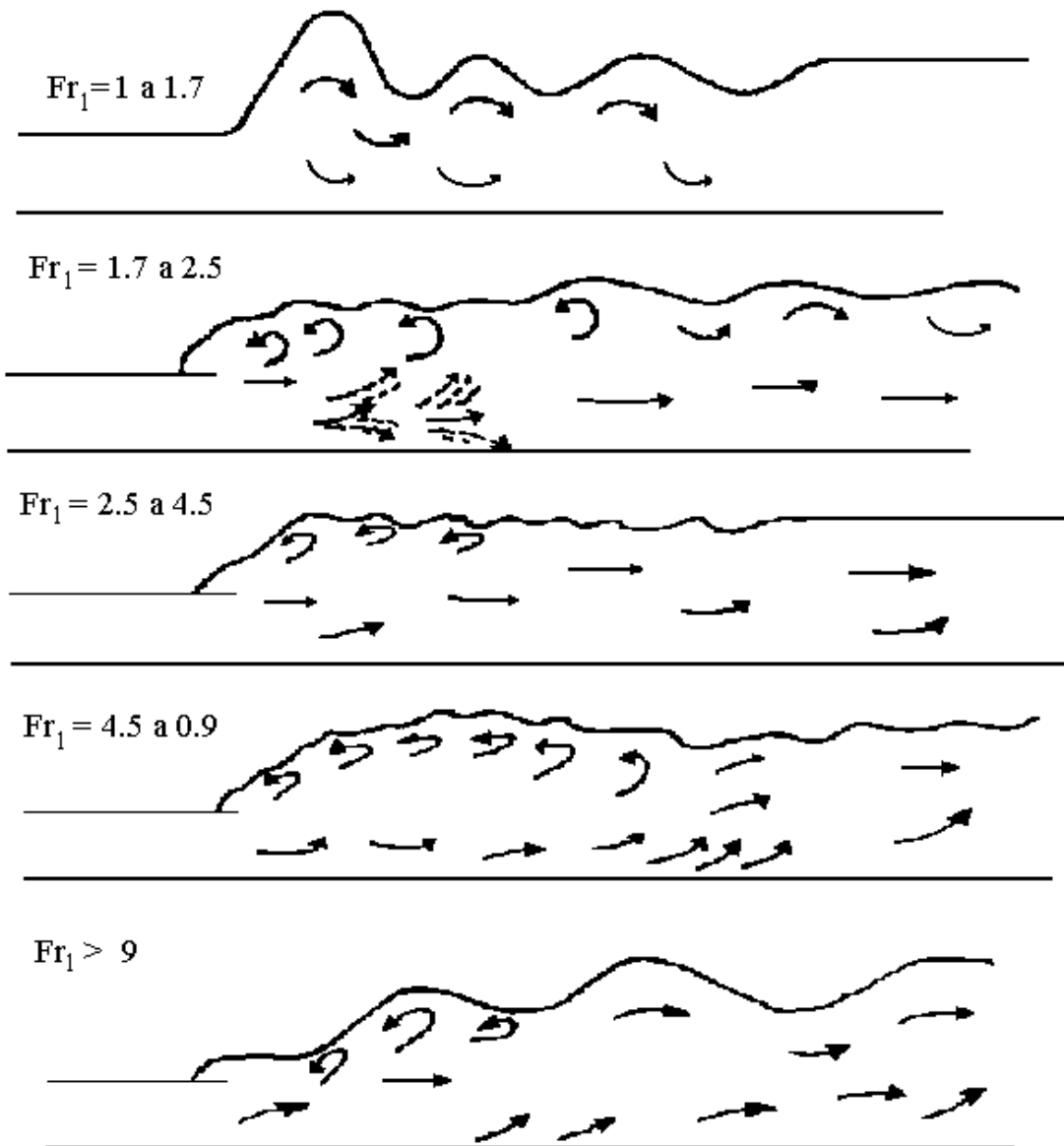


Figura 18: Tipos de resaltos hidráulicos (U. S. Bureau of Reclamation, 1987).

4.2.1. Resalto hidráulico sumergido

Podemos definir un resalto sumergido como el resalto cuyo inicio está cubierto de agua sin permitir acceso directo de la atmósfera al cuerpo del resalto. Como resultado, en un resalto sumergido entra mucho menos aire que en un resalto libre.

Para niveles bajos de calado aguas abajo del impacto, se genera un flujo de alta velocidad formándose un resalto hidráulico. Cuando se incrementa el nivel del calado aguas abajo, el inicio del resalto se mueve hacia aguas arriba y se adhiere al chorro como flujo de transición. Cuanto más se incrementa el nivel del calado aguas abajo, más turbulento se vuelve el resalto. El aire solamente entra en el resalto en períodos limitados de tiempo y el cuerpo del resalto se mueve contra el chorro para separarse después en un corto período de tiempo.

La conversión de un resalto libre a uno sumergido es muy dinámica y fluctuante, debiendo este tipo de funcionamiento evitarse por los efectos nocivos que producen el desarrollo depresiones dinámicas.

Como en el caso de los resaltos libres, el final del resalto sumergido se determina como la primera sección donde casi no existe una variación de la velocidad máxima del flujo. Así, en la figura 19, L_{sj} es la longitud del resalto. El calado y_4 es la profundidad del agua en la sección donde $x=L_{sj}$.

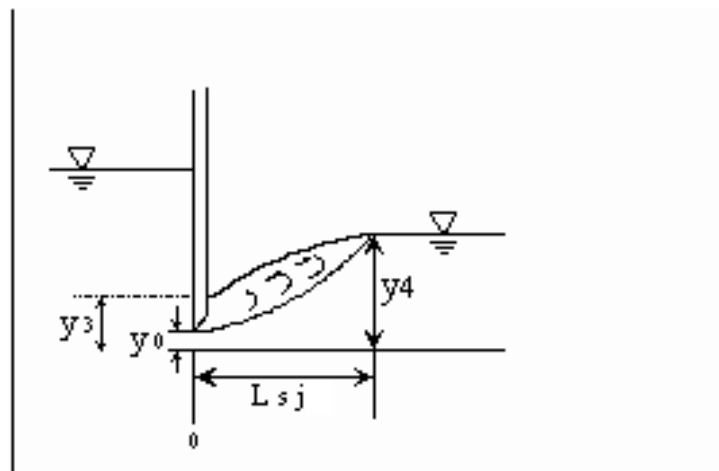


Figura 19: Principales magnitudes de un resalto hidráulico sumergido (Márquez, 2006).

Además, la sección donde $x=L_{sj}$ es la primera en la que la superficie del agua llega a estar nivelada y ya no se aprecia una alteración del flujo en la superficie. La sección donde todavía se observa un flujo alterado en la superficie se define como final del rulo, siendo L_{rsj} la longitud del rulo.

Cuando la inclinación de la superficie es pequeña, L_{rsj} y L_{sj} llegan a ser casi lo mismo, mientras que la diferencia entre L_{rsj} y L_{sj} llega a ser más grande cuando la inclinación de la superficie se incrementa.

Considerando el calado aguas abajo obtenido mediante la ecuación de Belanguer de los calados conjugados, y_2 , se tiene:

$$y_2 = y_0 \left(\sqrt{8F_0^2 + 1} - 1 \right) / 2 \quad 2$$

Ohtsu et al. (1990) propone la siguiente ecuación experimental para calcular la longitud de resaltos hidráulicos sumergidos.

$$\frac{L_{sj}}{y_2} = (5y_4/y_2) + 0.9 \quad 3$$

A partir de la ecuación 3 se puede obtener la siguiente expresión para el caso de resaltos libres ($y_4/y_2 = 1$):

$$L_{sj} = 5.9y_2 \quad 4$$

El coeficiente 5.9 es válido para un amplio rango de números de Froude ($6 \leq F_1 \leq 11$). Para números de Froude más bajos ($2.5 \leq F_1 \leq 5$) se debe aplicar un coeficiente del orden de 5.4.

Márquez (2006) propone una nueva curva de ajuste a partir de los resultados experimentales:

$$\frac{L_{sj}}{y_2} = (7.44y_4/y_2) - 3.04 \quad 5$$

Para el caso del resalto libre ($y_4/y_2 = 1$), se obtiene:

$$L_{sj} = 4.4y_2 \quad 6$$

Según estos resultados y el criterio de definición de la distancia L_{sj} , se observa que la longitud del resalto sumergido es inferior al valor considerado para resalto libre por el Bureau of Reclamation, ($L_j = 6.1y_2$).

Esta diferencia en la longitud del resalto libre es totalmente concordante con el criterio de definir la longitud del resalto hidráulico como una longitud intermedia entre la longitud del rulo L_{rj} y la longitud L_j definida en las medidas del Bureau of Reclamation y otros autores.

4.3. Análisis de la disipación de energía

A continuación se presenta el análisis global de energía hidráulica en la base de las estructuras de caída, en donde se definen las características generales de la disipación y la geometría de flujo.

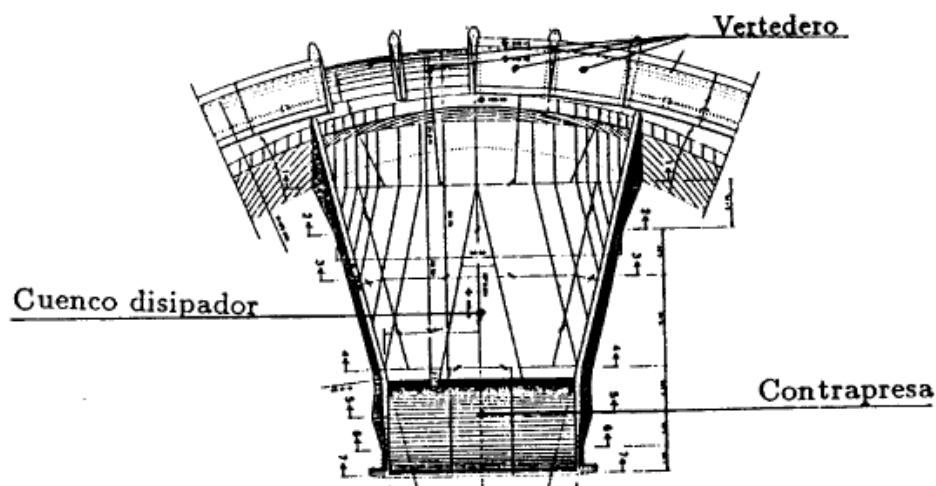


Figura 20: Planta de vertedero y disipador de energía de la presa Llosa del Cavall (Castillo, 1989).

4.3.1. Características generales del flujo en el cuenco.

Moore (1943) realiza un estudio teórico-experimental de la disipación de energía bidimensional en el caso de estructuras de caída vertical. Considera la energía, H_1 , en la base de la caída como la suma de la carga de velocidad media, v_1 , más el calado promedio del flujo en dicha sección, y_1 .

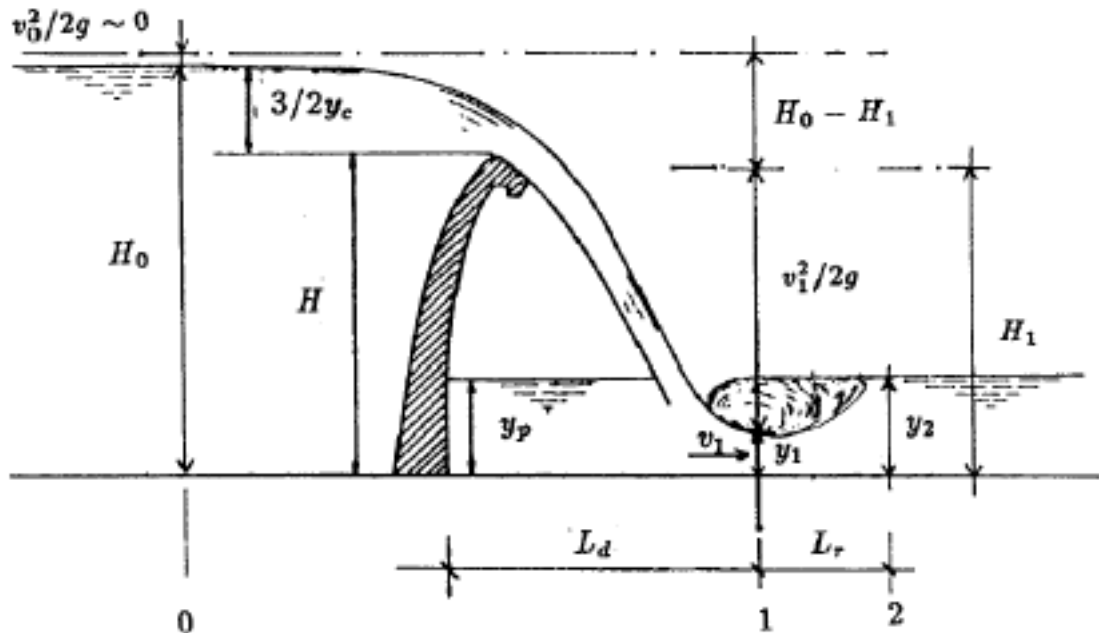


Figura 21: Magnitudes de los disipadores hidráulicos a pie de presa (Moore, 1943, citado por Castillo, 1989).

En la figura 22 se presentan los valores experimentales de H_1/y_c en función de H/y_c , confrontándose con los obtenidos por la aplicación de la ecuación de la energía sin considerar las pérdidas de carga, es decir:

$$H_1 = H + \frac{3}{2}y_c \quad 7$$

$$H_1 = \frac{H_0}{y_c} = \frac{H}{y_c} + \frac{3}{2} \quad 8$$

Dónde:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}; \text{ Calado crítico en una sección rectangular.}$$

H ; Altura de caída.

H_1 ; Energía total en la base de caída.

q ; Caudal unitario.

g ; Aceleración de la gravedad.

En la figura 22, se presenta el efecto de la relación H/y_c sobre la pérdida de energía. La diferencia entre las curvas teórica y experimental representa la pérdida de energía dividida entre el calado crítico, $\Delta H/y_c$.

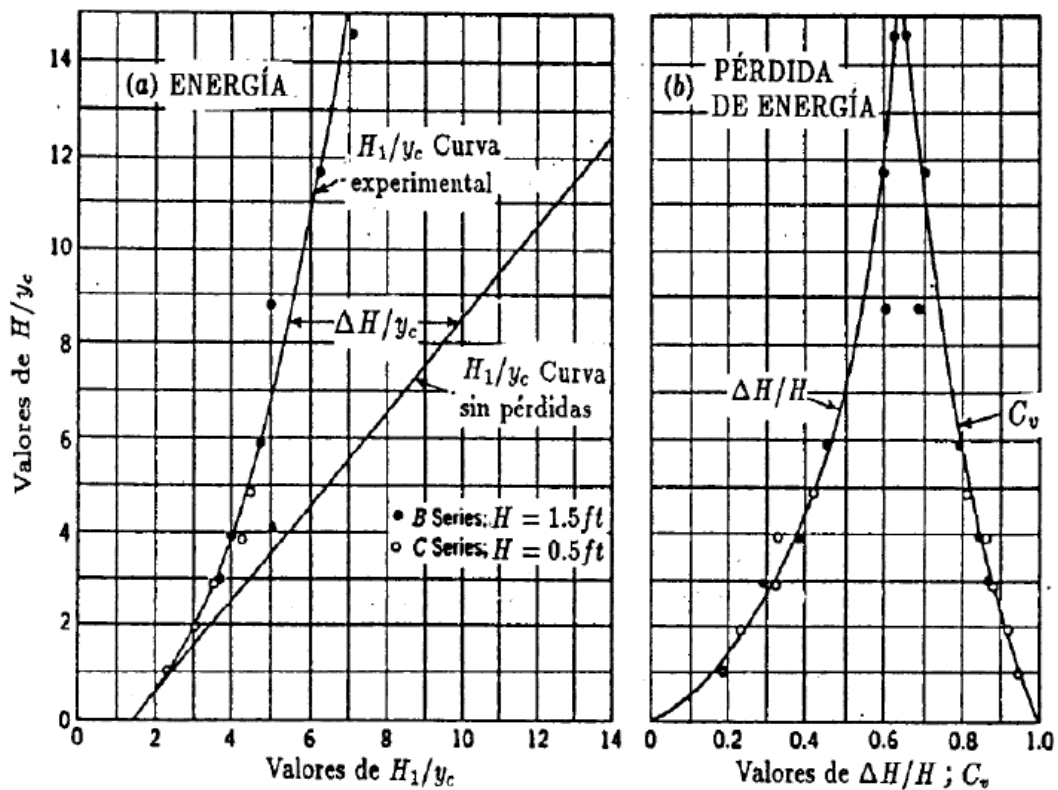


Figura 22: Energía en la base de una caída vertical. a) energía teórica experimental. b) pérdida de energía y coeficiente de velocidad (Moore, 1943, citado por Castillo, 1989).

En el gráfico se concluye que, para un caudal y una altura de caída determinada, se consigue incrementar la disipación de energía aumentando el ancho del vertedero, lo que implica una reducción del calado y_c . Podemos observar que se puede disipar hasta las dos terceras partes de la altura de caída ($66\%H$).

También se presentan los valores del coeficiente de velocidad C_v en función de H/y_c .

La velocidad media real en la base de la caída se expresa como:

$$v_1 = C_v \sqrt{2g(H_0 - y_1)}$$

9

Donde la energía total del embalse es: $H_0 = H + 3/2y_c$.

Si en la ecuación 9 se reemplaza el valor de H_0 , y además se introduce la ecuación de continuidad $v_1 y_1 = \sqrt{g y_c} y_c$, reordenando los términos se obtiene la siguiente ecuación cúbica:

$$\left(\frac{y_c}{y_1}\right)^3 - C_v^2 \frac{y_c}{y_1} \left(\frac{2H}{y_c} + 3\right) + 2C_v^2 = 0 \quad 10$$

A partir de esta ecuación, y dependiendo del valor de C_v , se puede calcular y_1 . La energía, $y_1 + v_1^2/2g$ puede calcularse teniendo en cuenta la ecuación 10. Este procedimiento es menos práctico que el uso de la ecuación 7, la cual da directamente el contenido de la energía en la base de la caída.

El calado de agua correspondiente al pozo de acumulación, y_p , se determina a partir de la aplicación del teorema de la cantidad de movimiento, cuya ecuación resultante es:

$$\left(\frac{y_p}{y_c}\right)^2 = \left(\frac{y_c}{y_1}\right)^2 + 2\left(\frac{y_c}{y_1}\right) - 3 \quad 11$$

Esta expresión concuerda con los resultados experimentales realizados por Moore (1943), tal como puede observarse en la figura 23a.

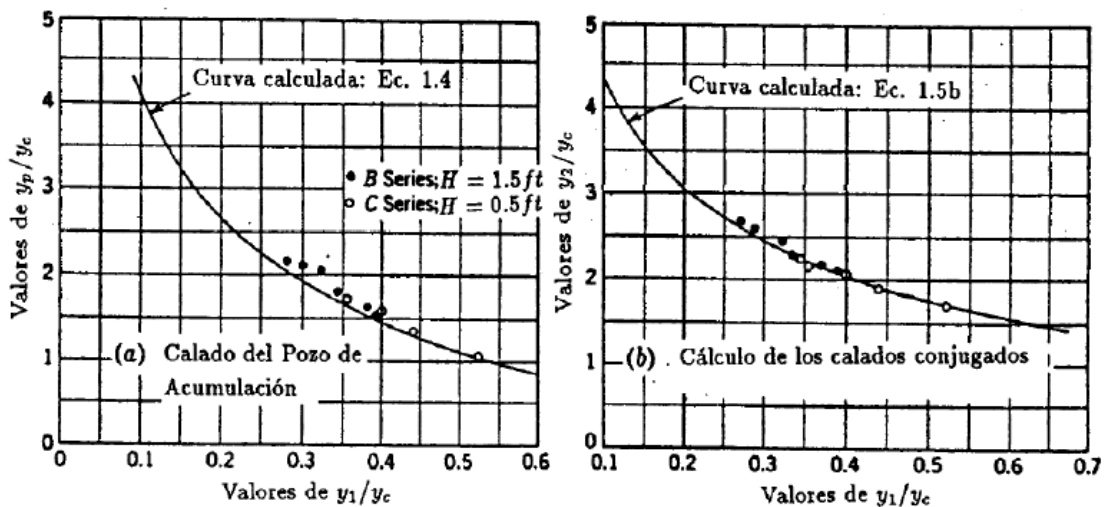


Figura 23: Curvas de las ecuaciones del momentum: (a) Calado del pozo de acumulación y_p (b) Calados conjugados y_1 e y_2 (Moore, 1943, citado por Castillo, 1989).

Se puede observar el buen ajuste de esta comprobación experimental en la figura 23b. De este modo, el perfil longitudinal del resalto hidráulico producido en la base de una caída es semejante al producido por un chorro horizontal, aunque un poco más inclinado en la zona inicial.

Para valores de calado aguas abajo superiores al calado y_2 se produce una sumergencia del resalto hidráulico, lo que implica mayores velocidades junto al fondo.

4.3.2 Condiciones de flujo en el cuenco en función del calado aguas abajo.

Según Cui (1985), citado por Castillo (1989), las condiciones de flujo en la solera del cuenco pueden clasificarse en tres tipos diferentes de acuerdo al calado aguas abajo y_b (figura 24):

-Tipo I: $y_b < y_2$

El calado de aguas abajo es inferior al calado preciso para crear un resalto. En estas condiciones no se forma un verdadero colchón aguas abajo del punto de caída. Sin embargo, aguas arriba de este punto se forma un colchón de agua de espesor y_p , creando en la zona de caída del chorro un calado y_{c0} , el cual constituye un colchón eficaz.

-Tipo II: $y_b > y_2$

Se forma un resalto hidráulico sumergido de modo que, tanto aguas arriba como aguas abajo del punto de caída se obtienen colchones de agua verdaderos. Para obtener este tipo de flujo se debe verificar que $y_{c0}/B < 20$, donde B es el espesor del chorro a la entrada del cuenco.

-Tipo III: $y_{c0}/B > 20$

La inclinación de la superficie libre, aguas arriba y aguas abajo del punto de caída, disminuye rápidamente. La diferencia entre y_{c0} e y_b tiende a cero.

En las obras reales, en donde exista o no una solera artificial, se busca garantizarlas condiciones de flujo Tipos II o III.

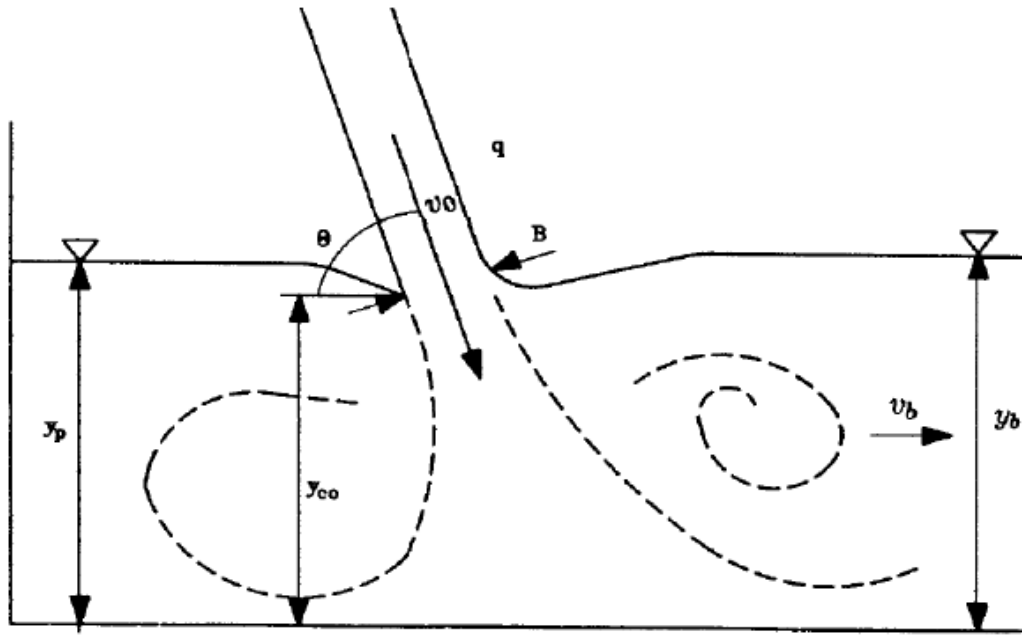


Figura 24: Condiciones de flujo en la solera, de acuerdo al calado de aguas abajo y_b (Cui Guang Tao et al., 1985; citado por Castillo, 1989).

Para obtener el calado aguas arriba, y_p en función del calado aguas abajo y_b (flujos tipos II y III) se aplica el teorema de la cantidad de movimiento entre estas dos secciones, sumándose un término adicional correspondiente a las fuerzas de resistencia del flujo; esto es:

$$\rho q v_0 \cos \theta_0 + \frac{1}{2} \rho g y_p^2 = \rho q v_b + \frac{1}{2} \rho q v_b + \beta_0 \rho q v_0 \cos \theta_0 \quad 12$$

Haciendo $\beta = 1 - \beta_0$ y reordenando, tenemos:

$$\frac{y_p}{y_b} = \sqrt{1 - 2F_b \left[\left(\frac{v_0}{v_b} \right) \beta \cos \theta_0 - 1 \right]} \quad 13$$

Donde $F_b = v_b^2 / y_b$ representa el cuadrado del Numero de Froude en la sección aguas abajo; v_b es la velocidad aguas abajo; v_0 es la velocidad incidente del chorro; θ_0 es el ángulo de caída con respecto a la horizontal; β_0 es un coeficiente al que se le puede atribuir el sentido físico de tener en cuenta las pérdidas de carga continuas.

Cui Guango Tao presenta los resultados del cálculo del parámetro β a partir de valores experimentales de y_p , obtenido por medio de la ecuación 13. Estos valores se encuentran entre 0.5-0.7, pudiendo considerarse un valor medio de 0.6, (figura 25).

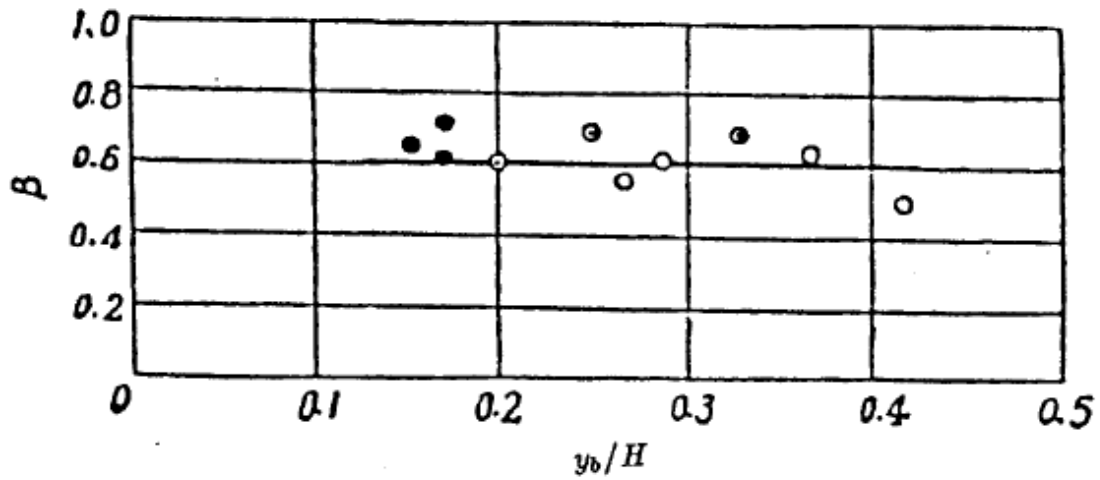


Figura 25: Relación entre β e y_b/H (Cui Guang Tao et al., 1985; citado por Castillo, 1989).

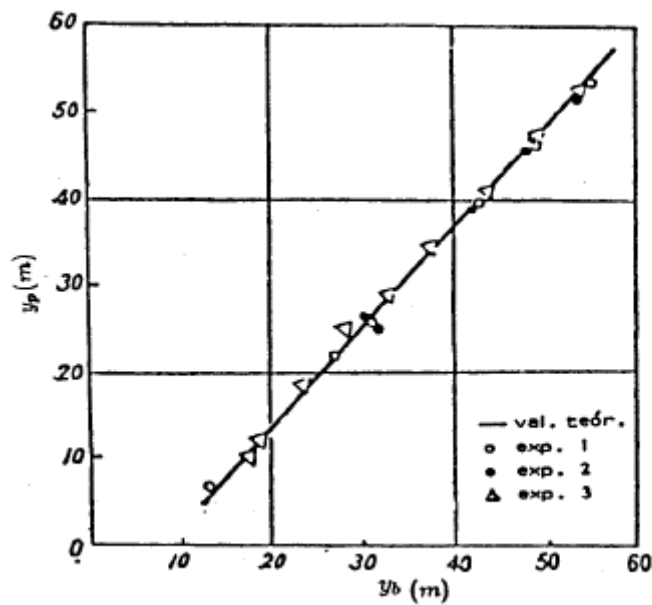


Figura 26: Valores teóricos y experimentales de y_p (Cui Guang Tao et al., 1985; citado por Castillo, 1989).

El cálculo de y_{c0} se realiza utilizando un método aproximado. Para aplicar el teorema de la cantidad de movimiento entre las secciones correspondientes a y_{c0} e y_b es preciso tener en cuenta la influencia de los vórtices las inclinaciones de la superficie libre correspondientes a la resistencia del flujo y a la no distribución uniforme de velocidades en la sección de calado y_{c0} .

Así tenemos que:

$$\begin{aligned} & \rho q v_0 \cos \theta_0 + \frac{\rho g y_{c0}^2}{2} + \alpha \rho q v_0 \\ & = \beta_0 \rho q v_0 \cos \theta_0 + \rho q v_b + \frac{\rho g y_b^2}{2} \end{aligned} \quad 14$$

Donde β tiene el mismo sentido que en la ecuación anterior, en tanto que α , es un coeficiente que refleja la no distribución uniforme de velocidades. Por tanto:

$$\frac{y_{c0}}{y_b} = \sqrt{1 - 2F_b \left[\left(\frac{v_0}{v_b} \right) \beta \left(\frac{\alpha}{\beta} + \cos \theta_0 \right) - 1 \right]} \quad 15$$

El valor de y_{c0} es muy difícil de determinar experimentalmente, de modo que no se puede obtener α , en la misma forma que se obtuvo β .

5. MATERIAL UTILIZADO

Este Proyecto Fin de Carrera ha sido realizado en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena. Durante su desarrollo se han empleado:

- Infraestructura de aliviadero de vertido libre y cuenco de disipación, donde realizaremos las medidas de velocidad.
- Equipo ADV de medición de velocidad con efecto Doppler.
- Software de adquisición de datos, Vectrino plus, versión 1.16.
- Software de postprocesado de los ficheros de datos ExploreV, versión 1.55 Lite.

A continuación se describen los distintos elementos.

5.1. Infraestructura

La infraestructura consiste en un modelo físico de un aliviadero de vertido libre por coronación.



Figura 27: Infraestructura de vertedero de caída libre.

Los diferentes elementos de la infraestructura son:

1. Cántara de bombeo, donde se almacena el volumen de agua empleado en los ensayos. Se dispone de dos bombas sumergibles, las cuales impulsan el agua a la infraestructura.



Figura 28: Cántara de bombeo.

2. Válvula de mariposa. Mediante su grado de apertura podremos controlar el caudal del ensayo.



Figura 29: Válvula mariposa (Vera, 2011).

3. Cajón superior. La parte superior del modelo físico y constituye el aliviadero de labio fijo. Tiene elementos tranquilizadores de flujo mediante paneles verticales y un muro de grava aluvial, los cuales sirven para tranquilizar el flujo aguas arriba del aliviadero. Está construido con madera y acero (figura 30).



Figura 30: Cajón superior.

4. Cajón inferior. Constituye el cuenco amortiguador del aliviadero. Está construido con metacrilato para facilitar el visionado de los fenómenos producidos. El colchón se puede controlar añadiendo barreras aguas abajo (figura 32).



Figura 31: Cuenco de amortiguación.



Figura 32: Barreras de acero situadas aguas abajo del cuenco de amortiguación.

5. Soporte de sonda ADV. Consiste en un soporte mecánico de acero que permite la colocación de la sonda y el movimiento en los tres ejes (figura 33).



Figura 33: Soporte de sonda ADV.

6. Aforo mediante vertedero triangular. Permite la medición de los caudales trasegados (figura 34).



Figura 34: Vertedero triangular y limnómetro.

5.2. Vertedero triangular

A continuación se describe el funcionamiento del vertedero triangular.

El vertedero triangular se considera como una de las estructuras más precisas para la medición de un amplio rango de caudales. Se caracteriza porque la forma de la ventana creada para el vertido del flujo es triangular. Este tipo de vertedero también es conocido como vertedero Thomson (figura 35).

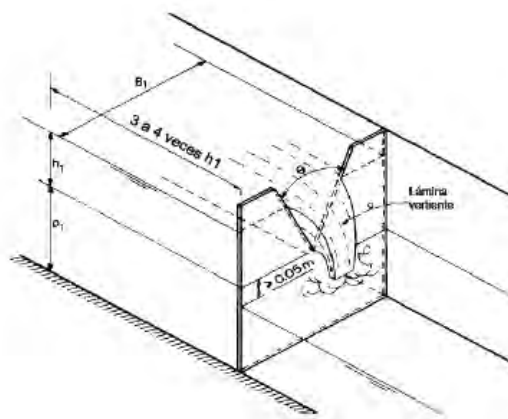


Figura 35: Representación esquemática de vertedero triangular (Boss, 1989).

La ecuación de descarga para vertederos triangulares de pared delgada, tanto con contracción completa como con contracción parcial, es la siguiente:

$$Q = C_e \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h_1^{2.5} \quad 16$$

Donde Q es el caudal real, C_e es el coeficiente efectivo de descarga, g es la aceleración de la gravedad, θ es el ángulo del vértice, h_1 es la carga del vertedero.

El coeficiente efectivo de descarga, C_e , depende de las relaciones h_1/p_1 , h_1/B_1 , donde p_1 es la altura hasta el vértice y B_1 es el ancho. La estimación del valor de C_e para un ángulo de escotadura $\theta = 90^\circ$ se determina mediante el siguiente gráfico:

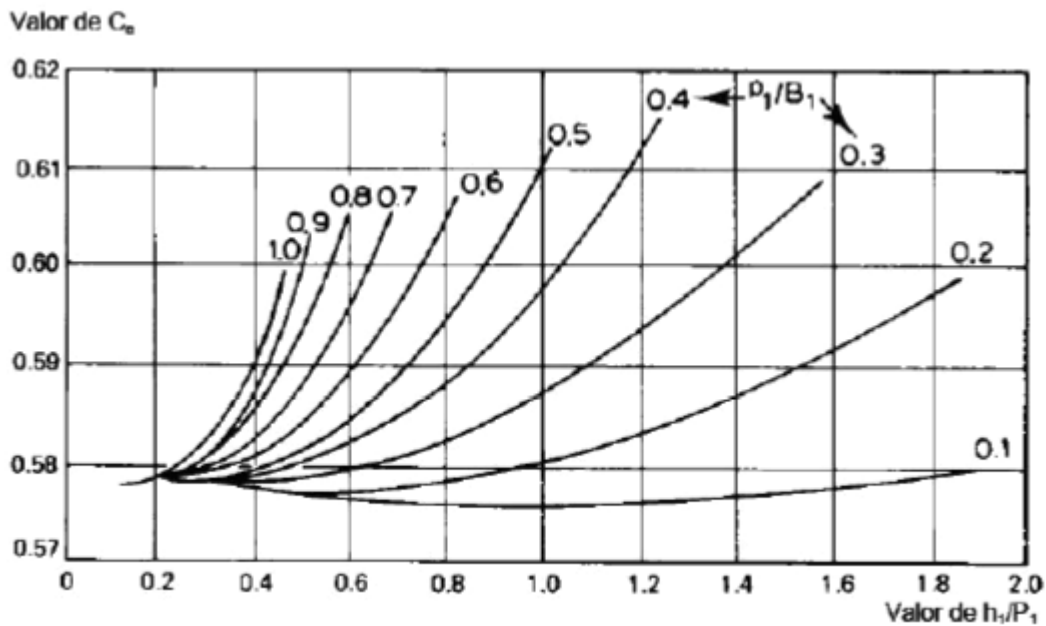


Figura 36: Valores de C_e para vertedero triangular de 90° con contracción parcial (Boss, 1989).

En nuestro caso, las dimensiones del aforador son las indicadas en la siguiente figura:

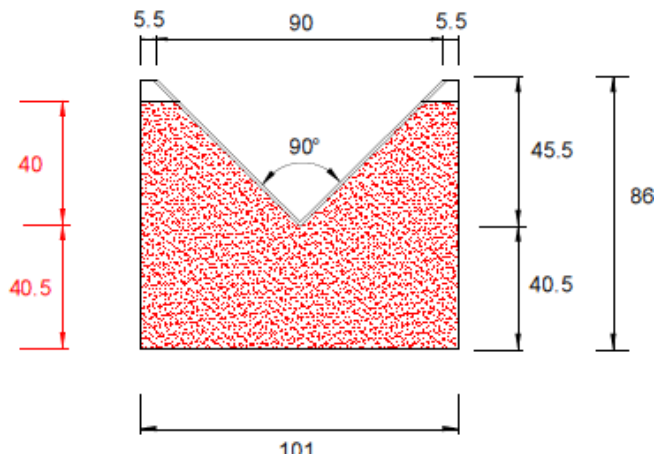


Figura 37: Esquema para aforador de laboratorio

Para $\theta = 90^\circ$ se tiene un valor de:

$-K_h = 0.8 \text{ mm.}$

$-h_l = 40 \text{ cm.}$

$-p_l = 40.5 \text{ cm.}$

$-B_l = 101 \text{ cm.}$

En la siguiente tabla se reflejan los caudales obtenidos en función de la carga sobre vertedero:

h_1 (m)	B_1 (m)	p_1 (m)	K_h (m)	h_e (m)	p_l/B_1	h_l/p_1	C_e	Q (m ³ /sg)
0.10	1.01	0.405	0.0008	0.101	0.401	0.25	0.578	0.0044
0.11	1.01	0.405	0.0008	0.111	0.401	0.27	0.578	0.0056
0.12	1.01	0.405	0.0008	0.121	0.401	0.30	0.578	0.0069
0.13	1.01	0.405	0.0008	0.131	0.401	0.32	0.579	0.0085
0.14	1.01	0.405	0.0008	0.141	0.401	0.35	0.579	0.0102
0.15	1.01	0.405	0.0008	0.151	0.401	0.37	0.580	0.0121
0.16	1.01	0.405	0.0008	0.161	0.401	0.40	0.580	0.0142
0.17	1.01	0.405	0.0008	0.171	0.401	0.42	0.581	0.0165
0.18	1.01	0.405	0.0008	0.181	0.401	0.44	0.581	0.0191
0.19	1.01	0.405	0.0008	0.191	0.401	0.47	0.582	0.0219
0.20	1.01	0.405	0.0008	0.201	0.401	0.49	0.582	0.0248
0.21	1.01	0.405	0.0008	0.211	0.401	0.52	0.583	0.0281
0.22	1.01	0.405	0.0008	0.221	0.401	0.54	0.583	0.0315
0.23	1.01	0.405	0.0008	0.231	0.401	0.57	0.583	0.0352
0.24	1.01	0.405	0.0008	0.241	0.401	0.59	0.584	0.0392
0.25	1.01	0.405	0.0008	0.251	0.401	0.62	0.584	0.0434
0.26	1.01	0.405	0.0008	0.261	0.401	0.64	0.584	0.0479
0.27	1.01	0.405	0.0008	0.271	0.401	0.67	0.585	0.0527
0.28	1.01	0.405	0.0008	0.281	0.401	0.69	0.585	0.0577
0.29	1.01	0.405	0.0008	0.291	0.401	0.72	0.586	0.0631
0.30	1.01	0.405	0.0008	0.301	0.401	0.74	0.586	0.0687
0.31	1.01	0.405	0.0008	0.311	0.401	0.77	0.587	0.0746
0.32	1.01	0.405	0.0008	0.321	0.401	0.79	0.588	0.0809
0.33	1.01	0.405	0.0008	0.331	0.401	0.81	0.588	0.0874
0.34	1.01	0.405	0.0008	0.341	0.401	0.84	0.589	0.0943
0.35	1.01	0.405	0.0008	0.351	0.401	0.86	0.590	0.1015
0.36	1.01	0.405	0.0008	0.361	0.401	0.89	0.591	0.1091
0.37	1.01	0.405	0.0008	0.371	0.401	0.91	0.592	0.1170
0.38	1.01	0.405	0.0008	0.381	0.401	0.94	0.594	0.1255
0.39	1.01	0.405	0.0008	0.391	0.401	0.96	0.595	0.1341
0.40	1.01	0.405	0.0008	0.401	0.401	0.99	0.597	0.1434

Figura 38: Caudales del aforador en función de la altura de la lámina de agua.

En este proyecto se han utilizado 3 caudales diferentes para el estudio de resaltos sugeridos en el cuenco de disipación:

$$Q1= 19.45 \text{ l/s.}$$

$$Q2= 30.67 \text{ l/s.}$$

$$Q3= 45.31 \text{ l/s.}$$

5.3. Sonda ADV.

El Velocímetro Acústico Doppler (ADV) es un método de medición de velocidades en un solo punto con gran resolución y obtención de las tres componentes.

Las técnicas de procesado usadas por el ADV tienen varias ventajas: precisión, rapidez, medidas de velocidad en tres dimensiones en un volumen de muestreo definido; calibración de fábrica invariable (no requiere calibración periódica), operación simple, cálculos directos de parámetros turbulentos como las tensiones de Reynolds; etc...

A continuación se presentan las principales características y especificaciones de la sonda ADV.

5.3.1. Método biestático y transformación Doppler

Las mediciones de velocidad usan un principio físico llamado efecto Doppler. Si una fuente de sonido se mueve relativamente hacia el receptor, la frecuencia del sonido recibida en el receptor es cambiada en función de la frecuencia transmitida:

$$F_{doppler} = - F_{source} (V/C) \quad 17$$

Dónde:

$F_{doppler}$; Cambio en frecuencia recibida (frecuencia Doppler).

F_{source} ; Frecuencia de sonido transmitido.

V ; Velocidad relativa de la fuente al receptor.

C ; Velocidad del sonido.

La velocidad V representa la velocidad relativa entre fuente y receptor. El movimiento perpendicular a la línea que conecta la fuente y el receptor no introduce un cambio de frecuencia. Si la distancia entre los dos objetos está disminuyendo, la frecuencia crece; si la distancia está aumentando, la frecuencia disminuye.

En la figura 39 se muestra la operación básica del método biestático que emplea el ADV. El término biestático se refiere al hecho de que el ADV usa transductores acústicos separados para transmitir y para recibir. Tanto los transmisores como los receptores están construidos con el fin de generar muestreadores de dimensiones muy reducidas. El transmisor genera sonido de modo que la mayor parte de la energía se concentra en un cono estrecho, mientras que el receptor es muy sensible al sonido recibido desde un rango angular muy estrecho. Los transductores están montados de tal forma que la orientación de sus brazos intersecta en un volumen de agua localizado a una cierta distancia. Esta intersección de los brazos determina la ubicación del volumen de muestreo (el volumen de agua en el que se toman las medidas).

El transmisor genera un pulso de sonido breve a una frecuencia conocida, que se propaga por el agua a lo largo del eje de su brazo. Cuando el pulso pasa por el volumen de muestreo, la energía acústica se refleja en todas direcciones por las partículas de materia (sedimentos, organismos pequeños, burbujas, etc.). Cierta fracción de la energía reflejada viaja a lo largo del eje del receptor, donde es recogida por el ADV, midiendo el cambio de frecuencia. La variación Doppler medida por un receptor es proporcional a la velocidad de las partículas a lo largo del eje biestático del receptor y del transmisor. El eje biestático está localizado en la bisectriz entre los ejes correspondientes a los brazos del receptor y del transmisor.

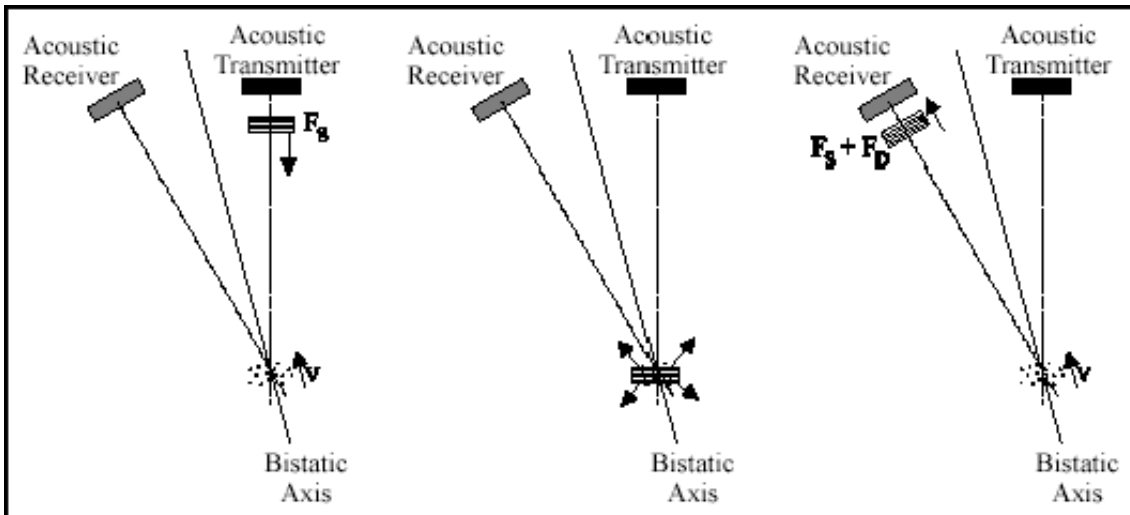


Figura 39: Operación básica del método biestático Doppler (SonTek/YSI, Inc, 2001).

La figura 40 muestra un perfil típico de intensidad de señal frente al tiempo de un receptor de una sonda ADV. El eje horizontal muestra el tiempo después del pulso de transmisión, el eje vertical muestra la intensidad de señal rebotada medida por el receptor.

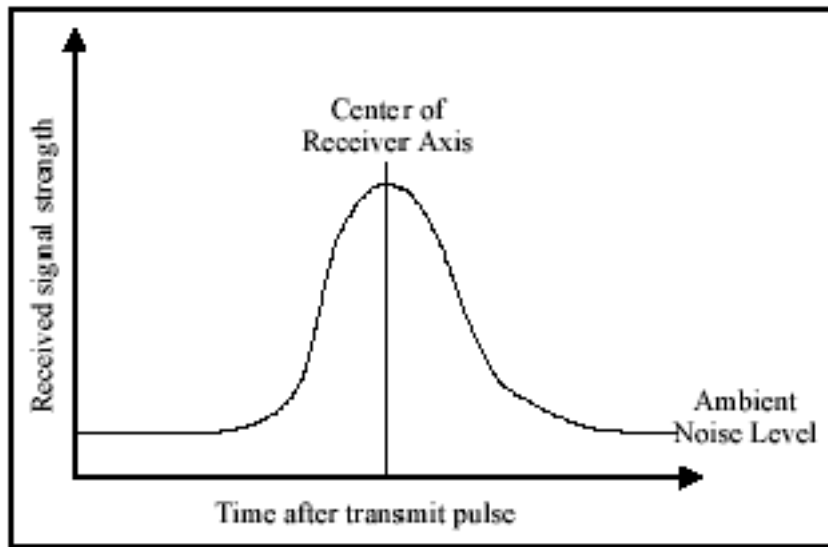


Figura 40: Perfil de la intensidad de señal del ADV (SonTek/YSI, Inc, 2001).

Como el pulso transmitido viaja a través del agua, una parte de la energía es reflejada en todas direcciones. Inmediatamente después de lanzar el pulso de transmisión, las reflexiones que golpean el transductor receptor vienen de un ángulo fuera de su rango de sensibilidad por lo que el receptor mide sólo el nivel de ruido ambiente. Como el pulso se mueve hacia el volumen de muestreo, la señal rebotada empieza a venir de una

dirección cercana a la zona sensibilidad del receptor. Así, el receptor nota un aumento en la intensidad de señal.

La intensidad de señal alcanza un máximo cuando el pulso cruza el centro del brazo receptor. Después, las reflexiones se mueven hacia fuera del brazo receptor y la intensidad de señal decae.

El pico de la curva en forma de campana ocurre cuando las reflexiones provienen de la intersección de los brazos del receptor y el transmisor. Muestreando la señal reflejada en este momento, el ADV realiza las medidas en el volumen de muestreo definido por la intersección de los brazos transmisores y receptores.

5.3.2. Geometría de la sonda y mediciones de velocidad.

Mediante relaciones sencillas de la relación transmisor/receptor, el equipo proyecta la velocidad del agua en su eje biestático. El ADV usa un transmisor y de dos a cuatro receptores acústicos (para sondas 2D, 3D o Vectrino). Los receptores están alineados para intersectarse con el brazo transmisor en un mismo volumen de muestreo. Conociendo la orientación relativa de los tres ejes biestáticos, combina las medidas de velocidad de cada receptor para calcular las componentes de la velocidad del agua en el volumen de muestreo.

La figura 41 muestra la geometría de una sonda ADV 2D. Los ejes de cada receptor están inclinados 30° respecto al transmisor. El eje biestático de cada receptor está entre los ejes transmisor y receptor (inclinado 15° respecto al eje del transmisor). Los receptores están enfocados hacia un volumen localizado a 5 o 10 cm debajo del transmisor (la distancia varía con dependencia de la configuración de la sonda). Para sondas 3D, cada receptor está inclinado 30° respecto al transmisor y los receptores están girados 120° respecto al ángulo acimutal.

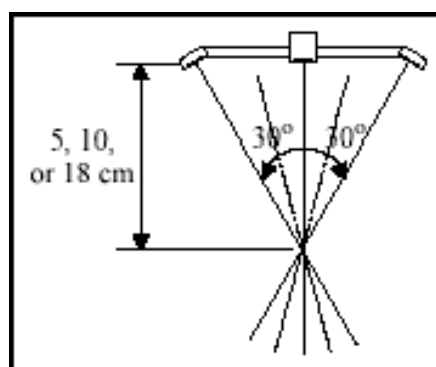


Figura 41: Geometría de sonda ADV (SonTek/YSI, Inc, 2001).

Para analizar los datos de velocidad de ADV se debe comprender el efecto de la geometría de la sonda. Se define la dirección vertical como el eje del transmisor, y la dirección horizontal como perpendicular a este eje. El ADV mide las velocidades biestáticas, a lo largo de los ejes inclinados 15° respecto a los ejes verticales, y las convierte a velocidades cartesianas usando la geometría de la sonda. Las velocidades biestáticas son más sensibles al movimiento vertical que al movimiento horizontal en un factor de cuatro aproximadamente ($\tan(15^\circ) = 0,27$). Así, el ruido en las medidas horizontales es 4 veces mayor que en medidas verticales, y la velocidad horizontal máxima que puede ser medida por el ADV es 4 veces mayor que la velocidad vertical máxima.

La velocidad medida por cada receptor está relacionada con la velocidad biestática, siendo la proyección del vector de velocidad tridimensional en el eje biestático del receptor acústico. Las velocidades biestáticas normalmente se convierten a velocidades cartesianas (XYZ) usando la geometría de la sonda. Las velocidades cartesianas dan el campo de velocidad tridimensional relativo a la orientación de la sonda de ADV.

5.3.3. Definición del volumen de muestreo.

El tamaño del volumen de muestreo del ADV está determinado por cuatro factores: muestreo del brazo transmisor, muestreo del brazo receptor, duración del pulso, y la ventana del receptor (período de tiempo sobre el que la señal reflejada es muestreada). La figura 42 muestra una ilustración 2D del efecto de cada uno de estos factores.

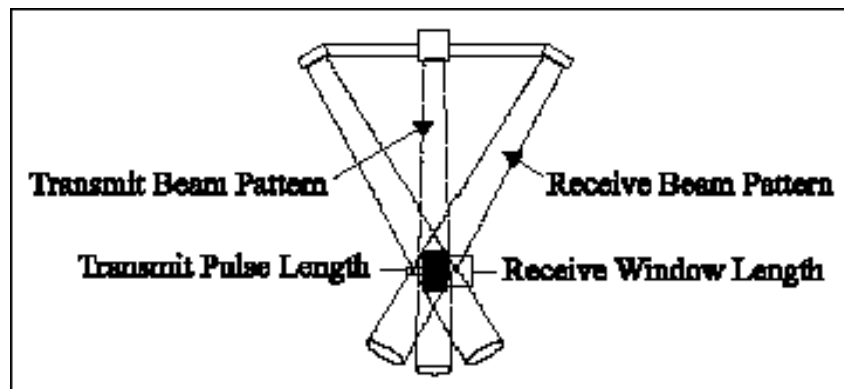


Figura 42: Definición del Volumen de muestreo ADV (SonTek/YSI, Inc, 2001).

El volumen de muestreo del ADV no tiene límites horizontales bien definidos. Estos límites son determinados por la intersección del muestreo de los brazos transmisor y receptor. La definición precisa de la intersección de muestreo de los brazos no se obtiene fácilmente. A efectos prácticos se puede aproximar a un cilindro del tamaño del transmisor cerámico. Aunque esto es una simplificación, los resultados son bastante exactos especialmente en los límites verticales del volumen de muestreo que son normalmente los más importantes.

Es importante recordar que los límites horizontales del volumen de muestreo no están definidos con precisión y que los objetos cercanos a esos límites pueden interferir potencialmente en las medidas de velocidad.

La extensión vertical del volumen de muestreo está definida por la relación entre duración del pulso acústico y la ventana receptora sobre la que la señal reflejada es muestreada. Ambas están controladas por el software de ADV (dentro de los límites del ancho de banda del transductor). El volumen de muestreo para la sonda Vectrino de 10 MHz ADV tiene una altura entre 3 y 15 mm, seleccionable por el usuario y, un diámetro de 6mm. Los bordes verticales del volumen de muestreo pueden ser considerados definidos para ± 0.5 mm en la sonda Vectrino de 10 MHz ADV. Es importante notar que para todas las medidas dadas por el ADV, la ubicación del volumen de muestreo está especificada como el centro vertical del volumen analizado.

5.3.4. Datos ADV.

El ADV registra con cada muestra: tres valores de velocidad (uno para cada componente), tres valores de intensidad de señal (uno para cada receptor), y tres valores de correlación (uno para cada receptor). Generalmente, los datos de velocidad son los que presentan mayor interés. La intensidad de señal y la correlación se usan para revisar la calidad de los datos y para detectar datos erróneos potenciales.

5.3.4.1 Velocidad.

Los datos de velocidad del ADV son obtenidos en coordenadas cartesianas (XYZ) relativas a la orientación de la sonda. Por lo general, la salida de datos de velocidad del ADV puede ser usada directamente sin postprocesado. La calibración del ADV no cambia a menos que la sonda haya sido físicamente dañada. Varios aspectos de la operación del ADV afectan a la calidad de los datos de velocidad. El más importante es la configuración del rango de velocidad.

El rango de velocidades del ADV, la precisión de los datos de velocidad y el ruido generado por el instrumento se ven en los siguientes apartados.

5.3.4.1.1 Rango de velocidad.

Uno de los parámetros más importantes del ADV es la configuración del rango de velocidad. Determina la velocidad máxima que puede ser medida por el instrumento. Las configuraciones del rango de velocidad estándares para la sonda Vectrino de 10 MHz ADV son ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 , ± 250 y 400 cm/s. Por lo general, se debe escoger la configuración del rango de velocidad más baja que cubra la velocidad máxima esperada

en un ensayo dado. El ruido generado por el instrumento en los datos de velocidad es proporcional a la configuración de rango de velocidad. De este modo, altos rangos de velocidad tienen niveles de ruido más elevados.

La configuración del rango de velocidad es un valor nominal. La máxima velocidad real depende de la dirección del flujo respecto a la sonda. El ADV mide velocidades a lo largo del eje de biestático de cada receptor, por lo que las limitaciones de velocidad máximas se producen en las velocidades biestáticas. Puesto que los ejes biestáticos tienen una inclinación de 15° respecto al eje vertical de la sonda, el ADV es más sensible al flujo vertical, y tiene una velocidad máxima inferior para flujos verticales. La tabla 5 muestra las velocidades máximas que pueden medirse en cada rango de velocidad del ADV para flujos meramente verticales o meramente horizontales.

Rango de velocidad de sonda ADV	Máxima velocidad horizontal	Máxima velocidad vertical
±3 cm/s	±30 cm/s	±8 cm/s
±10 cm/s	±60 cm/s	±15 cm/s
±30 cm/s	±120 cm/s	±30 cm/s
±100 cm/s	±300 cm/s	±75 cm/s
±250 cm/s	±360 cm/s	±90 cm/s

Tabla 5: Rango de velocidades del Doppler Vectrino.

Al operar en flujos altamente turbulentos, el ADV puede mostrar valores de correlación bajos que indican un aumento del ruido en las medidas de velocidad. El nivel de ruido puede reducirse aumentando el rango de velocidad. La magnitud de las fluctuaciones turbulentas puede aproximarse por la desviación estándar de los datos de velocidad mostrada por el software de ADV. Si éstos son un 5% o más de la configuración de rango de velocidad (por ejemplo, mayor que 5 cm/s en el rango de velocidad ±100 cm/s), el rendimiento se debe mejorar cambiando al rango de velocidad mayor más próximo. Este cambio debe aumentar el coeficiente de correlación y reducir el ruido en los datos de velocidad.

5.3.4.1.2. Muestreo

El ADV está diseñado para medir la velocidad tan rápidamente como sea posible. Una estimación sencilla del campo de velocidad 3D se denomina *un sonido de impacto*. El ADV registra 150-250 veces por muestra el sonido de impacto (la proporción varía con la configuración del rango de velocidad). Como el ruido de impacto sencillo es demasiado alto el ADV promedia varios sonidos de impacto para reducir el nivel de ruido en cada muestra de velocidad. El número de sonidos de impacto promediados es configurado al especificar el rango de muestreo. Por ejemplo, al muestrear a 25 Hz el ADV reunirá tantos sonidos de impacto como sea posible sobre un periodo de 40 ms, promediando estos valores en conjunto, y dando como salida el promedio como una muestra. Un resultado importante del esquema de muestreo del ADV es que reduciendo el rango de muestreo disminuye el ruido en cada muestra (aumentando el número de sonidos de impacto promediados por muestra). El ruido generado por el instrumento,

también denominado como ruido Doppler, es casual. Promediando múltiples puntos convergirá hacia el valor real reduciendo este ruido. El nivel de ruido disminuye con la raíz cuadrada del número de muestras promediadas. Así, la salida de datos a 1 Hz tiene alrededor de un quinto del ruido de salida de datos a 25 Hz.

5.3.4.1.3 Incertidumbre a corto plazo (ruido)

Todos los sistemas Doppler tienen un ruido de medida inherente resultado del proceso físico, mediante el cual las ondas sonoras son dispersadas por las partículas del agua. El ruido Doppler es meramente casual y pueda asumirse que sigue una distribución de Gauss. Promediando puntos de datos múltiples, se converge al valor real. Bajo condiciones de buen funcionamiento (por ejemplo, SNR > 15dB, correlación > 70 %), el ruido en los datos de velocidad horizontal del ADV se estima en torno al 1% del rango de velocidad cuando la salida de datos es a 25 Hz. Por ejemplo, las muestras individuales a 25 Hz tendrán un ruido de velocidad horizontal de cerca de ± 1 cm/s usando el rango de velocidad ± 100 cm/s (o alrededor de ± 0.3 cm/s usando el rango de velocidad de 30 cm/s). Como el ruido disminuye con la raíz cuadrada del número de sonidos de impacto promediados por muestra, las muestras individuales a 1 Hz tendrán un ruido de cerca de ± 0.2 cm/s usando el rango de velocidad de 100 cm/s. Las estimaciones de ruido anteriores son para velocidad horizontal. Como los ejes biestáticos de los receptores de ADV tienen una inclinación de 15° respecto al eje vertical, el ruido en las medidas de velocidad horizontal es mayor que en la componente vertical en un factor de cuatro a uno.

5.3.4.1.4. Exactitud

La exactitud para los datos de velocidad de ADV se refiere a la dispersión en las medidas de velocidad medias después de eliminar el ruido generado por el instrumento. Dos factores principales influyen en la exactitud de medidas de velocidad del ADV: la velocidad del sonido y la geometría de la sonda. La velocidad del sonido es un parámetro introducido por el usuario, por lo que un error en la introducción de la velocidad del sonido causará errores en las medidas de velocidad pudiendo ser rectificadas en el post procesado. La geometría de la sonda se calibra en fábrica para cada ADV.

La exactitud de la geometría de la sonda, con la calibración de fábrica, está especificada en ± 1.0 % la velocidad medida (por ejemplo, una exactitud de ± 1.0 cm/s en una velocidad medida de 100 cm/s). Esto representa los límites del procedimiento de calibración para determinar la alineación angular del transmisor y de los receptores acústicos.

Las especificaciones de ADV manifiestan un cero máximo para la velocidad de ± 0.25 cm/s. Con metodología Doppler, no existe ningún método para configurar acero las medidas de velocidad. Esta especificación se incluye debido a la dificultad de generar velocidades calibradas en flujos lentos.

5.3.4.2. Intensidad de señal

La intensidad de la señal registrada para cada receptor ADV es una medida de la intensidad de la señal acústica reflejada. Se registra como amplitud de la señal bruta en unidades logarítmicas internas de *cuentas*; una cuenta equivale a 0.43 dB. Con el software de ADV se puede acceder a la intensidad de señal como amplitud de la señal en cuentas o como relación de señal de ruido (SNR) en dB. La SNR se deriva de la amplitud de la señal substrayendo el nivel de ruido ambiente y convirtiendo a unidades de dB. 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 ADV crece. Para medidas de alta resolución (por ejemplo, muestreos a 25 Hz), se recomienda mantener el SNR al menos a 15 dB. Para medidas instantáneas medias (por ejemplo, muestreos a 0.5 Hz, o a una vez cada 2 segundos), el ADV puede operar con seguridad con una SNR de hasta 5 dB. La intensidad de la señal reflejada es función de la cantidad y tipo de las sustancias materiales del agua. Los valores de intensidad de la señal pueden usarse como una medida de la concentración de sedimentos cuando el tipo de sedimento se conoce. Aunque los datos de intensidad de señal de ADV no se pueden convertir directamente a concentración de sedimentos, con la calibración apropiada pueden usarse para estimaciones de la concentración de sedimentos razonablemente exactas.

5.3.4.3. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación de ADV es un parámetro de la calidad de los datos de salida obteniendo directamente de los cálculos de velocidad Doppler. El ADV calcula tres valores de correlación, uno para cada receptor acústico, con cada muestra de velocidad. La correlación se expresa 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 la 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 la fase de postprocesado. Por ejemplo, si el ADV está siendo usado en sondas que periódicamente están fuera del agua, los valores de correlación pueden usarse para determinar que parte de los datos pueden ser usados y cuales desechos.

5.3.5. Novedades de la sonda Vectrino ADV

El modelo Vectrino de 4 receptores (figura 43) presenta algunas mejoras respecto de los equipos de tres receptores:

- La reducción del tamaño de la sonda reduce al mínimo la interferencia del flujo de la propia sonda.
- Un cuarto receptor mejora las mediciones de la turbulencia y proporciona datos redundantes.
- Aumento de la frecuencia de muestreo interna, lo que reduce el ruido de la medición.
- Mayor rango de velocidad máxima.
- Archivo de configuración de la sonda almacenado en la sonda, lo que simplifica el cambio de las sondas.
- Integra un sensor de temperatura en la sonda.



Figura 43: Configuración de los cuatro receptores de la sonda Vectrino (<http://www.nortek-as.com>, 2012).

5.4. Vectrino plus

El programa Vectrino software ha sido diseñado para crear y leer los datos adquiridos por el Vectrino, y está disponible en dos programas: Vectrino y Vectrino plus. Este último proporciona una gama más amplia de algunas de las configuraciones la versión estándar. El firmware de Vectrino plus permite usar frecuencias de muestreo de hasta 200 Hz, de manera significativa más alto que el firmware estándar con una frecuencia máxima de salida de 25 Hz. La pantalla principal (Figura 44) muestra el siguiente aspecto.

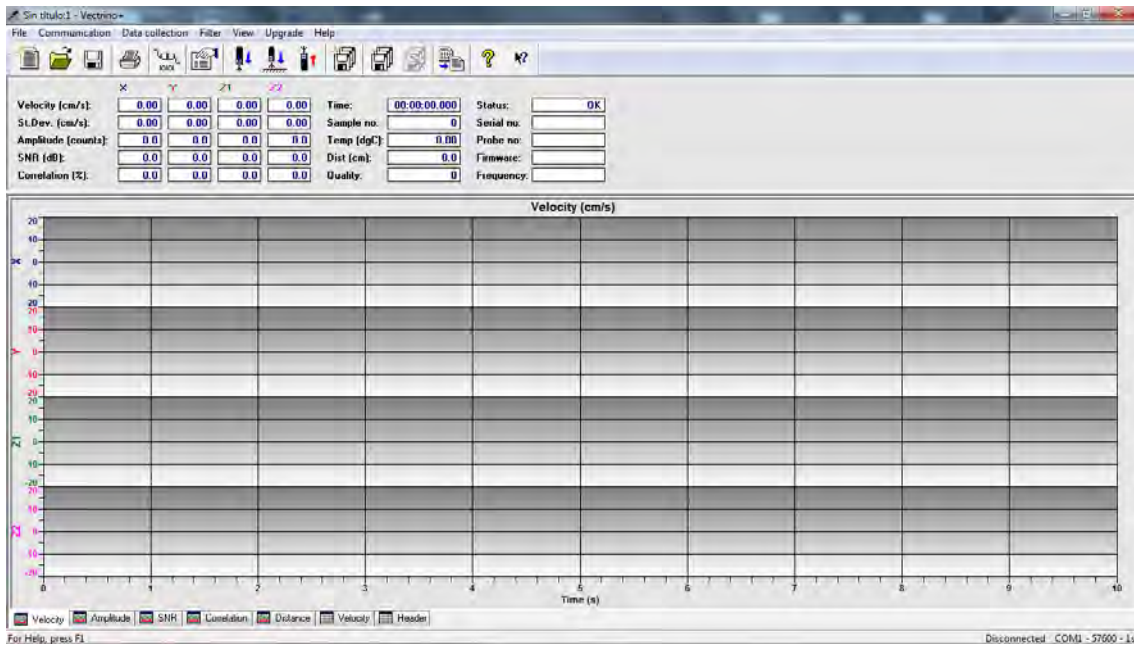


Figura 44: Pantalla principal de Vectrino Plus.

En la parte de arriba encontramos los botones de las diferentes opciones que presenta el programa, nos centramos en el botón de configuración.

La configuración permite editar los diferentes parámetros de operación. Al accionar este botón aparece la siguiente ventana (Figura 45).

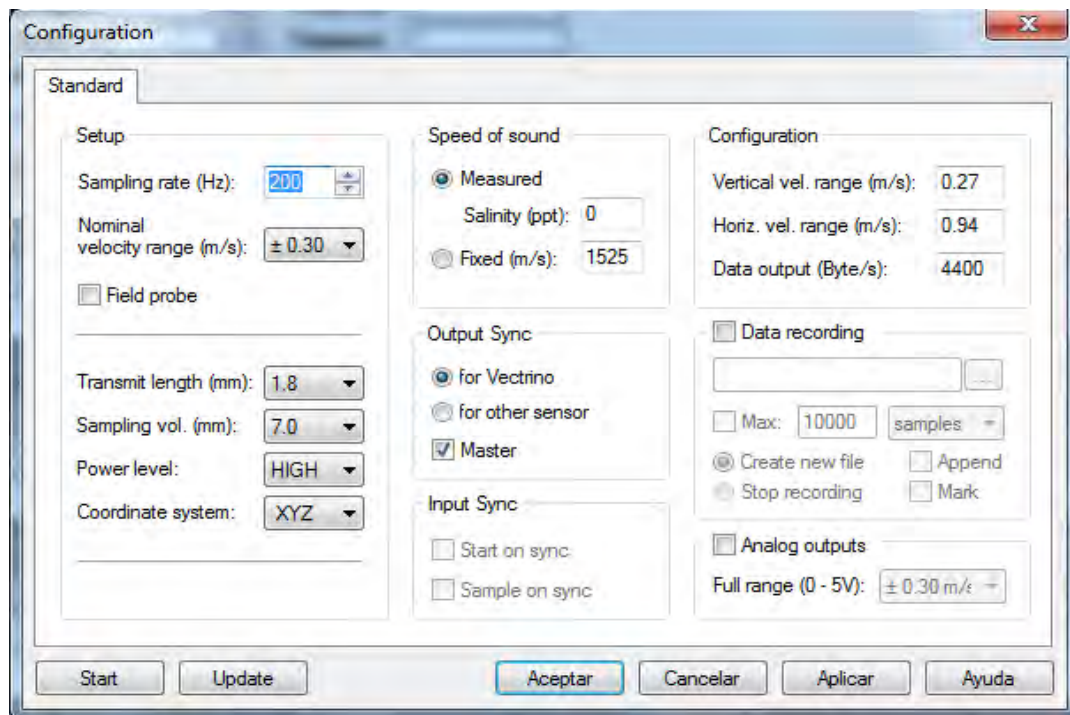


Figura 45: Ventana de configuración.

-Sampling rate (rango de muestreo): Número de muestras tomadas por segundo. Usaremos un valor de 10 Hz.

-Nominal range velocity (rango nominal de velocidad) m/s: La incertidumbre estadística (ruido) en las medidas de velocidad de ADV es aproximadamente proporcional a la velocidad máxima que el ADV puede medir. Los fabricantes recomiendan emplear el rango de velocidad del ADV mínimo que cubra el rango de velocidades esperadas en el experimento. Se escogió un rango de velocidades de ± 2.50 m/s, con el que se cubrían todas las velocidades previsibles.

-Salinity (salinidad): Indica la salinidad del agua en partes por millón. Este parámetro se utiliza para calcular la velocidad del sonido, que determina el factor de escala usado para la conversión de la señal Doppler. La salinidad del agua trasegada en el modelo es de 2 ppm.

-Analog outputs (salidas analógicas): Cuando la salida analógica está activada, las cuatro componentes de la velocidad de salida envían señales de 0-5 voltios continuas en un conjunto separado de cuatro conductores, uno para cada componente de la velocidad. El rango de velocidad analógica se debe corresponder con el rango de velocidades. Este parámetro se estableció en 2.50 m/s.

-Data recording (guardado de datos): Crea y guarda un archivo que contiene los datos medidos.

-Sampling vol.(volumen de muestreo): Se puede establecer el tamaño del volumen de muestreo, que se ha establecido en 9.1 mm, por corresponder con un tamaño máximo.

-Transmit length (longitud de transmisión): Se ha elegido la longitud máxima 2.4 mm.

5.5. Explore V pro.

Explore V pro es un programa de post-procesamiento para poder trabajar con los datos tomados con el Vectrino plus. En este programa podemos ver, analizar y filtrar los datos mediante diferentes métodos. Además se pueden visualizar las gráficas de velocidad y correlación respecto al tiempo. La pantalla principal (figura 46) está dividida en tres partes: grafica de velocidad, grafica de correlación y SNR, y resultados estadísticos.

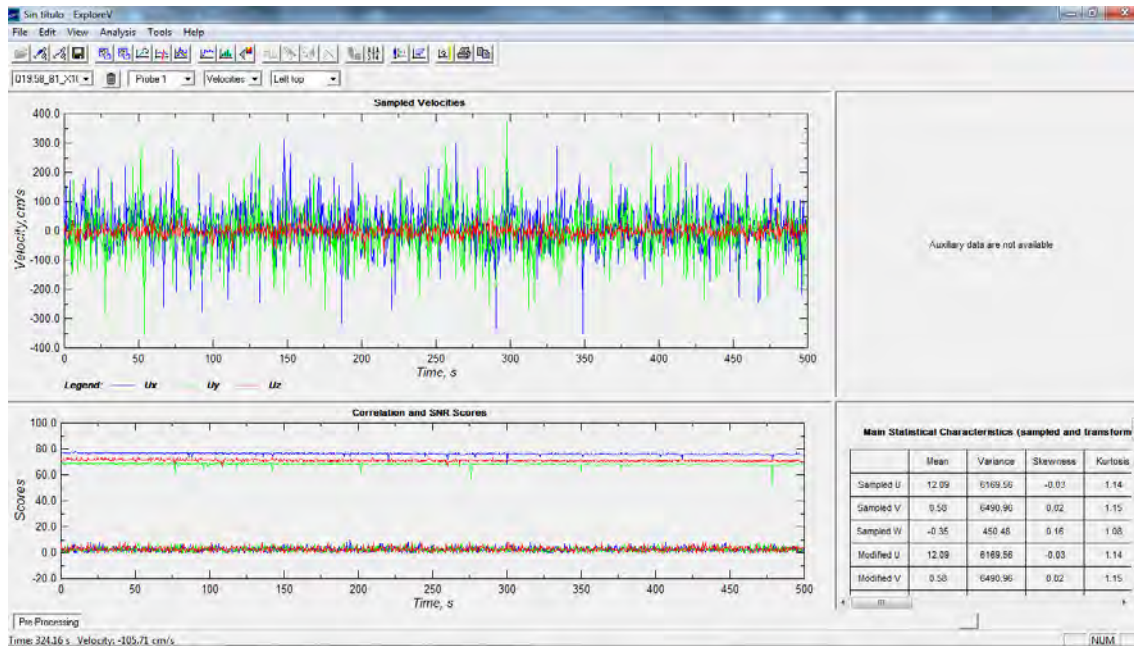


Figura 46: Pantalla principal de explore V 1.58 pro.

La grafica de velocidades (figura 47), muestra la serie de velocidades para las tres dimensiones respecto al tiempo, esta grafica es muy útil para detectar spikes. Los spikes son los puntos más alejados, considerados anómalos y pueden ser debidos a que las burbujas de aire interceptan la señal. En este grafico podemos observar la modificación de la serie de datos al realizar diferentes filtrados, viendo como son reducidos estos spikes.

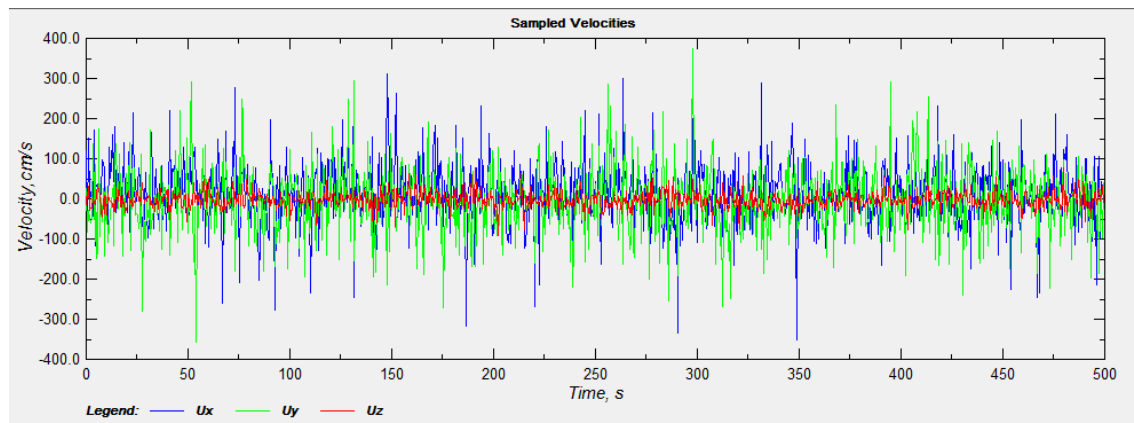


Figura 47: Grafico de velocidades.

En la figura 48 se observa el grafico de correlación y SNR en función del tiempo. La correlación se representa como un porcentaje, valores de 100% indican una fiabilidad perfecta, mientras que valores de 0% indica que la señal está dominada por el ruido. Por

tanto, la correlación puede usarse para revisar la calidad de los datos. En la figura 48 se observa que los datos se encuentran entre el 70% y el 80%, dentro del intervalo aceptable.

El valor del índice SNR se calcula por las atenuaciones en cada octava.

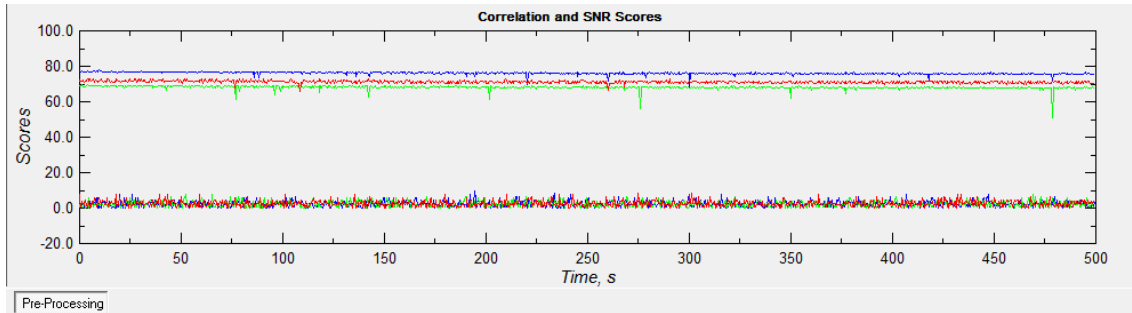


Figura 48: Grafico de correlación y SNR.

La tabla de datos estadísticos (figura 50) muestra los valores de velocidad media, varianza, sesgo y curtosis de cada componente, siendo U la velocidad en el eje x , V la velocidad en el eje y , W la velocidad en el eje z .

Main Statistical Characteristics (sampled and transformed)				
	Mean	Variance	Skewness	Kurtosis
Sampled U	12.09	6169.56	-0.03	1.14
Sampled V	0.58	6490.96	0.02	1.15
Sampled W	-0.35	450.48	0.16	1.08
Modified U	12.09	6169.56	-0.03	1.14
Modified V	0.58	6490.96	0.02	1.15
Modified W	-0.35	450.48	0.16	1.08

Figura 49: Tabla de resultados estadísticos.

Los valores estadísticos se calculan con las siguientes expresiones:

-Media: Es el sumatorio de velocidades instantaneas (v_i) dividido entre el numero de mediciones (n).

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n} \quad 18$$

-Varianza: Es una medida de la dispersión de los datos definida como el cuadrado de la desviación estándar de una variable (v) respecto a su media.

$$s_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \quad 19$$

-Sesgo: Es un indicador de distribuciones no simétricas. Un sesgo de cero indica una distribución simétrica respecto la media. Un sesgo positivo indica una distribución con un brazo asimétrico extendido hacia valores más positivos. Un sesgo negativo indica una distribución con un brazo asimétrico extendido hacia valores más negativos.

$$s = \frac{\Sigma(v_i - \bar{v})^3}{n\sigma^3} \quad 20$$

Donde n es el número de datos y σ^3 es el triple de la desviación estándar poblacional.

-Curtosis: Es una medida de la forma o apuntamiento de las distribuciones. Así las medidas de curtosis (también llamadas de apuntamiento o de concentración central) tratan de estudiar la mayor o menor concentración de frecuencias alrededor de la media y en la zona central de la distribución.

$$\alpha = \frac{\Sigma(v_i - \bar{v})^4}{n\sigma^4} \quad 21$$

Donde n es el número de datos y σ^4 es el cuádruplo de la desviación estándar poblacional.

5.5.1. Opciones del programa

Las opciones que manejan los datos se pueden dividir en cuatro categorías:

- Opciones de muestreo para definir el rango o rangos de muestreo a analizar.
- Filtrado de los datos para excluir datos erróneos o de baja calidad.
- Opciones para definir el movimiento de una sonda móvil.
- Escala para convertir datos a un escala prototipo y realizar transformaciones.

La configuración de las opciones puede guardarse en un archivo para su uso posterior con otros archivos de ADV.

El programa exporta los archivos en los que se puede consultar, tanto para las series filtradas como para las originales, los valores de todas la medidas realizadas en el tiempo de muestreo: velocidad en cada eje de coordenadas, correlación, relación de señal de ruido y amplitud para cada receptor acústico respecto al transmisor.

5.5.1.1. Opciones del filtrando de datos

El filtrado de datos es importante en el análisis de los datos de ADV. Los resultados de intensidad de señal de ruido y correlación son buenos indicadores de posibles problemas que pueden aparecer al usar un ADV. ExploreV Pro ofrece filtros basados en sus valores, además de filtros basados en los umbrales de velocidad y de aceleración, pudiendo ser aplicados por separado o de forma combinada. En nuestro caso vamos a utilizar la edición de series temporales (figura 50).

Pinchando sobre la edición de series temporales aparece una nueva ventana con las siguientes opciones:

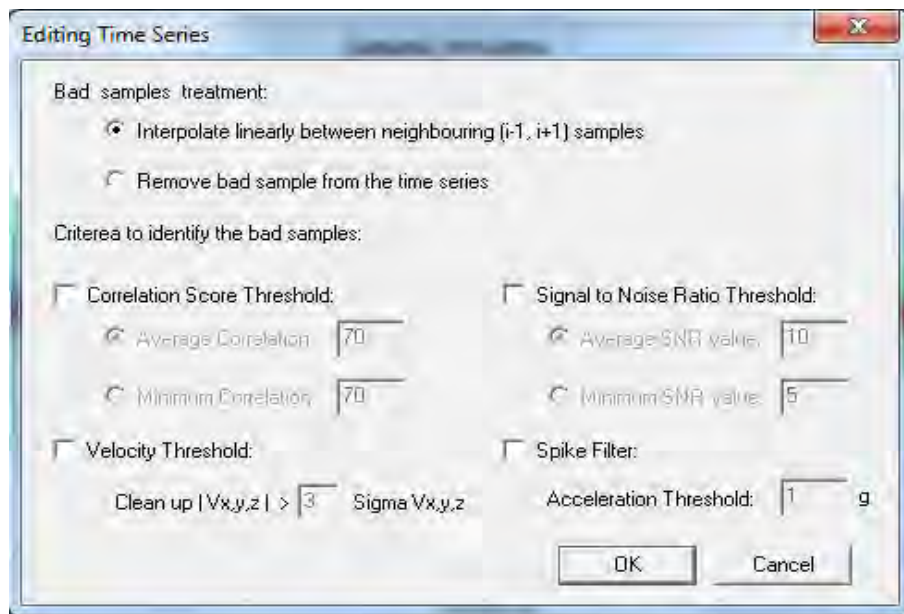


Figura 50: Ventana de edición de series temporales.

Existen dos opciones para el tratamiento de los datos anómalos: interpolar linealmente entre las muestras vecinas, o eliminarlos datos anómalos de la serie de datos.

Se tienen 4 criterios para identificar datos anómalos: umbral de correlación, umbral de SNR, umbral de velocidad y umbral de aceleración.

6. CAMPAÑA DE MUESTREO

La campaña de muestreo consiste en la medición de velocidades instantáneas con un equipo ADV en el seno de un cuenco de amortiguación situado aguas abajo de un chorro rectangular de vertido libre.

La infraestructura del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena permite analizar caudales entre 10 y 150 l/s. La solera del cuenco amortiguador está dividida por unas marcas con una separación regular, cada caudal ha sido seleccionado a partir del punto sobre el que caía el chorro, para así tener un punto de referencia sobre el que trabajar.

Para este estudio se han seleccionado tres caudales diferentes, recogidos en la tabla 6.

	Caudal (l/s)	Caudal (m ³ /s)
Q1	19.45	0.01945
Q2	30.67	0.03067
Q3	45.31	0.04531

Tabla 6: Caudales seleccionados.

Para cada caudal seleccionado se tomaran medidas de velocidad en los perfiles situados a 10, 20, 30, 40, 50 y 60 cm del punto de impacto del chorro. En la figura 51 se muestran las secciones transversales de estudio, la línea roja señala el punto 0 donde impacta el chorro en la solera del cuenco en condiciones de impacto directo.

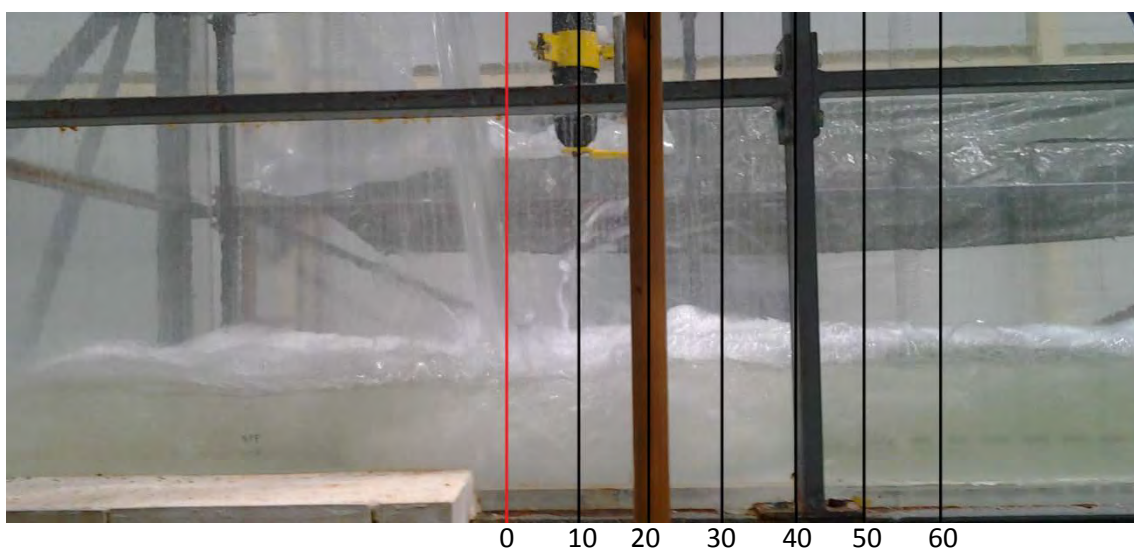


Figura 51: Perfil del cuenco amortiguador.

Para cada caudal se forman 6 colchones de agua diferentes por medio del uso de barreras colocadas a modo de contrapresa en la zona de salida del flujo (figura 52).

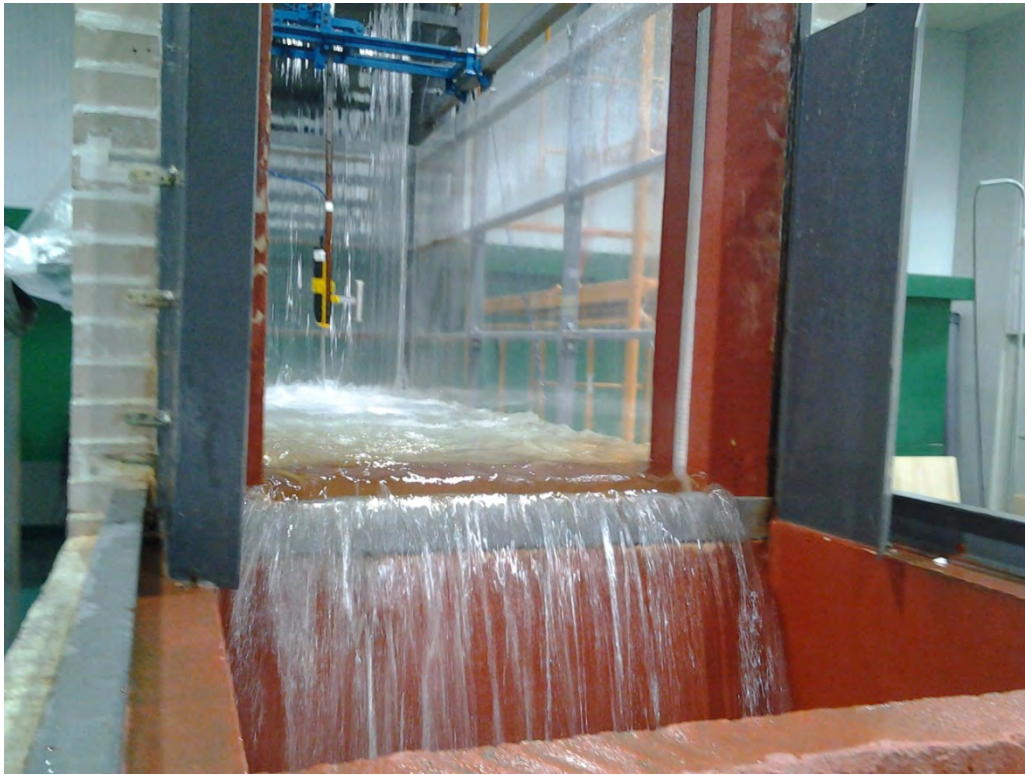


Figura 52: Detalle del colchón formado por una barrera.

Los colchones varían con el caudal, a continuación se muestran los colchones formados por cada barrera para cada caudal:

- Q_1 : 19.45 l/s.

Nº barreras	Colchón (m)
1	0.125
2	0.215
3	0.3
4	0.385
5	0.465
6	0.55

Tabla 7: Colchones de agua en el cuenco de disipacion obtenidos con $Q=19.45$ l/s.

-Q2: 30.67 l/s.

Nº barreras	Colchón (m)
1	0.15
2	0.235
3	0.32
4	0.4
5	0.485
6	0.57

Tabla 8: Colchones de agua en el cuenco de disipacion obtenidos con $Q=30.67$ l/s.

-Q3: 45.31 l/s

Nº barreras	Colchón (m)
1	0.15
2	0.25
3	0.335
4	0.43
5	0.52
6	0.597

Tabla 9: Colchones de agua en el cuenco de disipacion obtenidos con $Q=45.31$ l/s.

Para cada colchón se miden las velocidades a diferentes alturas de la columna de agua siguiendo el siguiente esquema:

Barreras	Mediciones	
	Secciones 10, 20, 30	Secciones 40, 50, 60
1 y 2	Cada 0.66 cm los primeros 4 cm, el resto cada 1.32 cm	Cada 1.32 cm
3 y 4	Cada 1.32 cm los primeros 7 cm, el resto cada 2.64 cm	Cada 2.64 cm
5 y 6	Cada 1.98 cm los primeros 8 cm, el resto cada 3.96 cm	Cada 3.96 cm

Tabla 10: Mediciones para cada colchon.

En cada uno de los puntos se tomara un registro de 5000 datos con una frecuencia de 10 Hz.

7. FILTRADO DE VELOCIDADES

En los caudales desaguados por los órganos de desagüe mediante cuencos de amortiguación, la disipación de energía se produce principalmente mediante el proceso de turbulencia. En las dos tipologías básicas (cuencos de resalto y cuencos de vertido libre) aparecen fenómenos de alta turbulencia y aireación.

La sonda ADV es fiable en flujos laminares y turbulentos sin presencia de aire. En medios aireados y turbulentos las señales se alteran por la interposición de burbujas de aire en la señal.

En flujos bifásicos (agua-aire) y altamente turbulentos, los registros de velocidades obtenidos con un equipo ADV deben ser verificados y, de ser necesario, llevar a cabo un filtrado digital con el propósito de eliminar y/o corregir los datos anómalos (spikes), conservando las características fundamentales y la continuidad del registro (figura 53).

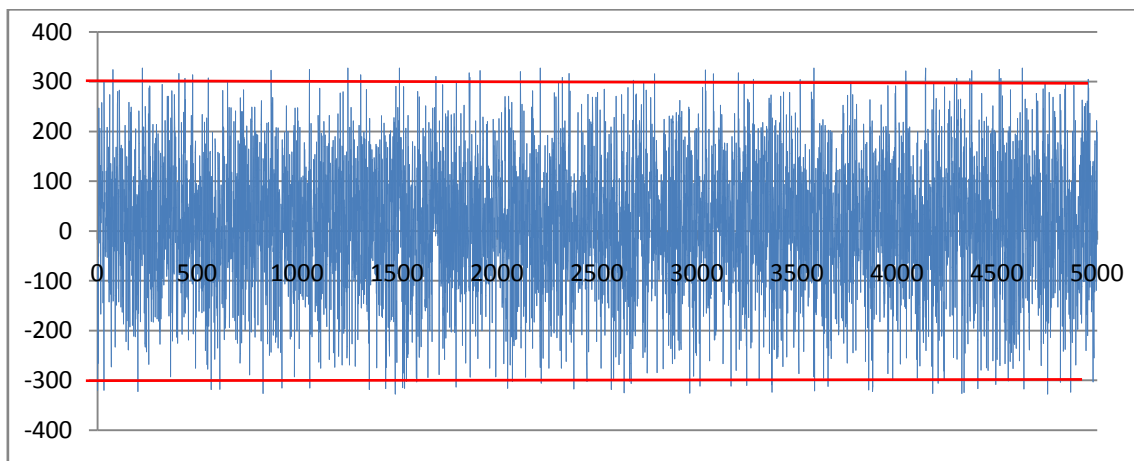


Figura 53: Serie original del registro de velocidad instantánea en flujo bifásico.

El ruido blanco son señales parasitas complicadas de eliminar. *Hunther y Lemín (2006)* propusieron emplear un ADV de cuatro receptores de modo que gracias a la información redundante que se obtiene en una de las componentes de velocidad, el ruido blanco se puede detectar y eliminar por medio de diferentes procedimientos de filtrado.

Los spikes son señales de amplitudes exageradamente desviadas del valor medio de la serie. Pueden ser reducidos y/o eliminados por ajuste de los parámetros del equipo de medida, pero existen situaciones en las que no pueden ser totalmente evitados.

Mediante el tratamiento y filtrado de los datos se pueden eliminar los spikes sin comprometer la integridad del registro (figura 54).

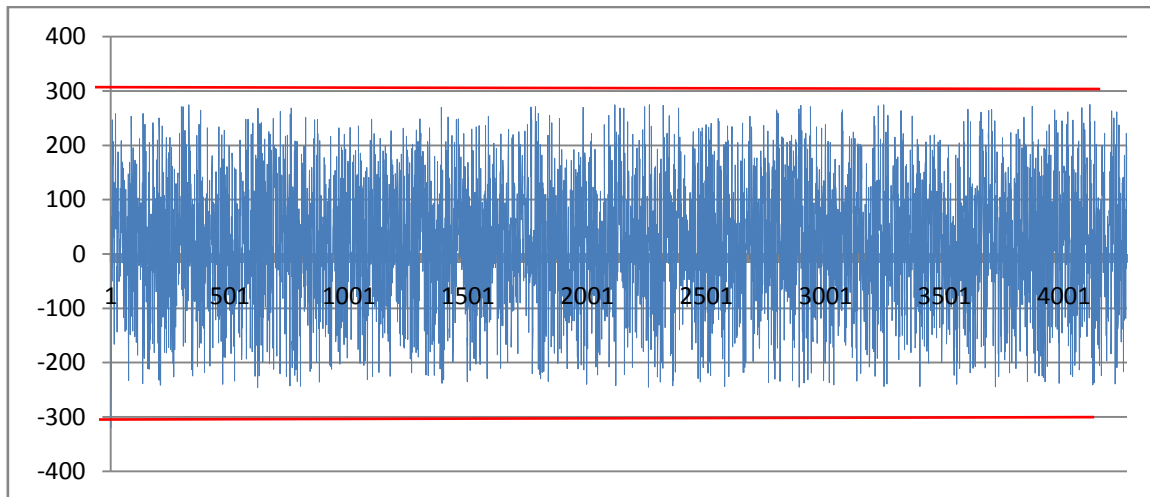


Figura 54: Serie modificada.

Para considerar un dato como spike se realizan dos pasos:

-Detección → Se emplean parámetros físicos y/o estadísticos correctamente justificados que llamaremos umbrales. Algunos de los criterios pueden ser: cortes de percentiles y/o estadísticos, umbral de velocidad, umbral de aceleración, etc. La detección debe ser selectiva y crítica, pues no debe alterar significativamente la serie de datos original.

-Reemplazo → El reemplazo es de vital importancia si se pretende conservar la serie de datos completa para su posterior tratamiento (descomposición frecuencial, etc.). En este proyecto se ha tomado como sistema de reemplazo de datos, el de sustitución por la media de los datos anterior y posterior al spike a reemplazar.

En esta situación, junto con la necesidad de contar con un equipo robusto y económico frente al alto presupuesto necesario para la adquisición de una sonda láser, la sonda ADV junto a la aplicación de un correcto filtrado de datos constituye una solución técnica y económica (Molina, 2010).

7.1. Métodos de filtrado.

Existen diversas metodologías para realizar el filtrado de datos. A continuación se describen algunas de ellas.

-Método del umbral de aceleración y velocidad, ATM (Gorin y Nikora, 2000).

El método del umbral de aceleración y velocidad (ATM) es un método de detección y reemplazo en dos fases: una para aceleraciones negativas y la otra para aceleraciones positivas. En cada fase, se repetirá el procedimiento hasta que no vuelvan a detectarse nuevos spikes o dicho de otra forma, hasta que todos los datos cumplan el criterio de aceleración y velocidad establecido.

Un dato se desecha cuando la aceleración absoluta $|a_i|$ excede un umbral λ_{ag} y la desviación absoluta de la velocidad media excede el valor $k\sigma$; donde λ_a es el umbral de aceleración relativa, g es la aceleración de la gravedad, k un factor a determinar y σ es la desviación estándar. Siendo:

$$a_i = (u_i - u_{i-1}) / \Delta t \quad 22$$

Dónde: u_i y u_{i+1} son las velocidades medidas en el tiempo i e $i+1$ respectivamente, y Δt el intervalo de muestreo.

En cada una de las fases se realizan los reemplazos de los datos desechados hasta que todos cumplan el criterio de aceleración λ_{ag} y no excedan el umbral de magnitud $k\sigma$.

En cuanto al umbral k , su determinación se basa en la teoría de la distribución de probabilidad normal, que expresa que para n variables aleatorias independientes con una distribución normal ξ_i , la desviación máxima absoluta esperada es:

$$E(|\xi_i|_{max}) = \sqrt{2 \ln n} \sigma = \lambda_u \quad 23$$

Donde λ_u se denomina el umbral Universal. Para una variable aleatoria normal de media nula y con desviación estándar estimada σ , el máximo valor absoluto esperado es:

$$\lambda_{u\sigma} = \sqrt{2 \ln n} \sigma \quad 24$$

Gorin y Nikora (2002) consideran que el mejor reemplazo de spikes es la adaptación de un polinomio de tercer grado, utilizando los doce puntos más cercanos al dato eliminado e interpolando a través del spike. Indican que una buena elección de los parámetros es:

$$\lambda_a=1-1.5 \quad \text{y} \quad k= 1.5$$

-Método del umbral de aceleración y velocidad, ATM+C, (Castillo, 2009; Molina, 2010).

En flujos altamente turbulentos y aireados, este algoritmo no funciona adecuadamente y se propone una modificación del método, denominado Método del Umbral de Aceleración y Velocidad, ATM+C (Castillo, 2009).

El procedimiento es el mismo que en el método ATM. Sin embargo, se ha observado que en el caso de resaltos hidráulicos, el valor de λ_a se debe calcular en función de la posición d_j del punto de medida dentro del resalto hidráulico y de su correspondiente número de Froude Fr_j . Entonces la aceleración a_j en función del número de Froude es:

$$a_j = u_j/\Delta t = Fr_j \sqrt{g y_i} / \Delta t = \lambda_{aj} g \quad 25$$

Donde Δt es el intervalo de muestreo, y_j es y_{dj} cuando la dirección del flujo es hacia aguas abajo y, toma el valor y_{uj} , cuando la dirección es hacia aguas arriba (figura 55).

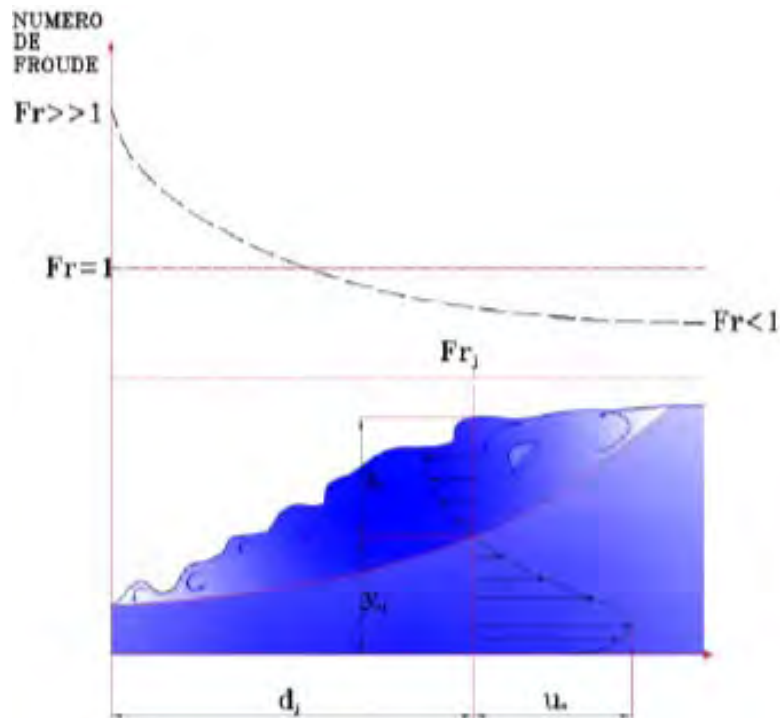


Figura 55: Variación del número de Froude y definición de los parámetros en un resalto hidráulico (Molina, 2010).

La determinación del parámetro k se basa en la teoría de la distribución de probabilidad normal. Cuando la distribución de velocidades no es normal, como ocurre en el seno de los resaltos hidráulicos, el umbral universal puede resultar inadecuado. Se ha comprobado que el valor $\lambda_u \sigma = \sqrt{2 \ln n} \sigma$, es demasiado amplio y no es útil en el caso de flujos altamente turbulentos y aireados. Tras analizar numerosos registros se llegó a la conclusión de que una buena elección de los parámetros para este tipo de flujos es:

$$\lambda_{aj} = F_{rj} \sqrt{y_j} / (\Delta t \sqrt{g}) \geq 0.5 \quad k = 2.5 \quad 26$$

-Método del umbral de correlación.

El coeficiente de correlación de ADV es un parámetro de calidad de los datos de salida de la medición Doppler. El ADV calcula tres valores de correlación, uno para cada receptor acústico, con cada muestra de velocidad. La correlación se expresa 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).

Idealmente, los valores de correlación deben estar entre 70 y 100%. Los valores por debajo del 70% indican que el ADV está operando en un régimen de medida difícil, la sonda está fuera del agua, la SNR es demasiado bajo, o que puede pasarle algo al ADV. En ciertos entornos (flujos altamente turbulentos, agua altamente aireada), 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 se pueden usar valores de hasta el 30%.

7.2. Resultados del filtrado

Este apartado recoge el postprocesado de los datos por medio del programa de filtrado ExploreVpro.

La desviación estándar es un indicador de la intensidad turbulenta del flujo. Para la obtención del método de filtrado, se seleccionan tres puntos con diferentes varianzas que sólo contengan velocidad en la dirección U (V_x), considerando una varianza elevada, una varianza media y una varianza baja.

Con el fin de obtener una metodología de filtrado para las series de datos, en este apartado se analizan los resultados de aplicar los filtrados a las tres series de datos con diferentes varianzas. Se utiliza el método de Gorin y Nikora (2002), Molina y Castillo (2010), se aplican diferentes valores de umbral de velocidad (k) y umbral de aceleración (λ).

El objeto del estudio fue comparar la forma de las gráficas, los resultados de desviación estándar y el número de spikes que obtienen las distintas configuraciones de filtrado en tres series de velocidades horizontales, afectadas en distinto grado por la turbulencia.

A continuación se analizan las series de datos para cada varianza, graficando los primeros mil datos para que se puedan observar mejor los cambios que provoca cada método.

7.2.1. Varianza baja

La serie de datos elegida para una varianza baja se sitúa a una distancia de 60 cm del impacto del chorro, y se ha obtenido con un caudal de $0.01945 \text{ m}^3/\text{s}$, un colchón de 0.125 m a una altura de 0.005 m del fondo. El perfil de velocidades de esta sección se muestra en la figura 56.

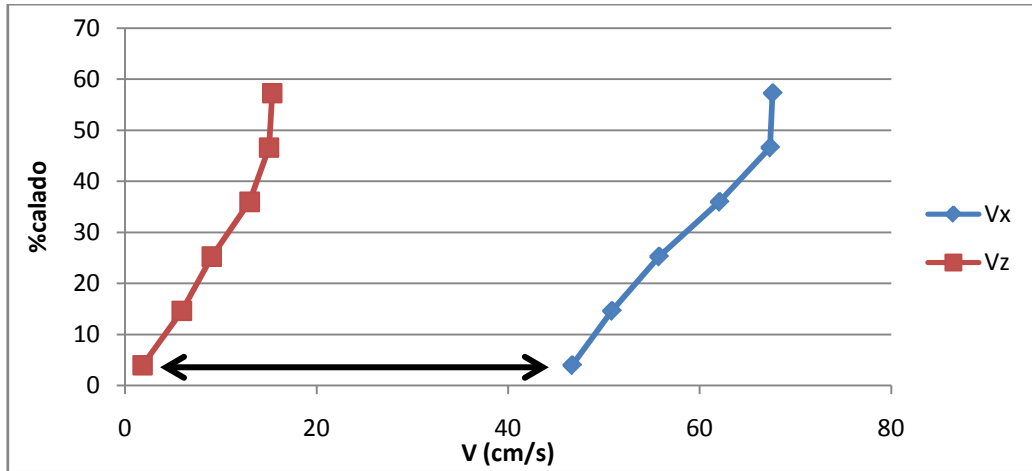


Figura 56: Perfil de velocidades verticales y horizontales para un caudal de 19.45 l/s situado a 60 cm del chorro y obtenido con un colchón de 0.125m.

El punto elegido presenta las siguientes velocidades: $V_x=46.68$ cm/s, $V_z=1.83$ cm/s.

En la tabla 11 se muestran los resultados de los diferentes métodos de filtrado y las distintas configuraciones analizadas.

	Umbral de velocidad K	Umbral de aceleración λ	Ux (cm/s)	Varianza (cm ² /s ²)	Desviación (cm/s)	n° spikes	%Datos originales
ORIGINAL			46.68	534.58	23.12		
Gorin Y Nikora (2009)	1.5	1.25	46.03	276.41	16.63	1539	69.20
Molina (2010)	2.5	0.5	42.30	359.7	18.96	2013	59.71
	1	-	46.42	150.71	12.28	3147	37.01
	1.5	-	46.07	276.82	16.64	1148	77.02
	1.75	-	45.80	347.39	18.64	938	81.22
	2	-	45.68	392.49	19.81	581	88.37
	2.25	-	45.83	425.21	20.62	366	92.67
	2.5	-	46.13	450.96	21.24	240	95.20
	3	-	46.41	479.31	21.89	112	97.76
	-	0.5	42.25	360.03	18.97	1984	60.29
	-	1	45.62	439.26	20.96	426	91.47
	-	1.5	46.44	489.94	22.13	91	98.18
	-	2	46.63	521.59	22.84	19	99.62
	2	0.5	42.60	338.42	18.40	2103	57.91
	2	1	45.34	380.06	19.50	774	84.51
	2	1.5	45.67	392.08	19.80	594	88.11
	2	2	45.68	392.49	19.81	581	88.37
	2.5	0.5	42.30	359.70	18.97	2013	59.71
	2.5	1	45.53	423.39	20.58	530	89.39
	2.5	1.25	45.87	440.05	20.98	346	93.07
	2.5	1.5	46.09	446.93	21.14	270	94.60
	2.5	2	46.14	450.14	21.22	243	95.14
	3	0.5	42.25	359.67	18.96	1991	60.15
	3	1	45.59	432.70	20.80	460	90.79
	3	1.5	46.31	468.97	21.66	159	96.82

Tabla 11: Resultado de filtrado para diferentes combinaciones de k y λ para la serie de varianza baja.

A continuación se grafican los 1000 primeros datos de los resultados de cada filtrado. Para una mejor visualización del efecto de filtrado, se ha considerado la opción de eliminación de dato anómalo, que aunque no guarda la continuidad de la serie, resulta muy visual en la comparativa del porcentaje de datos eliminados. En los gráficos, los datos situados fuera de las marcas rojas orientativas son considerados spikes.

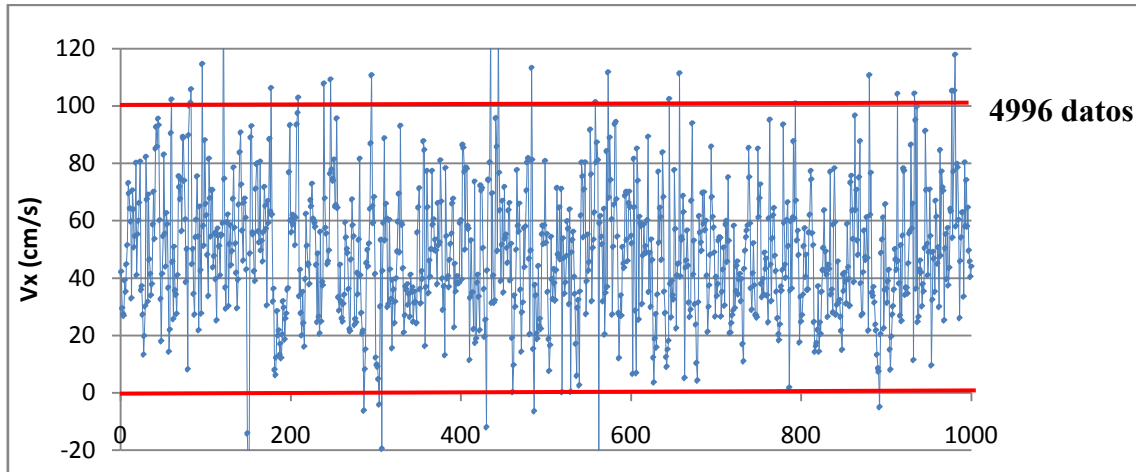


Figura 57: Serie de varianza baja original.

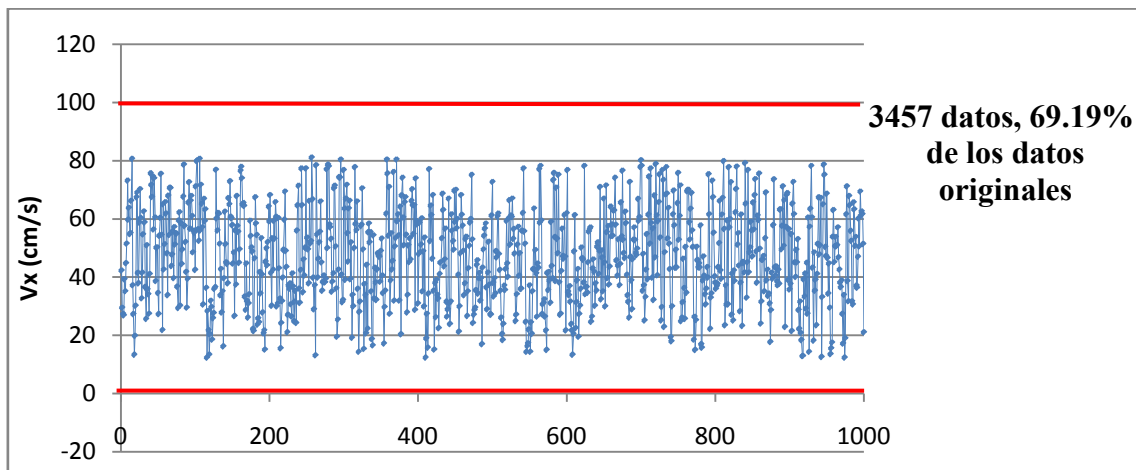


Figura 58: Serie de varianza baja con filtrado para $k=1.5$ y $\lambda=1.25$.

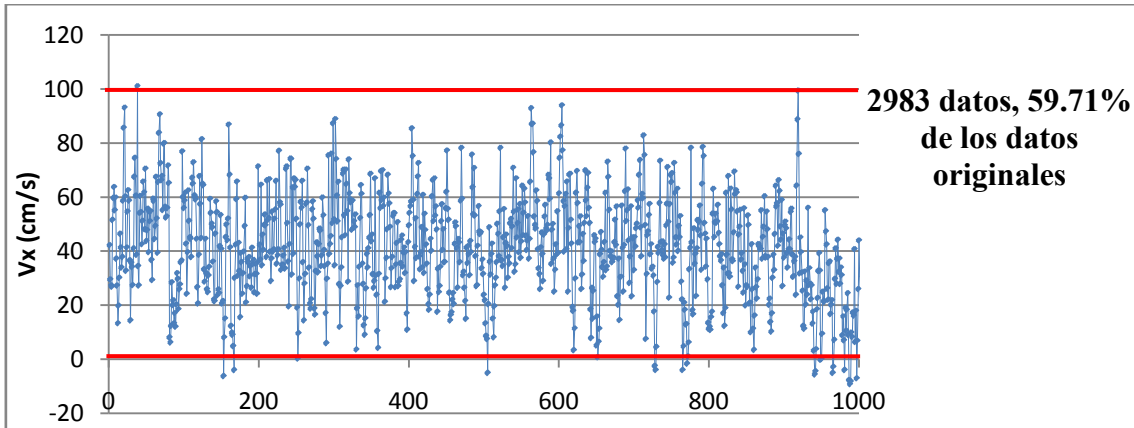


Figura 59: Serie de varianza baja con filtrado $k=2.5$ y $\lambda=0.5$.

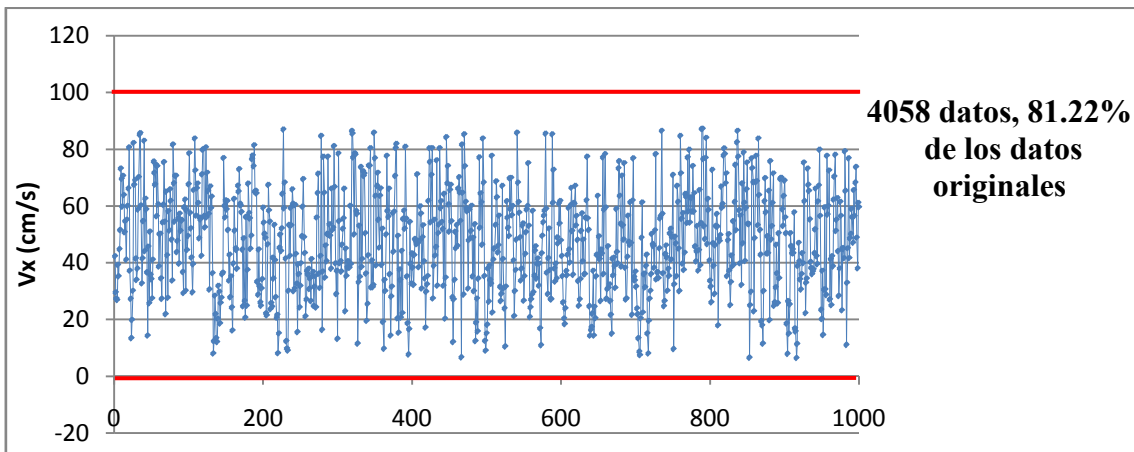


Figura 60: Serie de varianza baja con filtrado $k=1.75$.

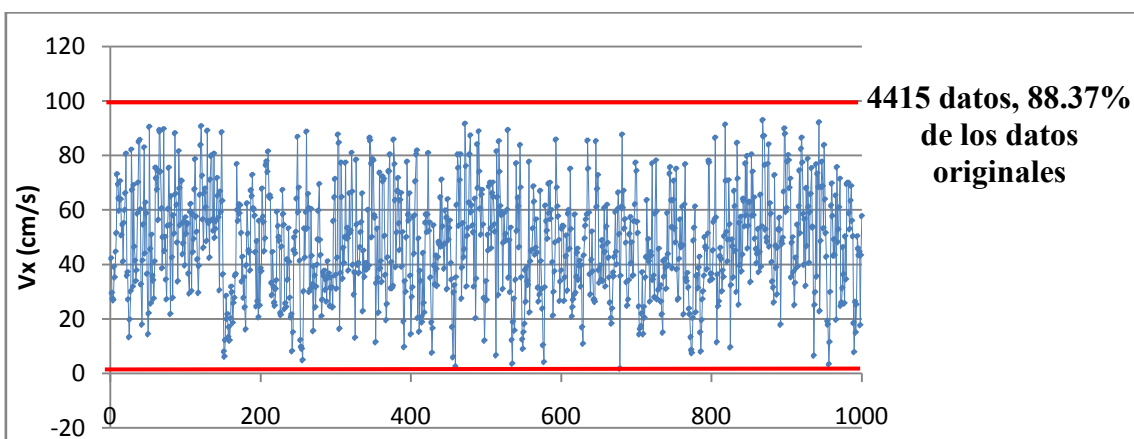


Figura 61: Serie de varianza baja con filtrado $k=2$.

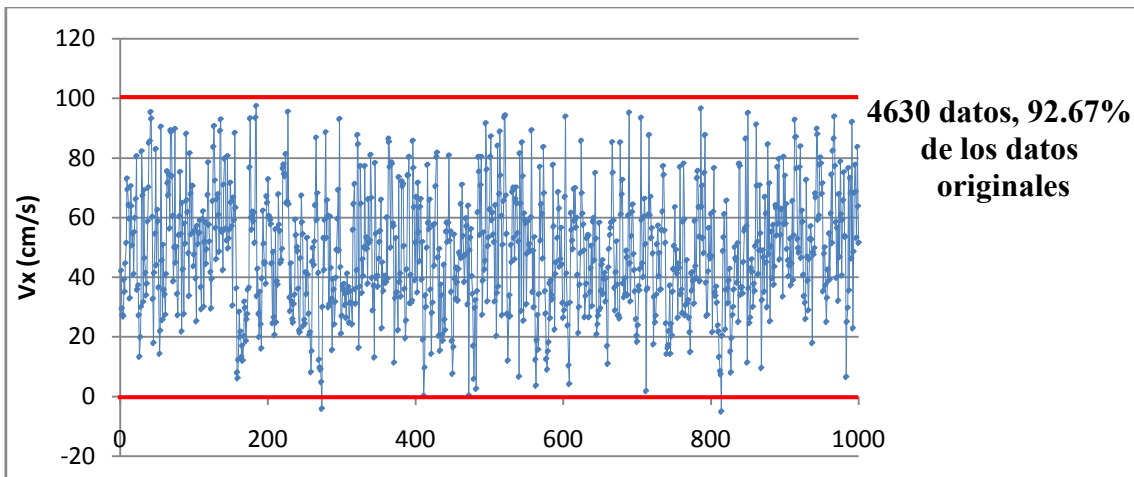


Figura 62: Serie de varianza baja con filtrado $k=2.25$.

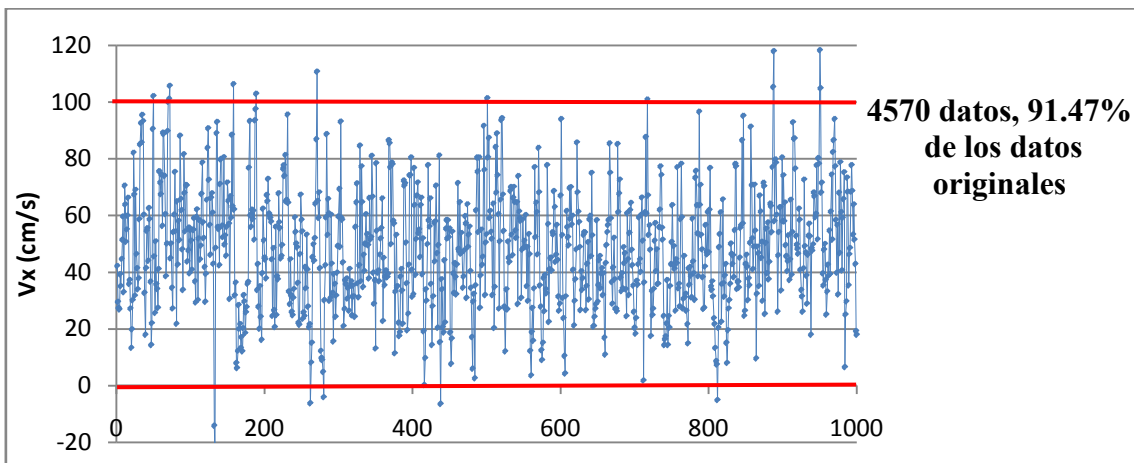


Figura 63: Serie de varianza baja con filtrado $\lambda=1$.

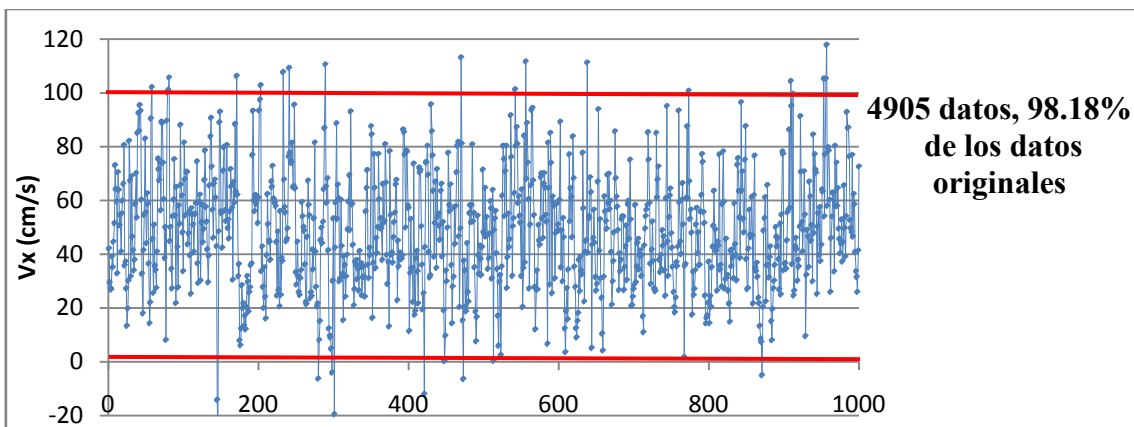


Figura 64: Serie de varianza baja con filtrado $\lambda=1.5$.

Con los datos anteriores se puede observar que los valores de Gorin y Nikora disminuyen la desviación, aunque consideran 1539 spikes, conservando únicamente un 69.20% de los datos originales. Por tanto, este filtrado desecha demasiados datos.

El filtrado de Molina utiliza un valor bajo de λ . Detecta 2013 spikes, conservando el 59.71% de los datos. Por tanto, este filtrado también desecha demasiados datos.

El filtrado de umbral de correlación no se ha utilizado por presentar muy malos resultados y requerir valores bajos del coeficiente de correlación (inferiores al 30%).

Los valores de umbral de velocidad k entre 1.75 y 2.5 dan buenos resultados, disminuyendo los datos anómalos a ambos lados de las líneas de referencia y manteniendo gran porcentaje de datos. A mayores valores de k , se disminuye menos la desviación típica pero mantiene más datos.

Los valores de umbral de aceleración λ entre 1 y 1.5 nos dan buenos resultados pero siguen apareciendo datos anómalos.

El mejor resultado se ha obtenido para el valor $k=2$, ya que mantiene la mayor parte de la serie intacta mientras que elimina los datos considerados anómalos.

7.2.2. Varianza media

La serie de datos utilizada para la varianza media se considera en la sección situada a una distancia de 10 cm del impacto del chorro, con un caudal de $0.01945 \text{ m}^3/\text{s}$ y en un colchón de 0.125 m (figura 65).

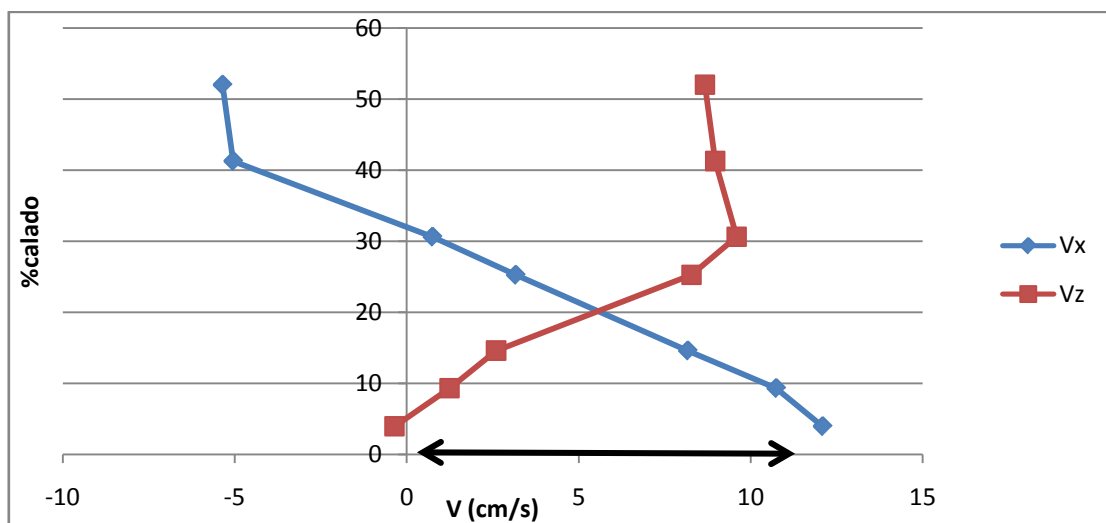


Figura 65: Perfil de velocidades horizontales y verticales situado a 10 cm del chorro, obtenido en un calado de 0.125 m para un caudal de $0.01945 \text{ m}^3/\text{s}$.

El punto elegido presenta las siguientes velocidades: $V_x=12.09$ cm/s y $V_z=-0.35$ cm/s.

En la tabla 12 se muestran los resultados de los diferentes métodos de filtrado y las distintas configuraciones analizadas.

	Umbral de velocidad K	Umbral de aceleración λ	Ux (cm/s)	Varianza (cm ² /s ²)	Desviación (cm/s)	n° spikes	%Datos originales
ORIGINAL			12.09	6169.56	78.55		
Gorin y Nikora (2009)	1.5	1.25	11.43	1870.38	43.25	4112	17.69
Molina (2010)	2.5	0.5	10.47	1655.31	40.69	4887	2.18
	1	–	10.26	1676.61	40.95	2969	40.57
	1.5	–	11.04	2989.45	54.68	1424	71.50
	1.75	–	11.34	3445.10	58.70	980	80.38
	2	–	11.48	3862.80	62.15	695	86.09
	2.25	–	12.19	4347.23	65.93	463	90.73
	2.5	–	12.10	4697.70	68.54	328	93.43
	2.75	–	12.55	5004.92	70.75	224	95.52
	3	–	12.66	5323.85	72.96	145	97.10
	–	1	10.72	1781.94	42.21	4403	11.87
	–	2	11.88	2592.90	50.92	2788	44.20
	–	2.5	10.97	3007.42	54.84	2030	59.37
	–	3	11.17	3428.73	58.56	1442	71.14
	–	3.5	11.69	3872.35	62.23	1006	79.86
	–	4	12.10	4247.91	65.18	684	86.31
	–	4.5	12.06	4635.37	68.08	444	91.11
	–	5	12.65	4964.60	70.46	289	94.22
	1.5	3	10.54	2617.98	51.17	1988	60.21
	1.75	3	10.65	2857.25	53.45	1738	65.21
	2	3	10.61	3046.33	55.19	1611	67.75
	2.25	3	11.25	3195.98	56.53	1540	69.18
	2.5	3	11.05	3270.02	57.18	1502	69.94
	2.5	3.5	11.51	3693.30	60.76	1086	78.26
	2.5	4	11.88	4001.33	63.26	788	84.23
	2.5	4.5	11.70	4238.95	65.11	588	88.23
	2.5	5	12.10	4419.70	66.48	471	90.57
	2.75	4	12.01	4058.71	63.71	753	84.93
	2.75	4.5	11.87	4392.12	66.27	534	89.31
	2.75	5	12.46	4618.54	67.96	401	91.97
	3	4	12.12	4140.41	64.35	723	85.53
	3	4.5	11.98	4516.18	67.20	492	90.15
	3	5	12.61	4800.47	69.29	349	93.01

Tabla 12: Resultado del filtrado para diferentes combinaciones de k y λ para la serie de varianza media.

A continuación se grafican los mil primeros datos de los resultados de cada filtrado. Para una mejor visualización, se ha considerado la opción de eliminación del dato anómalo, que aunque no mantiene la continuidad de la serie, resulta muy visual en la

comparativa del porcentaje de datos eliminados. En los gráficos, los datos situados fuera de las marcas rojas son considerados spikes.

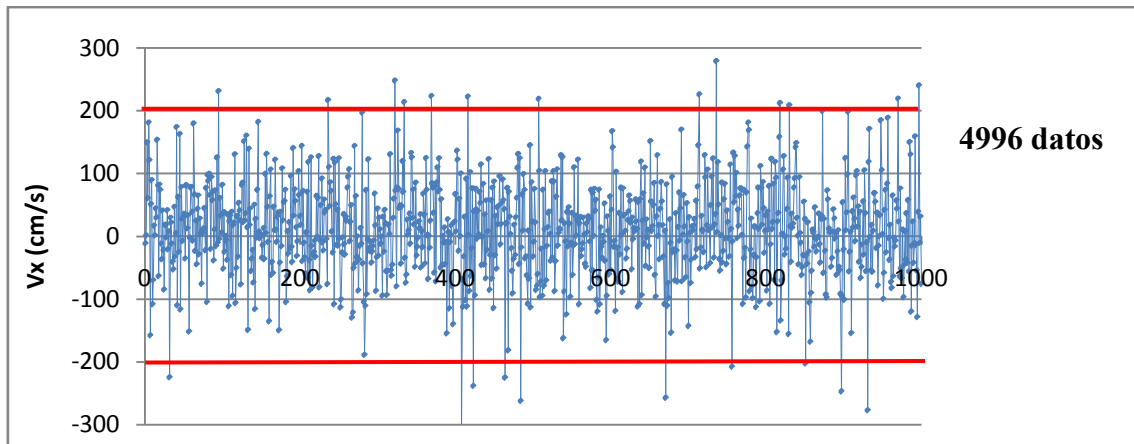


Figura 66: Serie de varianza media original.

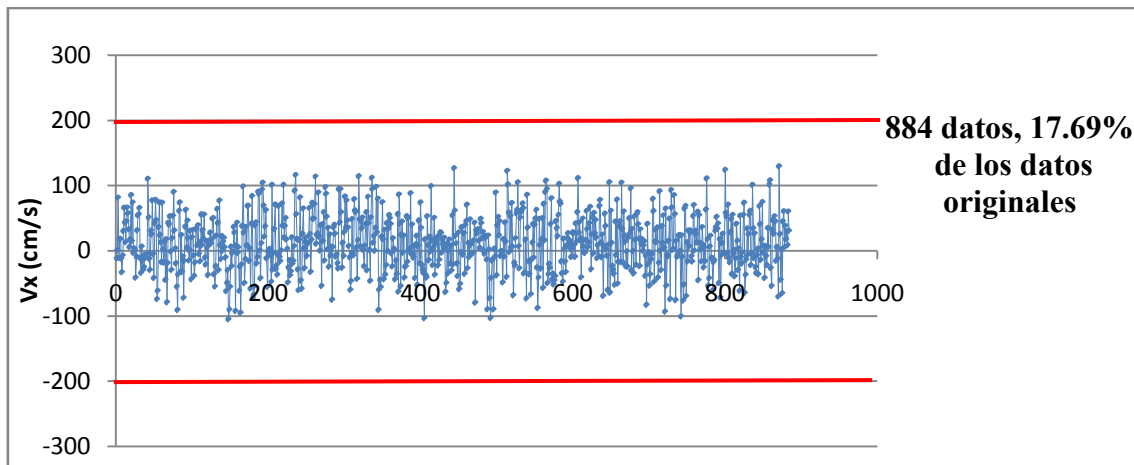


Figura 67: Serie de varianza media con filtrado $k=1.5$ y $\lambda=1.25$.

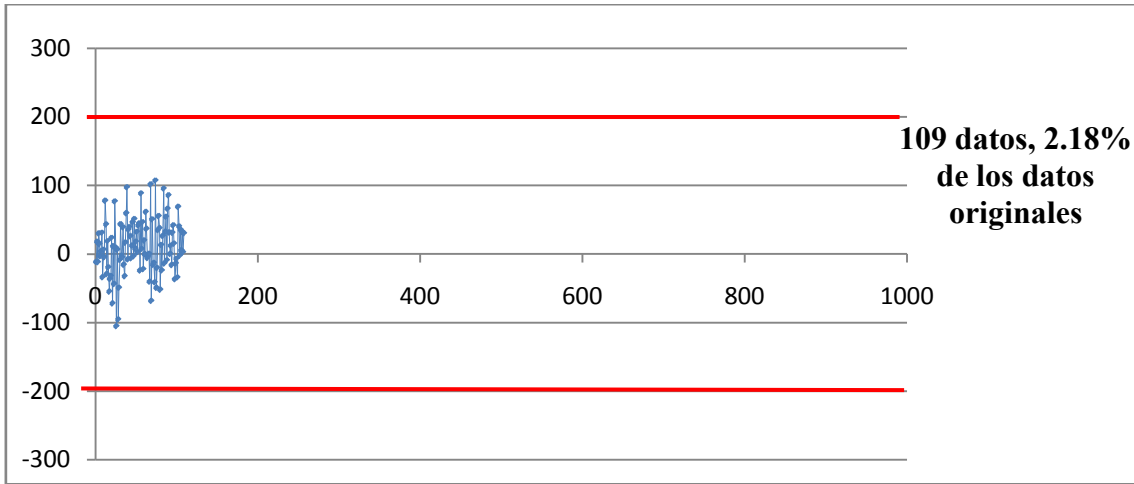


Figura 68: Serie de varianza media con filtrado $k=2.5$ y $\lambda=0.5$.

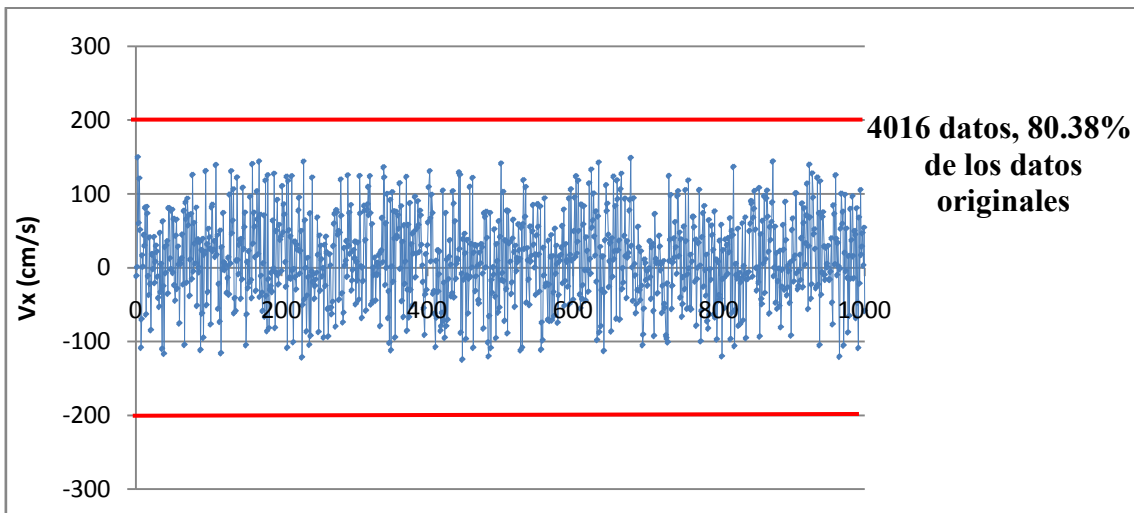


Figura 69: Serie de varianza media con filtrado $k=1.75$.

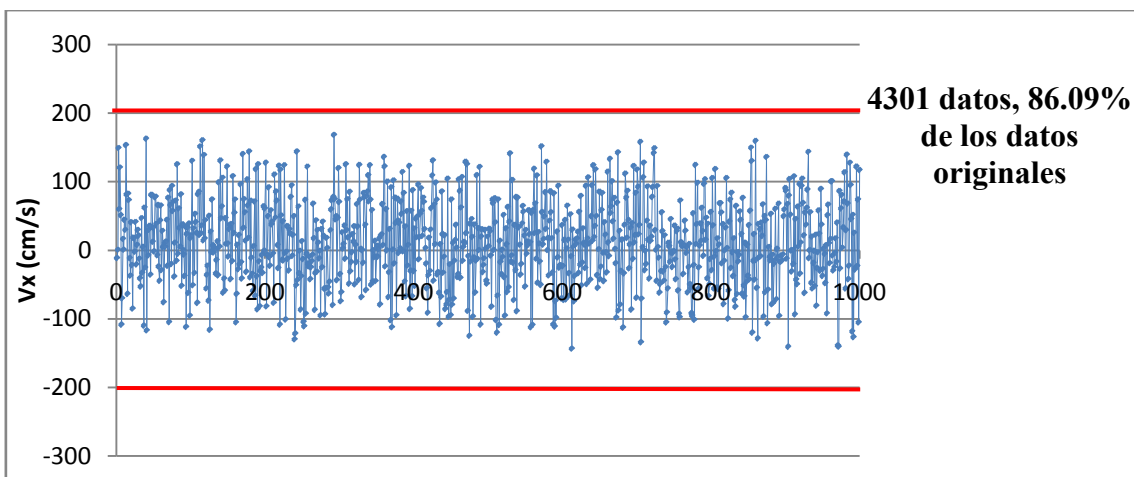


Figura 70: Serie filtrada para $k=2$ de varianza media.

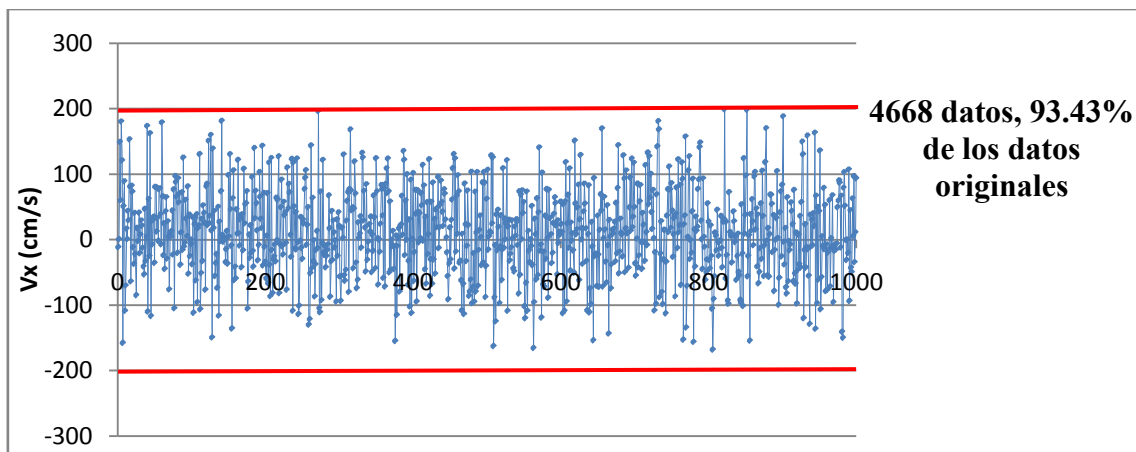


Figura 71: Serie de varianza media con filtrado $k=2.5$.

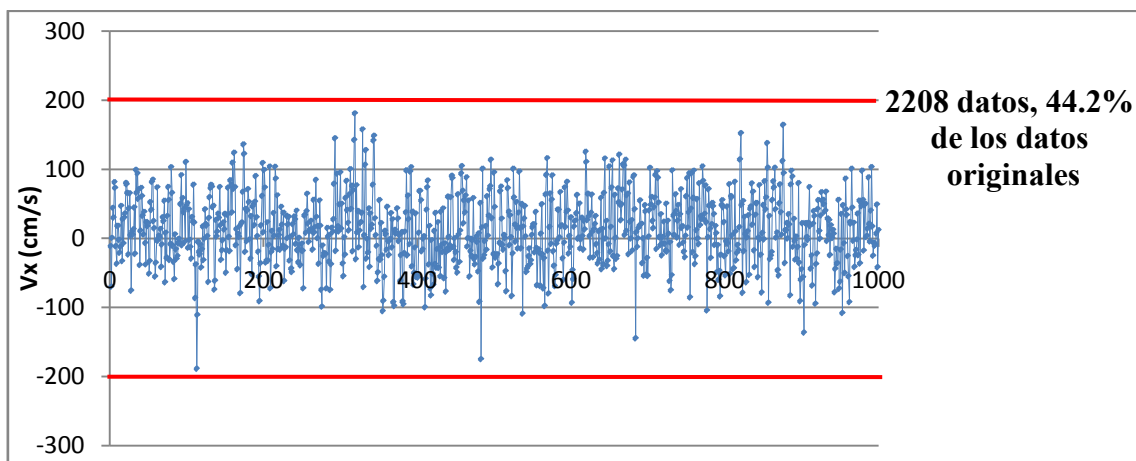


Figura 72: Serie de varianza media con filtrado $\lambda=2$.

Con los datos anteriores se puede observar que los valores de Gorin y Nikora disminuyen la desviación típica, pero consideran 4112 spikes, conservando únicamente un 17.69 % de los datos originales. Por tanto, este filtrado desecha demasiados datos.

El filtrado de Molina utiliza un valor bajo de λ . Obtiene 4993 spikes, por lo que desecha casi toda la serie de datos.

El filtrado de umbral de correlación no se ha utilizado por presentar muy malos resultados y requerir valores bajos del coeficiente de correlación (inferiores al 30%).

Los valores de umbral de velocidad k entre 1.75 y 2.5 dan buenos resultados, disminuyendo los datos anómalos a ambos lados de las líneas de referencia y manteniendo un gran porcentaje de datos. A mayores valores de k , se disminuye menos la desviación típica pero mantiene más datos.

Los valores de umbral de aceleración λ entre 4 y 5 también dan buenos resultados pero estos valores son demasiado altos. Se observa que a medida que aumenta la varianza, el umbral de aceleración requiere de números elevados, aunque mantiene menos datos.

El mejor resultado obtenido se ha dado para el valor $k=2$, ya que mantiene la mayor parte de la serie intacta mientras que elimina los datos considerados anómalos.

7.2.3. Varianza alta.

La serie de datos utilizada para una varianza alta se sitúa a una distancia de 10 cm del impacto del chorro, obtenido con un caudal de $0.04531 \text{ m}^3/\text{s}$ y un colchón de 0.250 m (figura 73).

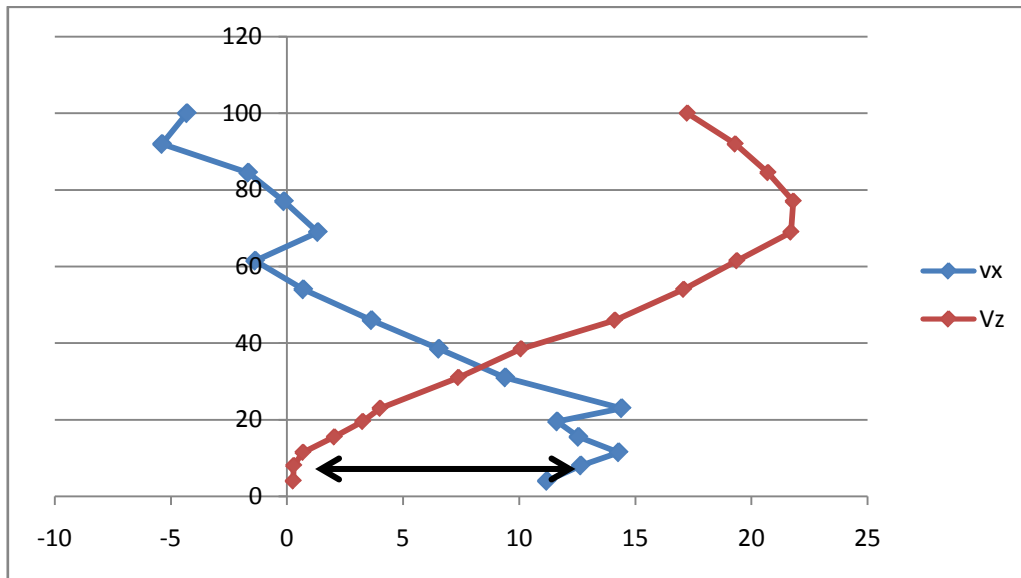


Figura 73: Perfil de velocidades horizontales y verticales medias para un caudal de 45.31 l/s, situado a 10 cm del chorro, obtenido en un colchón de 0.250 m.

El punto elegido se encuentra a una distancia de 0.02 m de la solera y presenta las siguientes velocidades: $V_x=14.28 \text{ cm/s}$ y $V_z=0.7 \text{ cm/s}$.

En la tabla 13 se muestran los resultados de los diferentes métodos de filtrado y las distintas configuraciones analizadas.

	Umbral de velocidad	Umbral de aceleración λ	Ux (cm/s)	Varianza (cm ² /s ²)	Desviación (cm/s)	n°Spikes	%Datos originales
ORIGINAL			14.28	17021.82	130.47		
Gorin y Nikora (2009)	1.5	1.25	18.62	4940.28	70.29	4712	5.76
Molina (2010)	2.5	0.5	28.94	9138.05	95.59	4957	0.78
	1	–	19.21	4397.80	66.32	3306	33.88
	1.5	–	21.03	9117.64	95.49	1892	62.16
	1.75	–	21.42	11493.10	107.21	1234	75.32
	2	–	19.54	13623.61	116.72	736	85.28
	2.25	–	17.96	15473.43	124.39	340	93.20
	2.5	–	16.30	16605.33	128.86	106	97.88
	3	–	14.34	17052.11	130.58	11	99.78
		1.5	16.87	6712.60	81.93	4531	9.38
	–	2	19.47	6380.93	79.88	4173	16.54
	–	2.5	21.66	6667.97	81.66	3791	24.18
	–	4	20.05	9434.30	97.13	2344	53.12
	–	5	18.94	11390.81	106.73	1555	68.9
	–	6	18.00	12852.40	113.37	956	80.88
	–	6.5	18.59	13723.16	117.15	692	86.16
	–	7	17.40	14204.46	119.18	516	89.68
	–	7.5	16.83	15031.91	122.60	363	92.74
	–	8	15.82	15526.70	124.61	253	94.94
	–	8.5	15.21	16016.28	126.56	163	96.74
	2	7	19.82	12520.54	111.90	1002	79.96
	2	8	18.96	13168.97	114.76	845	83.10
	2.5	6	18.52	12859.65	113.40	1020	79.60
	2.5	7	18.03	14198.66	119.16	588	88.24
	2.5	8	16.88	15400.92	124.10	333	93.34
	3	6	18.08	12877.89	113.48	967	80.66
	3	7	17.47	14230.86	119.29	527	89.46
	3	8	15.89	15554.92	124.72	264	94.72

Tabla 13: Resultado del filtrado para diferentes combinaciones de k y λ para la serie de varianza alta.

A continuación se grafican los 1000 primeros datos de resultados de cada filtrado para visualizar mejor los cambios.

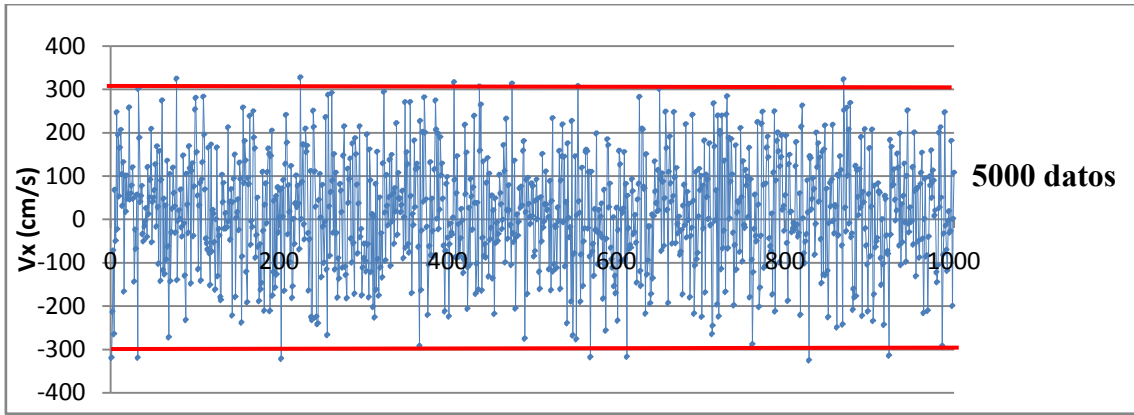


Figura 74: Serie de varianza alta original.

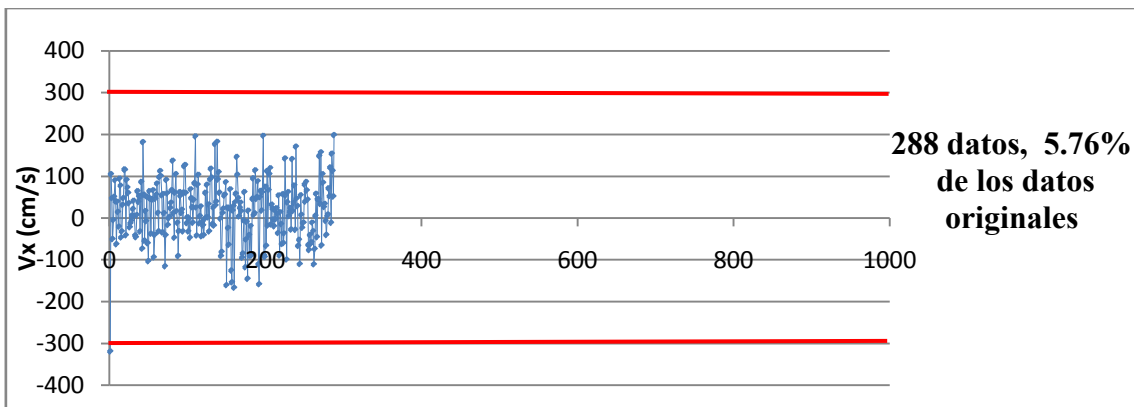


Figura 75: Serie de varianza alta con filtrado $k=1.5$ y $\lambda=1.25$.

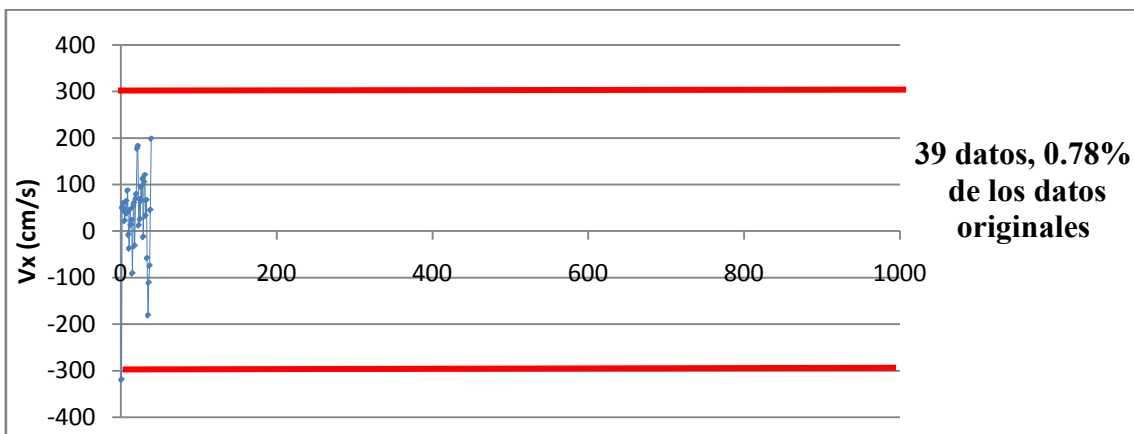


Figura 76: Serie de varianza alta con filtrado $k=2.5$ y $\lambda=0.5$.

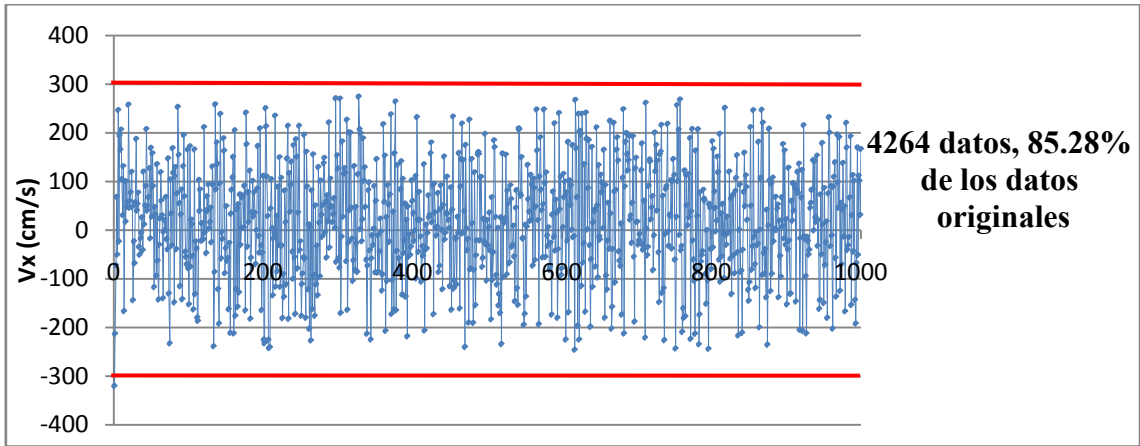


Figura 77: Serie de varianza alta con filtrado $k=2$.

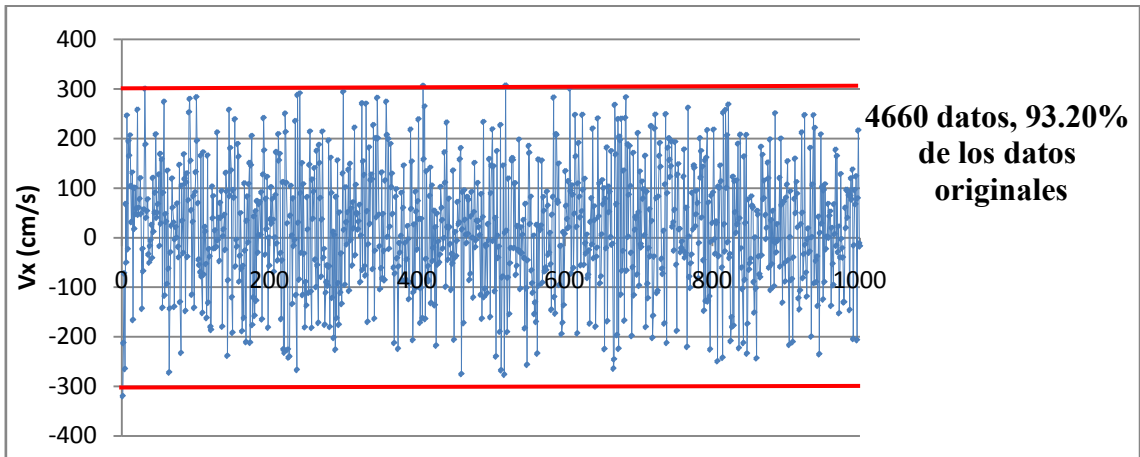


Figura 78: Serie de varianza alta con filtrado $k=2.25$.

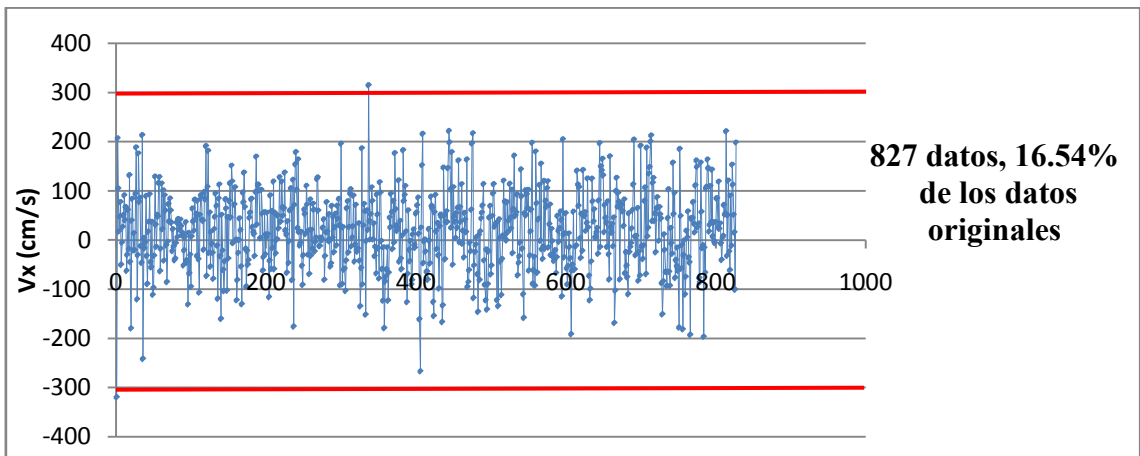


Figura 79: Serie de varianza alta con filtrado $\lambda=2$.

Con los datos anteriores se puede observar que los valores de Gorín y Nikora disminuyen la desviación típica pero consideran 4712 spikes, conservando únicamente un 5.76% de los datos originales. Por tanto, este filtrado desecha demasiados datos.

El filtrado de Molina considera 4957 spikes, conservando un 0.7 % de los datos originales. Por tanto, desecha casi toda la serie de datos.

El filtrado de umbral de correlación no se ha utilizado por presentar muy malos resultados y requerir valores muy bajos del coeficiente de correlación (inferiores al 30%).

Los valores de umbral de velocidad k entre 1.75 y 2.5 dan buenos resultados, disminuyendo los datos anómalos a ambos lados de las líneas de referencia y manteniendo un gran porcentaje de datos.

Los valores de umbral de aceleración λ entre 6 y 8 también dan buenos resultados pero estos valores son demasiado altos.

El parámetro que mejores resultados presenta en todas las series, es el umbral de velocidad k . Se ha escogido como método de filtrado un valor de $k=2$, ya que mantiene la mayor parte de la serie intacta mientras que elimina los datos considerados anómalos.

8. ANALISIS DE VELOCIDADES

En este apartado se estudian las distribuciones de velocidades medias horizontal y vertical obtenidas en distintas secciones transversales del cuenco de disipación. Se grafican conjuntamente todas las secciones de un mismo colchón para ver su evolución a lo largo del cuenco, así como las velocidades horizontales y verticales medias por separado para estudiarlas más detalladamente.

8.1. Caudal de $0.01945 \text{ m}^3/\text{s}$.

-Colchón = 0.125 m.

La figura 80 muestra de forma esquemática las velocidades horizontales (azul) y verticales (rojo) a lo largo del cuenco. Se ha medido un porcentaje muy bajo del colchón debido a que la parte superior estaba muy aireada y la sonda ADV tomaba mediciones muy irregulares.

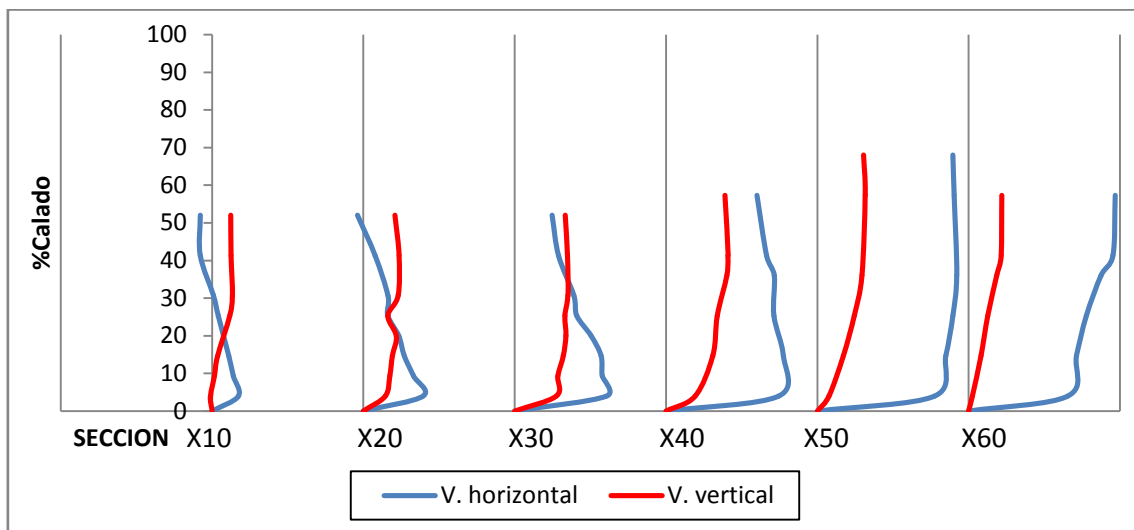


Figura 80: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 19.45 l/s y un colchón de 0.125 m.

Puede observarse que la distribución de velocidades verticales es semejante a lo largo del cuenco, mientras que las velocidades horizontales aumentan a medida que se alejan del chorro.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección 40 ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

A continuación se muestran por separado los perfiles de velocidad horizontal y vertical media.

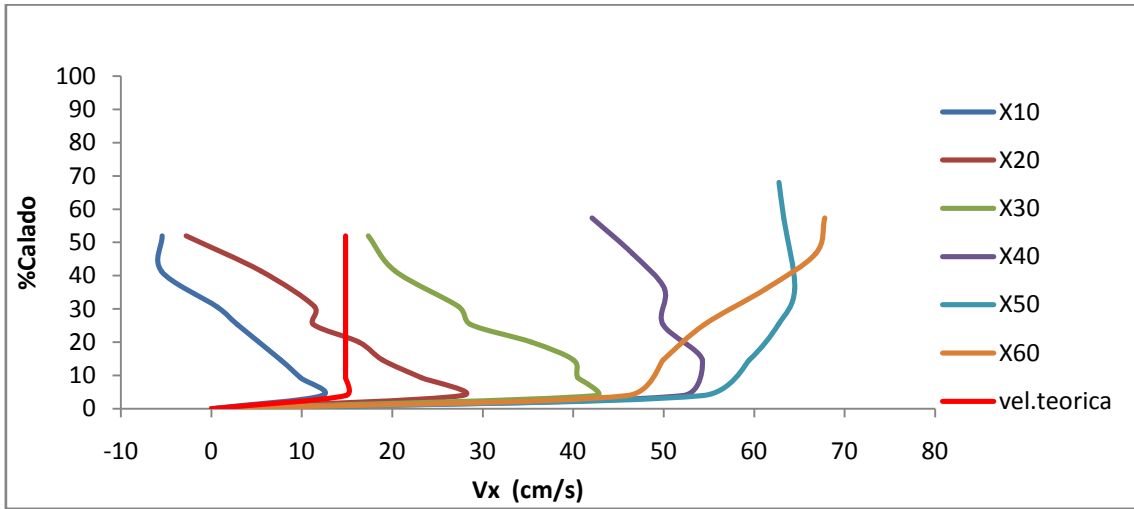


Figura 81: Velocidades horizontales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.125$ m.

En el perfil de velocidades horizontales se observa como las velocidades máximas se alcanzan en la zona más cercana al fondo para las 4 primeras secciones y luego decrece a medida que se aumenta el calado. Se intuye la existencia de un chorro de fondo, el cual no ha sido adecuadamente captado debido a la dificultad de las condiciones de medida. En las secciones $X=50$ y $X=60$ la velocidad es más uniforme.

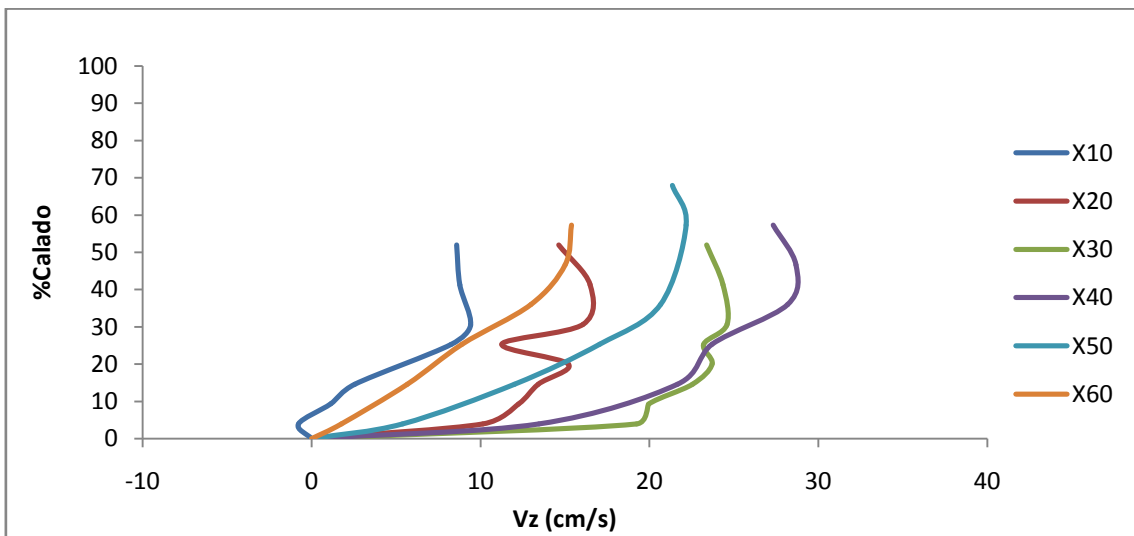


Figura 82: Velocidades verticales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.125$ m.

En los perfiles de velocidades verticales se observa un aumento progresivo de la velocidad con el calado y la distancia.

-Colchón = 0.215 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades horizontales y verticales medias para un colchón de 0.215 m, originado por dos barreras.

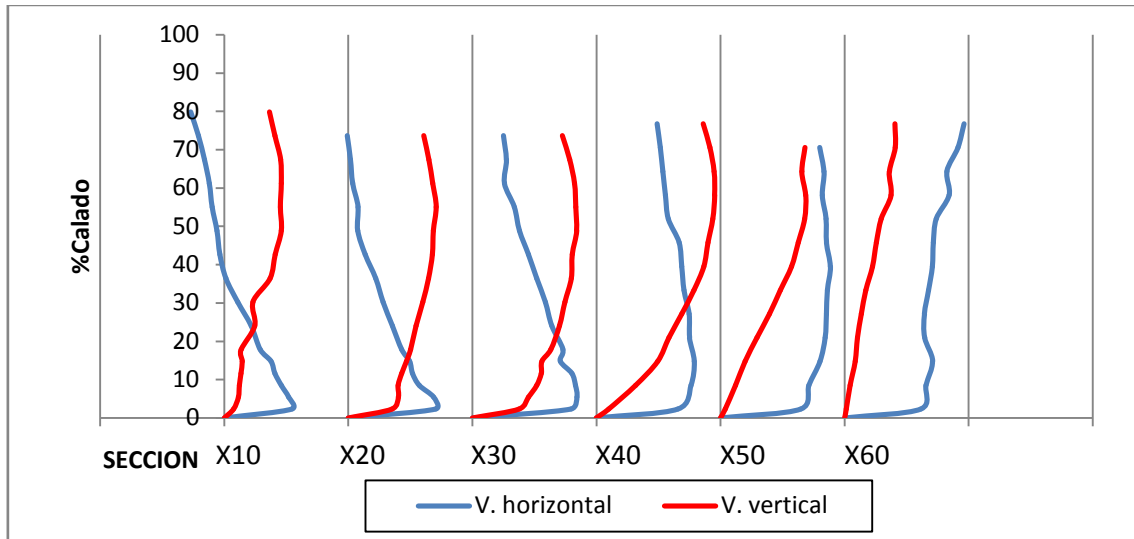


Figura 83: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 19.45 l/s y un colchón de 0.215 m.

Las velocidades verticales se mantienen prácticamente constantes a lo largo de todo el cuenco.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección 40, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

A continuación se muestran por separado los perfiles de velocidad horizontal y vertical media.

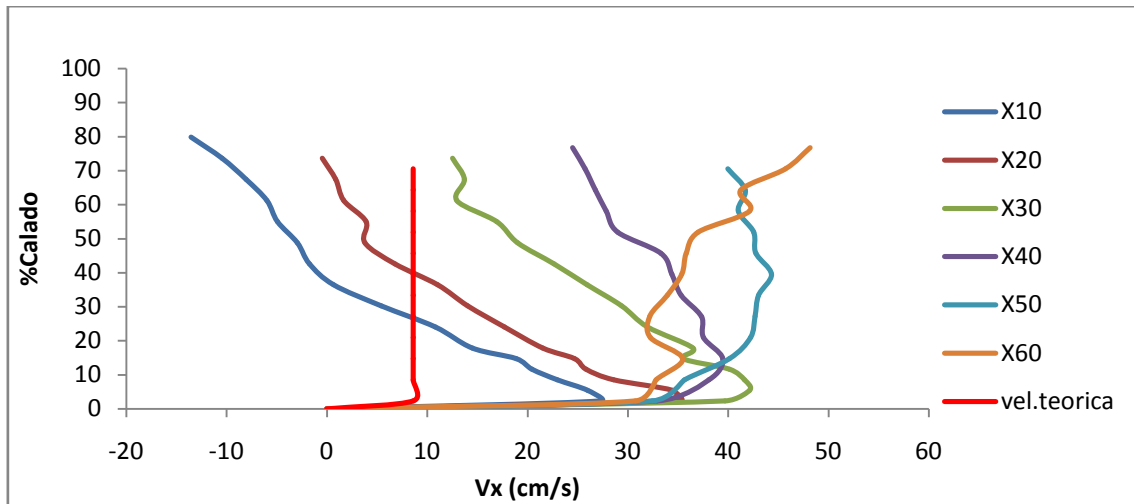


Figura 84: Velocidades horizontales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.215$ m.

En el perfil de velocidades horizontales medias se observa como la velocidad alcanza su máximo en la zona más próxima al fondo, para disminuir a medida que aumenta la distancia al fondo. Se observa la existencia de un chorro de fondo el cual no ha sido correctamente capturado en las mediciones.

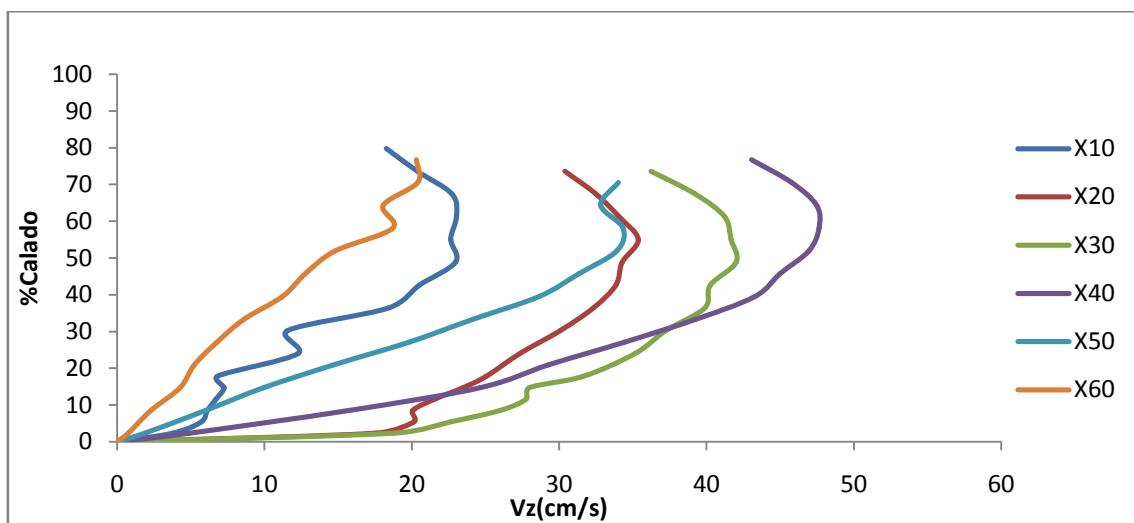


Figura 85: Velocidades verticales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.215$ m.

En el perfil de velocidades verticales se observa como las velocidades aumentan progresivamente a medida que aumenta el calado, alcanzando el máximo para el 50%-60% del calado. Las secciones intermedias ($X=20$, $X=30$, $X=40$) alcanzan los valores máximos, lo que indica que la acción turbulenta se concentra en estas secciones.

-Colchón = 0.3 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.3 m formado por 3 barreras.

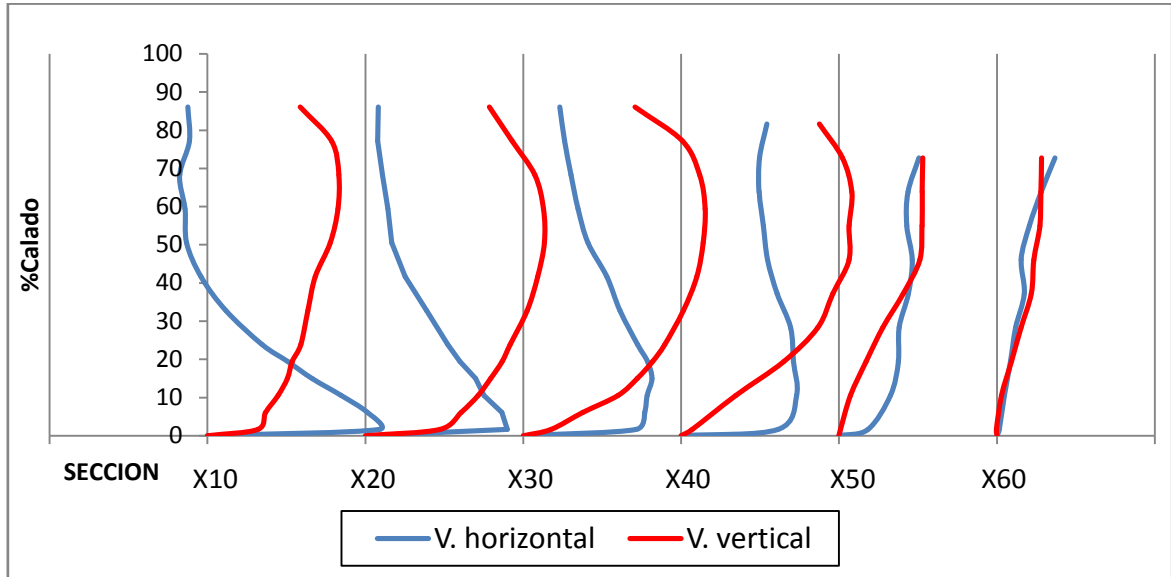


Figura 86: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 19.45 l/s y un colchón de 0.3 m.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección 40, ya que se aprecia que no hay casi variaciones en la velocidad máxima.

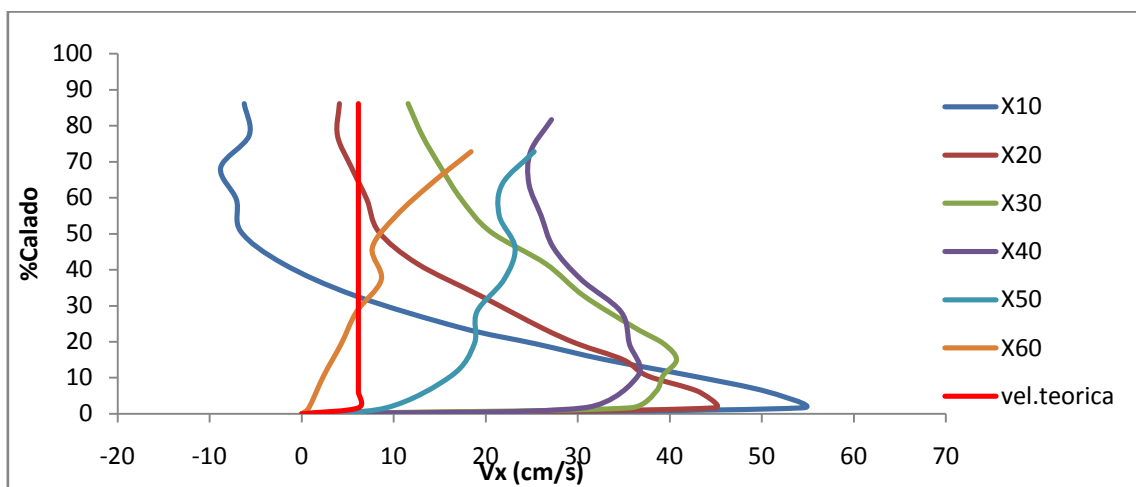


Figura 87: Velocidades horizontales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.3$ m.

En el perfil de velocidades horizontales medias se puede observar como las velocidades disminuyen en las secciones más lejanas al chorro, por lo que el chorro de fondo se ha capturado.

Las velocidades máximas se encuentran pegadas a la solera, alcanzando el máximo (54.45cm/s) para la sección más cercana al chorro (X=10) y disminuyendo al alejarse de la solera llegando a ser negativa partir del 40% del calado.

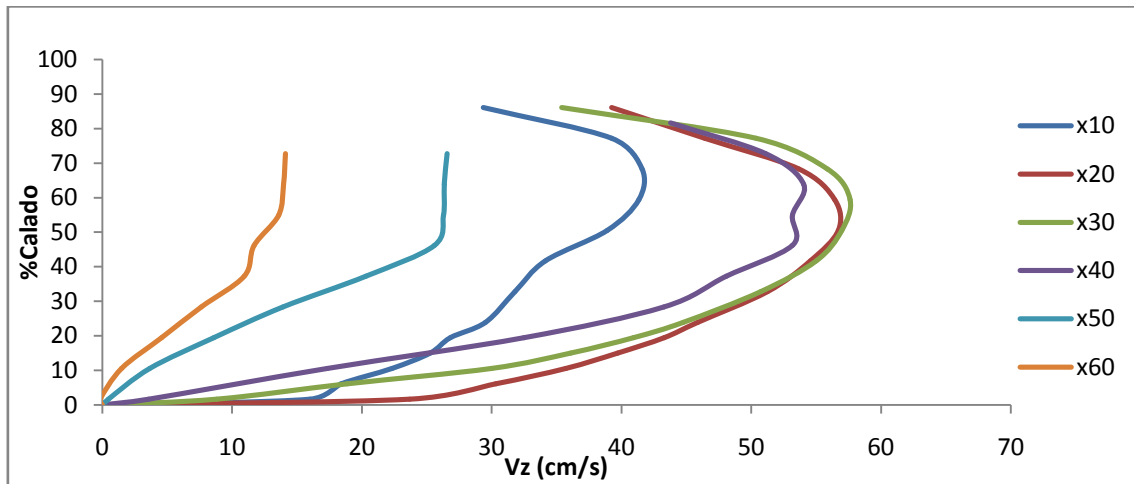


Figura 88: Velocidades verticales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.3$ m.

En el perfil de velocidades verticales se observa que las velocidades aumentan junto con el calado, hasta obtener con unas relaciones del 60-70% del calado. Los máximos se dan en las secciones intermedias (X=20, X=30, X=40) y los mínimos para los más alejados.

-Colchón = 0.385 m.

A continuación se muestra esquemáticamente las velocidades horizontales y verticales medias para un colchón de 0.385 m, formado por 4 barreras.

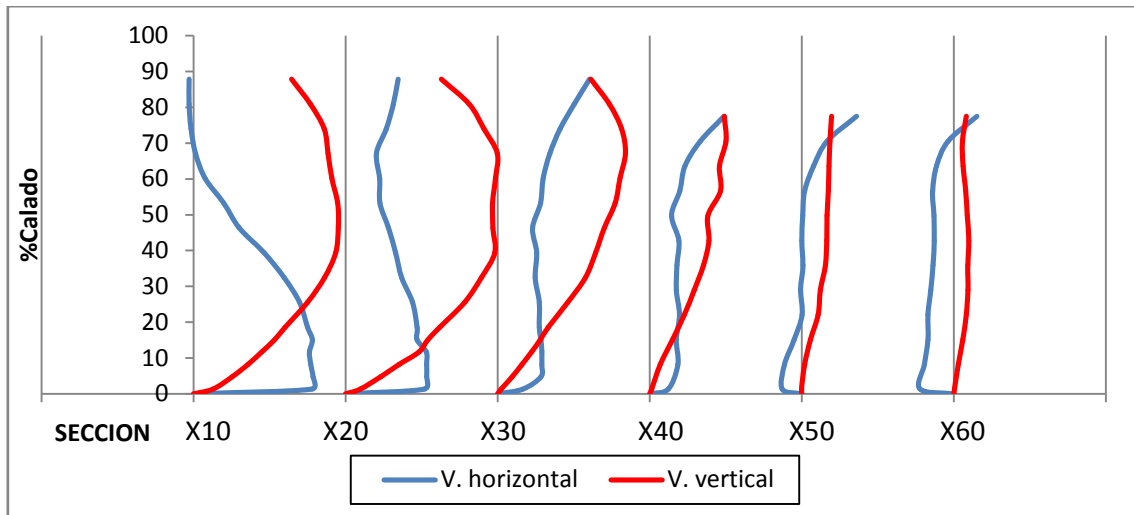


Figura 89: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 19.45 l/s y un colchón de 0.385 m.

Las velocidades horizontales para este colchón disminuyen a medida que el flujo se aleja del chorro, llegando a ser negativas en la última sección.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección X=40, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima horizontal.

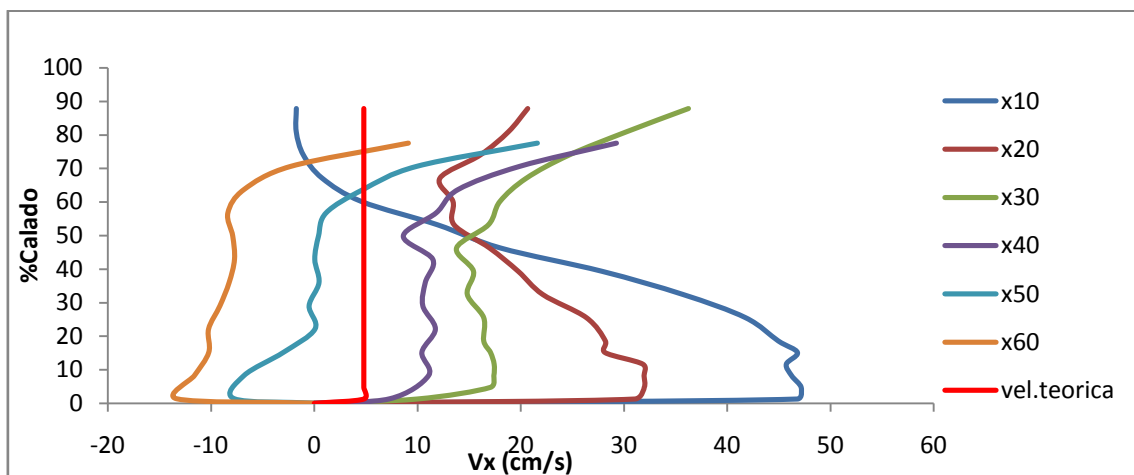


Figura 90: Velocidades horizontales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.385$ m.

En el perfil de velocidades medias horizontales medias en las primeras secciones se puede observar como en la zona cercana a la solera las velocidades alcanzan valores elevados, mientras que a partir del 50% del calado disminuyen notablemente, llegando a obtenerse valores negativos. Los mínimos se obtienen en las secciones más alejadas, donde se observa el efecto de la contrapresa.

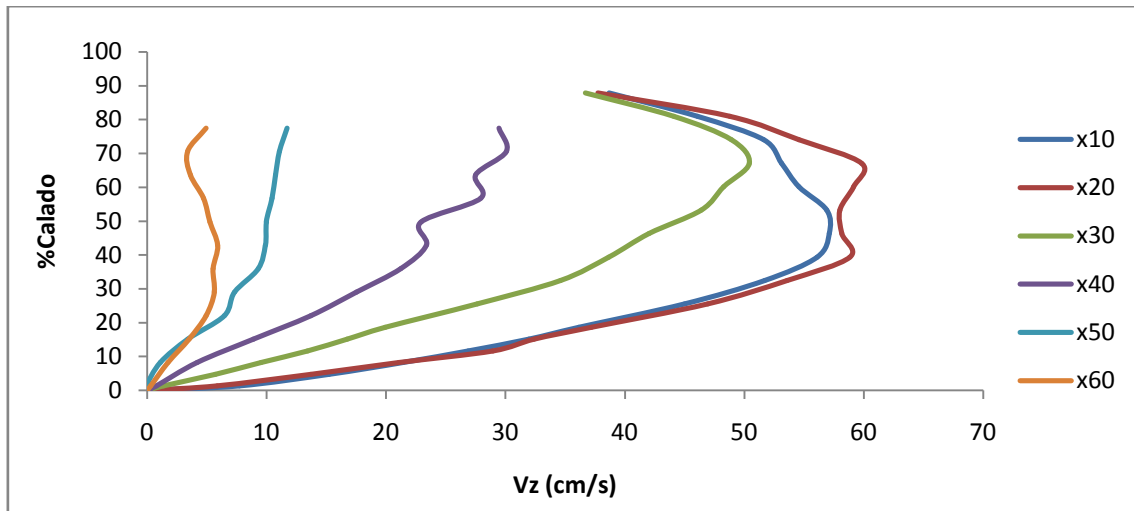


Figura 91: Velocidades verticales medias par $Q=19.45$ l/s e $y=0.385$ m.

El perfil de velocidades verticales se observa como las velocidades decrecen a medida que se alejan del chorro, manteniéndose los máximos en torno al 60% del calado en los primeros perfiles.

-Colchón = 0.465 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.465 m originado por 5 barreras.

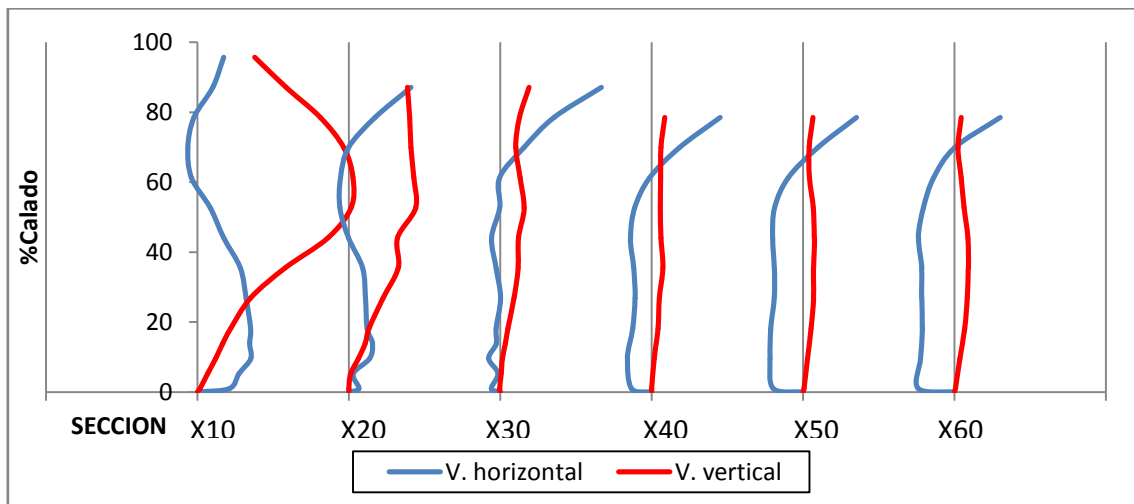


Figura 92: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 19.45 l/s y un colchón de 0.465 m.

Se puede observar que, tanto las velocidades verticales como las horizontales tienden a mantenerse constantes a lo largo del calado en toda la columna, excepto en la primera sección (X=10).

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección X=30, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

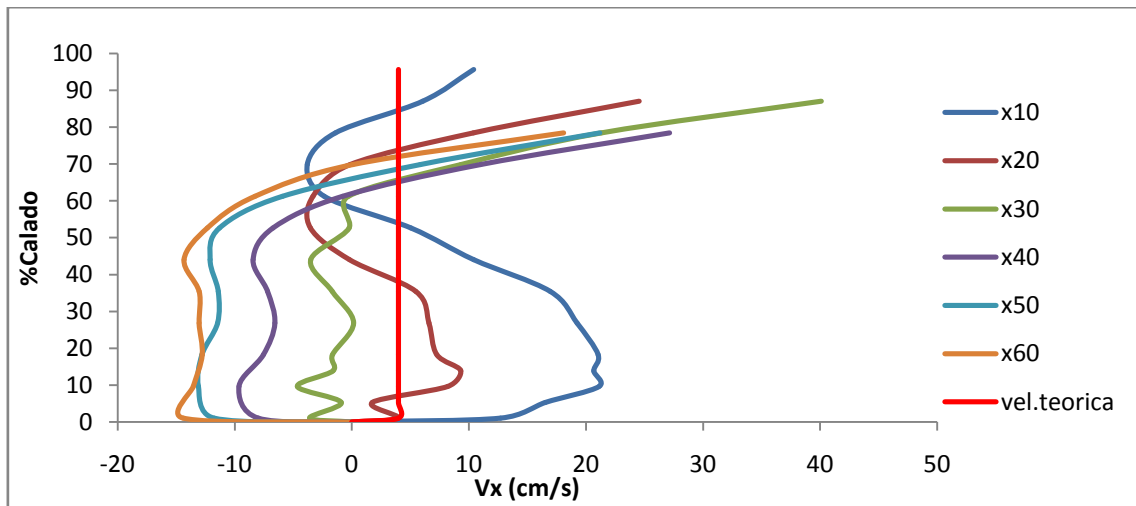


Figura 93: Velocidades horizontales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.465$ m.

En los dos primeros perfiles se observa una disminución de la velocidad a partir del 40% del calado. En el resto de las secciones se observa flujo hacia aguas arriba cerca de la solera debido al efecto de la contrapresa. Cerca de la lámina libre se aprecia una aceleración del flujo que concuerda con el paso sobre las barreras.

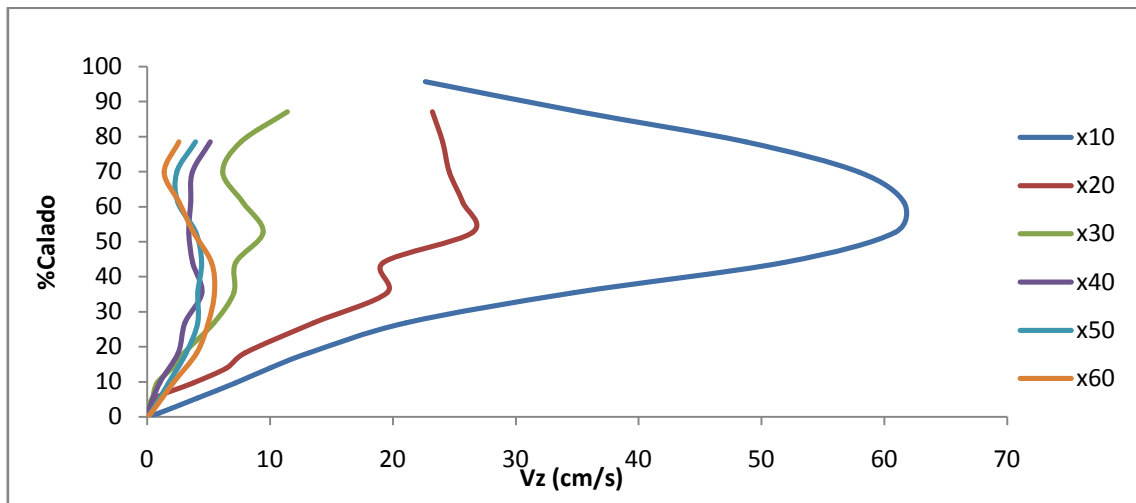


Figura 94: Velocidades verticales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.465$ m.

El primer perfil muestra una elevada componente vertical en el tramo central de la columna de agua, lo cual se va disipando en las secciones de aguas abajo hasta obtener unos valores medios menores de 10 cm/s.

-Colchón = 0.55 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.55 m formado por 6 barreras.

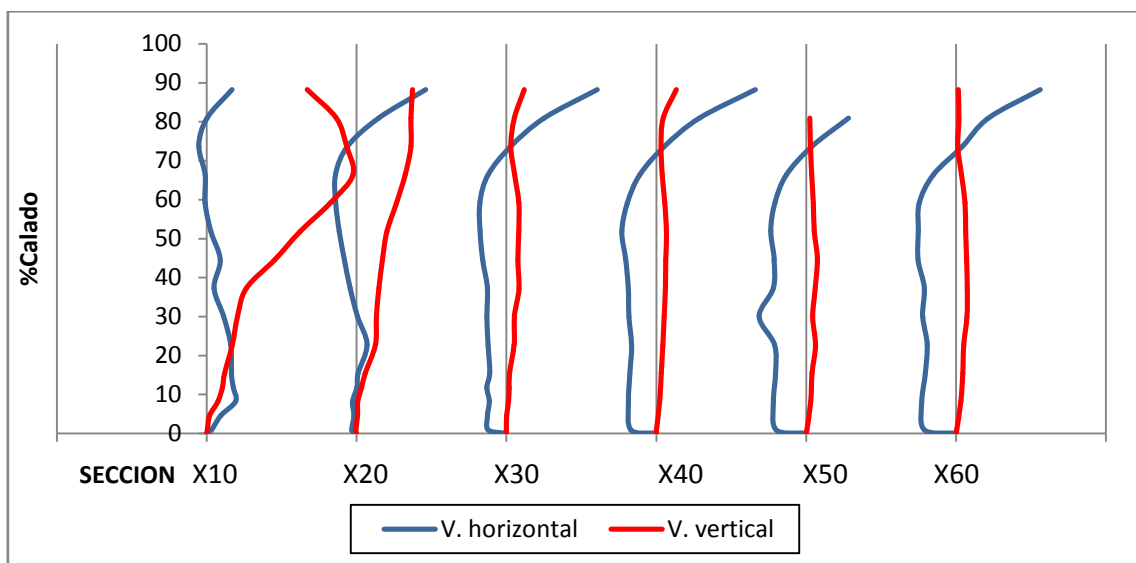


Figura 95: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para caudal de 19.45 l/s y un colchón de 0.55 m.

Se observa como las velocidades horizontales tienen un punto de inflexión entre el 60% y el 80% donde pasan de ser negativas a ser positivas.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección 30, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

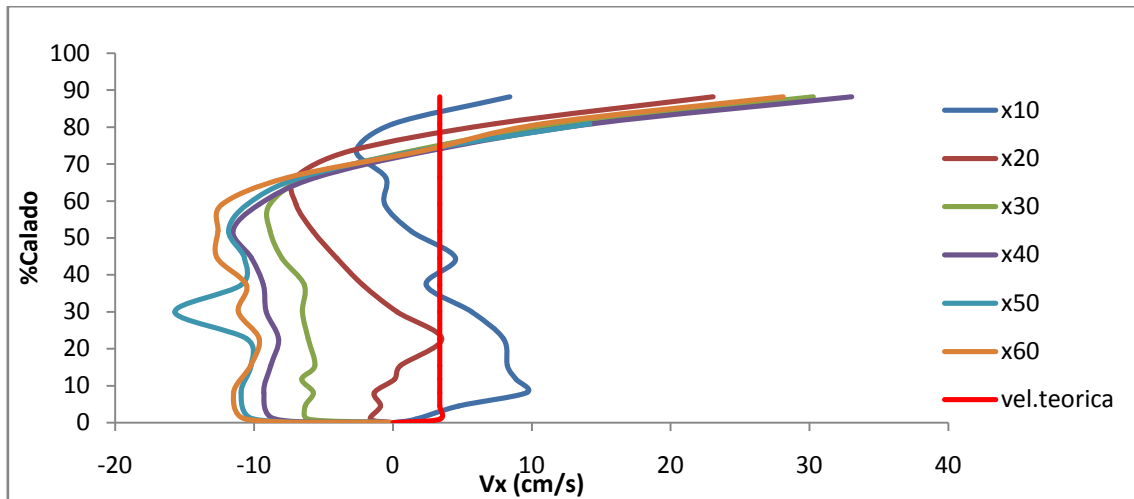


Figura 96: velocidades horizontales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.55$ m.

En el perfil de velocidades horizontales las velocidades son mayores en las secciones cercanas al chorro y menores en las lejanas.

También se observan dos puntos de inflexión diferenciables, uno situado entre el 10%-30% del calado, donde las velocidades pasan de ser crecientes a decrecientes, y otro en el 50% del calado aproximadamente, cambian de ser decrecientes a crecientes.

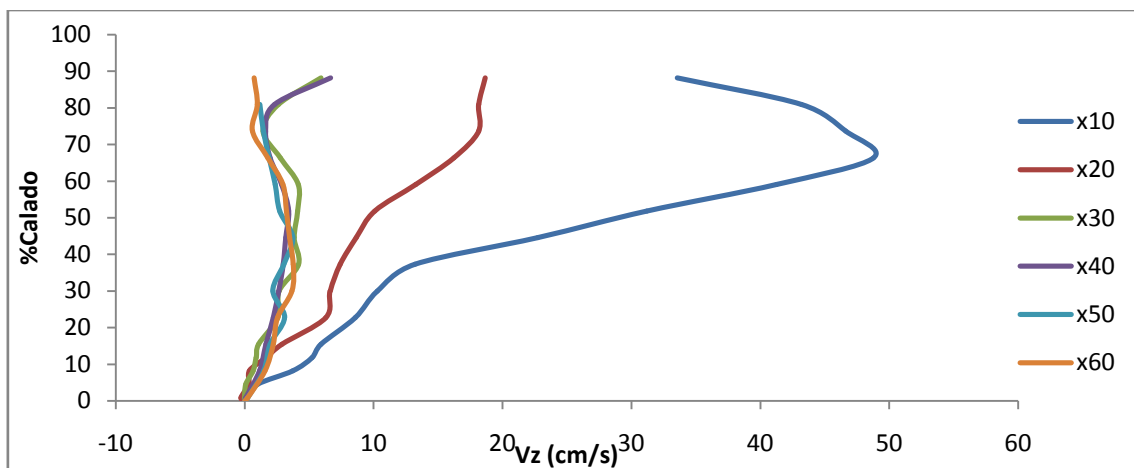


Figura 97: Velocidades verticales medias para $Q=19.45$ l/s e $y=0.55$ m.

En el perfil de velocidades verticales se observa como las velocidades son menores al alejarse del chorro, en las dos primeras secciones la velocidad aumenta al alejarse de la solera mientras que en el resto disminuye.

8.2. Caudal de 0.03067 m³/s.

A continuación se realiza el mismo procedimiento para un caudal de 30.67 l/s (0.03067m³/s)

-Colchón = 0.15 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.15 m formado por 1 barrera.

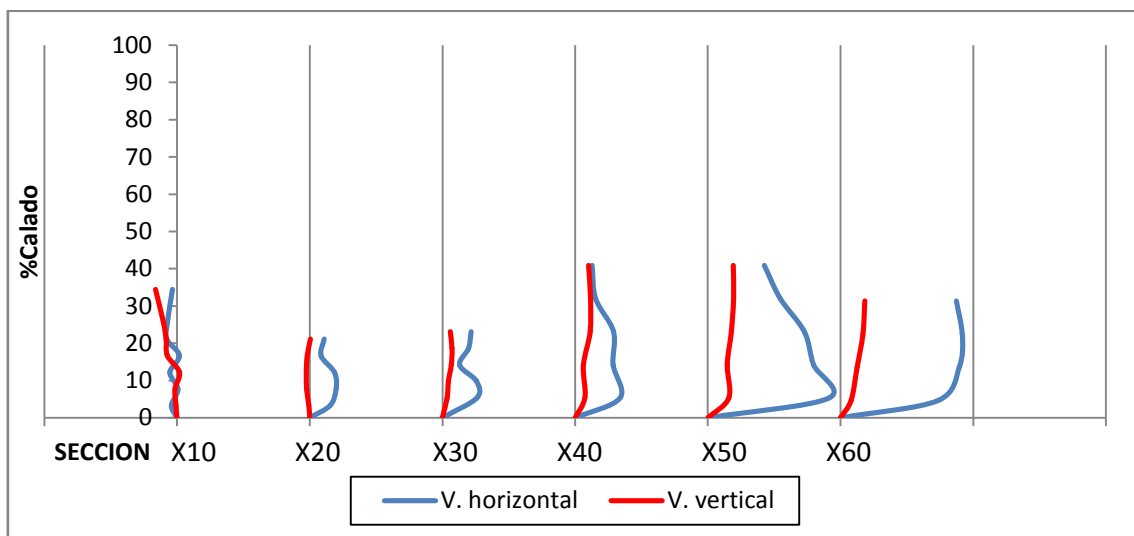


Figura 98: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 30.67 l/s y un colchón de 0.15 m.

Las velocidades horizontales y las verticales aumentan con la distancia al chorro, las horizontales aumentan bastante más.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección X=60, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

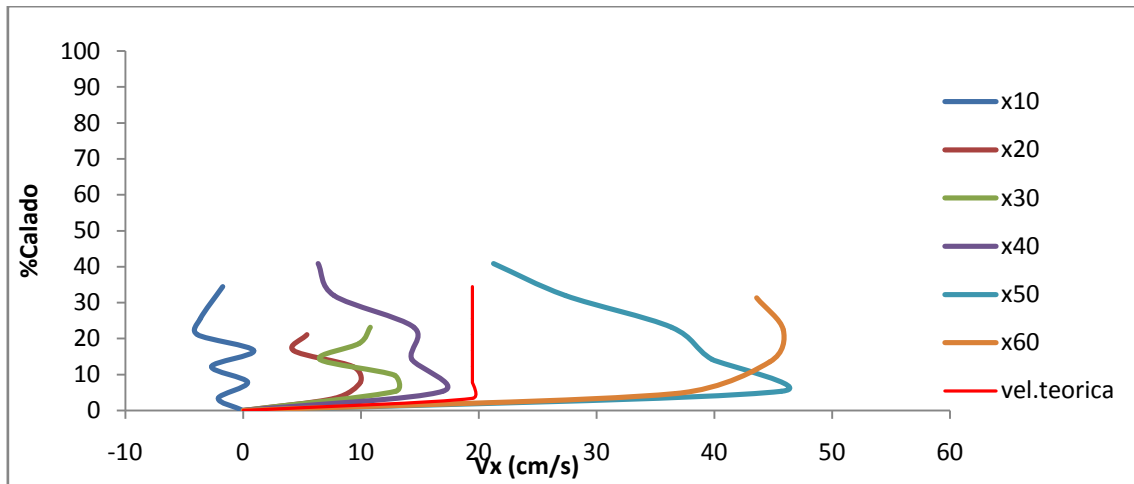


Figura 99: Velocidades horizontales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.15$ m.

En el perfil de velocidades horizontales, las velocidades toman valores mayores mientras más se aleja del chorro, alcanzando los valores máximos en las secciones $X=50$ y $X=60$ cerca de la solera.

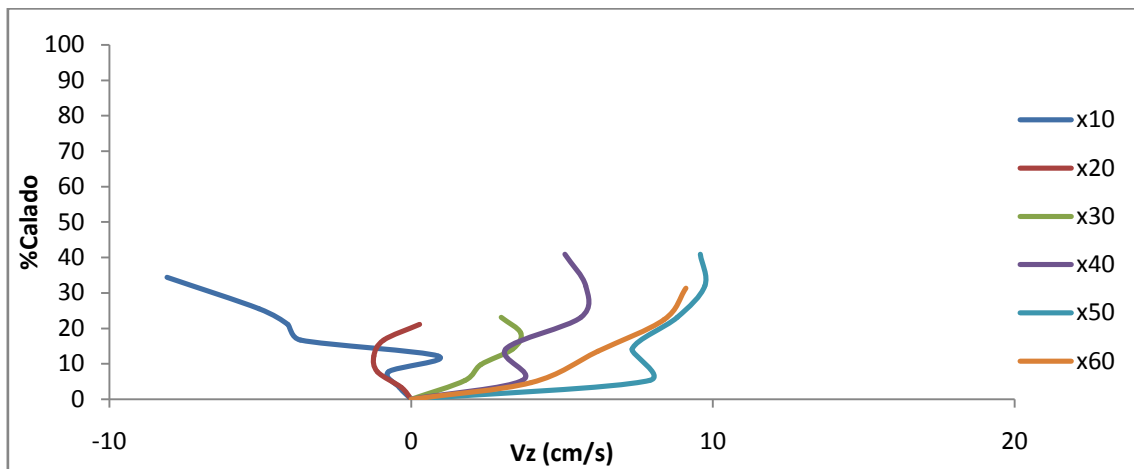


Figura 100: Velocidades verticales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.15$ m.

En las velocidades verticales medias, para la sección $X=10$ son nulas para un 10% del calado volviéndose negativas a partir del 20% de calado, llegando a un mínimo de -8.1 cm/s. En el resto de secciones aumentan positivamente a partir de un 10% de calado, alcanzando los máximos en las secciones $X=50$ y $X=60$.

-Colchón = 0.235 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades horizontales y verticales medias para un colchón de 0.235 m formado por 2 barreras.

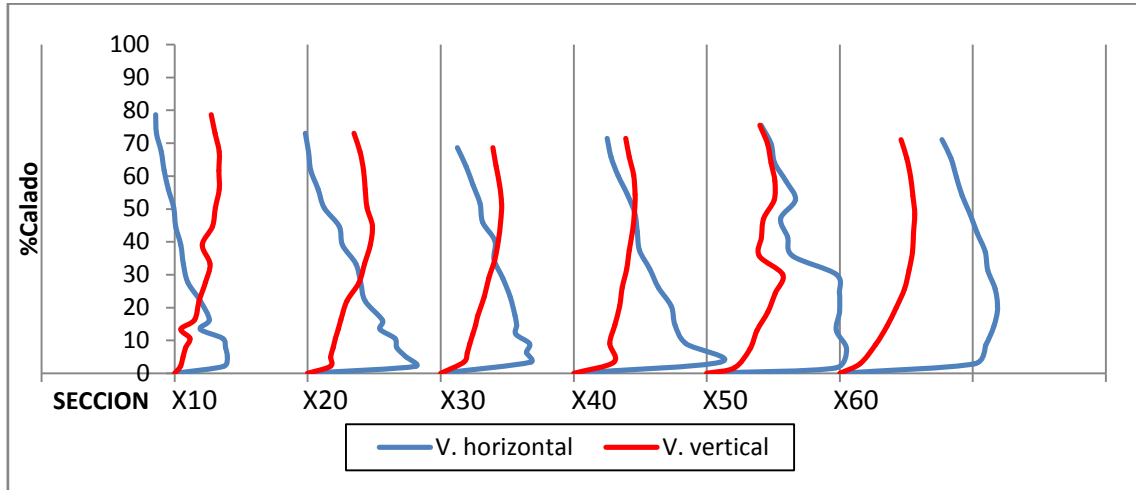


Figura 101: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 30.67 l/s y un colchón de 0.235 m.

Las velocidades horizontales siguen una tendencia decreciente, mientras que las verticales creciente.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección X=60, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

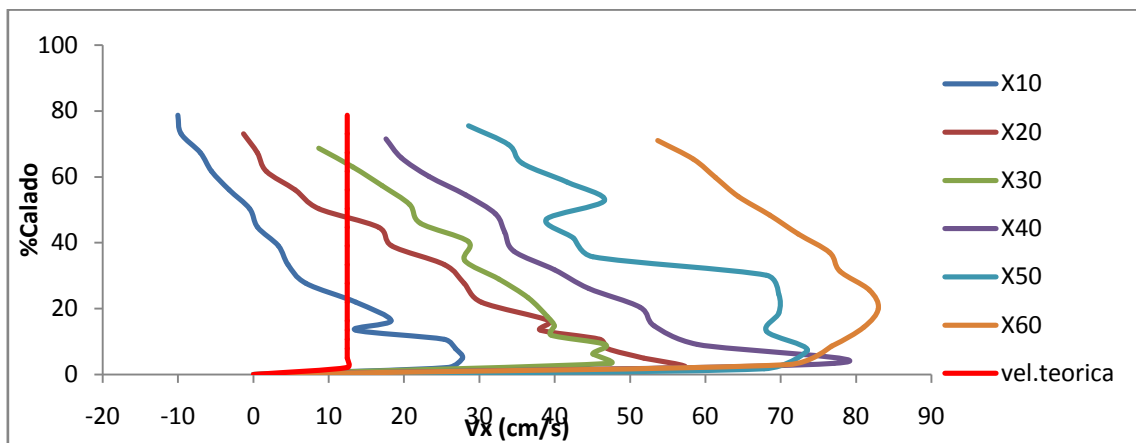


Figura 102: Velocidades horizontales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.235$ m.

En el perfil de velocidades horizontales se aprecia como alcanza las velocidades máximas en los puntos más próximos a la solera y siguen una tendencia decreciente hasta alcanzar el mínimo en el calado más próximo a la superficie, también aumenta a mayor distancia del chorro, dándose el valor más alto en la sección X=60 (82.96cm/s).

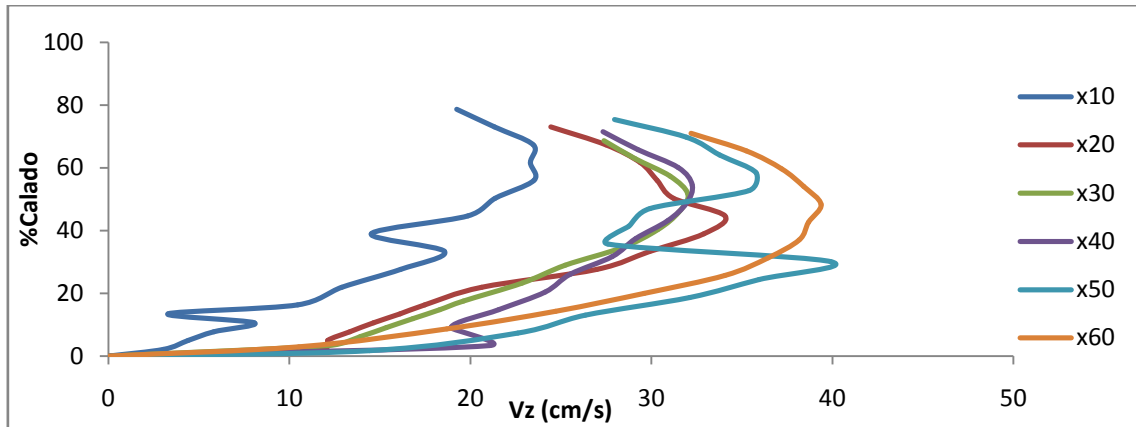


Figura 103: Velocidades verticales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.235$ m.

En las velocidades verticales medias se puede observar una tendencia creciente hasta aproximadamente el 60% de calado, donde vuelve a disminuir. A mayor distancia del chorro, mayores valores de velocidad vertical.

-Colchón = 0.32 m.

A continuación se representa de forma esquemática los valores de velocidad horizontal y vertical medias para un colchón de 0.32 m formado por 3 barreras.

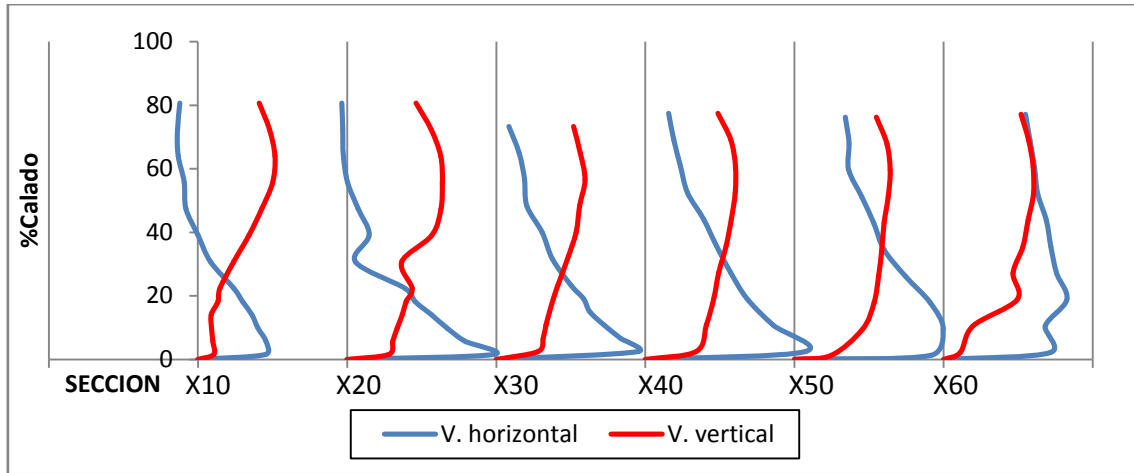


Figura 104: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 30.67 l/s y un colchón de 0.32 m.

Las velocidades horizontales al igual que en el colchón anterior siguen una tendencia decreciente, siendo más suaves en las secciones más alejadas del chorro. Las velocidades verticales son crecientes y constantes a lo largo de las secciones.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección X=60, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

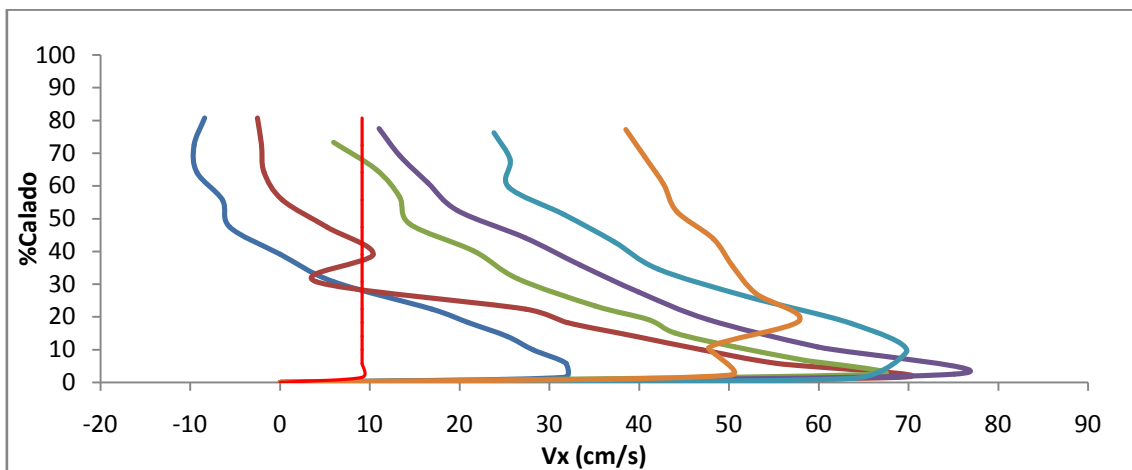


Figura 105: Velocidades horizontales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.32$ m.

En el perfil de velocidades horizontales se observa la tendencia decreciente más detalladamente, los valores más elevados se dan en las secciones intermedias y los valores máximos para las secciones X=40 y X=50 con valores de 75.09 cm/s y 69.81 cm/s.

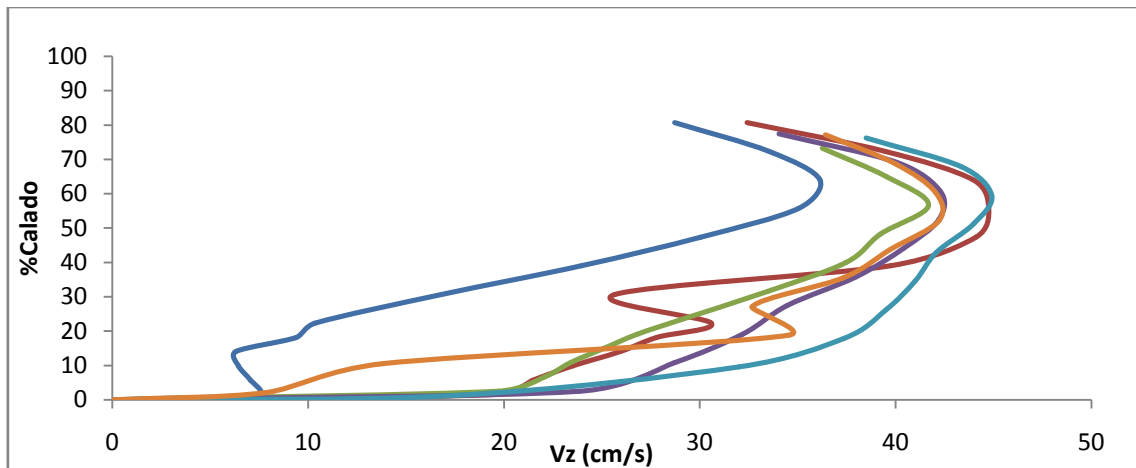


Figura 106: Velocidades verticales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.32$ m.

En el perfil de velocidades verticales se observa una tendencia creciente hasta el 60% del calado y decreciente por encima de este, las velocidades mayores se encuentran en las secciones $X=20$ y $X=50$.

-Colchón = 0.4 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.4 m formado por 4 barreras.

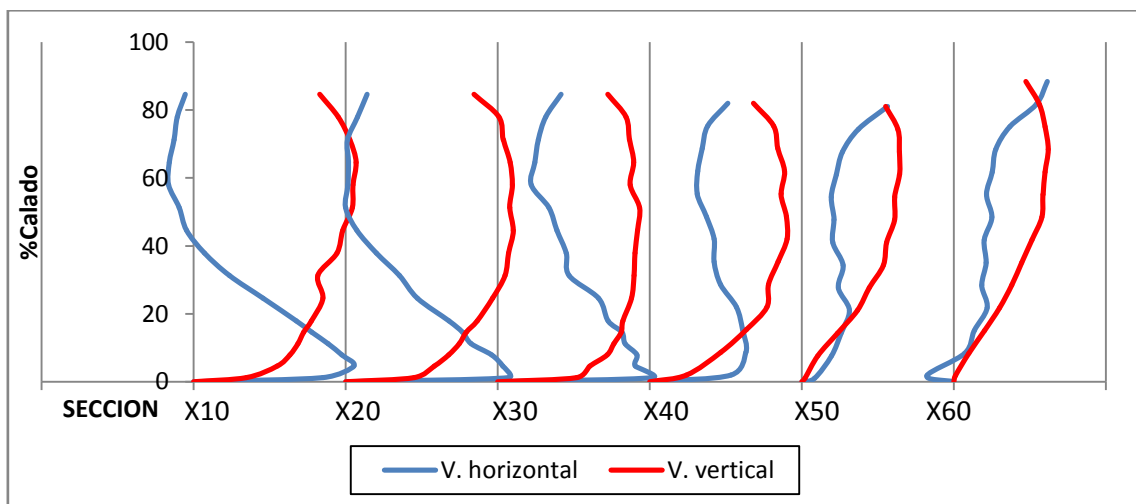


Figura 107: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 30.67 l/s y un colchón de 0.4 m.

Se observa como las velocidades verticales disminuyen conforme nos alejamos del chorro y la curva de las velocidades horizontales se vuelve menos acusada al alejarse del chorro.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección $X=50$, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

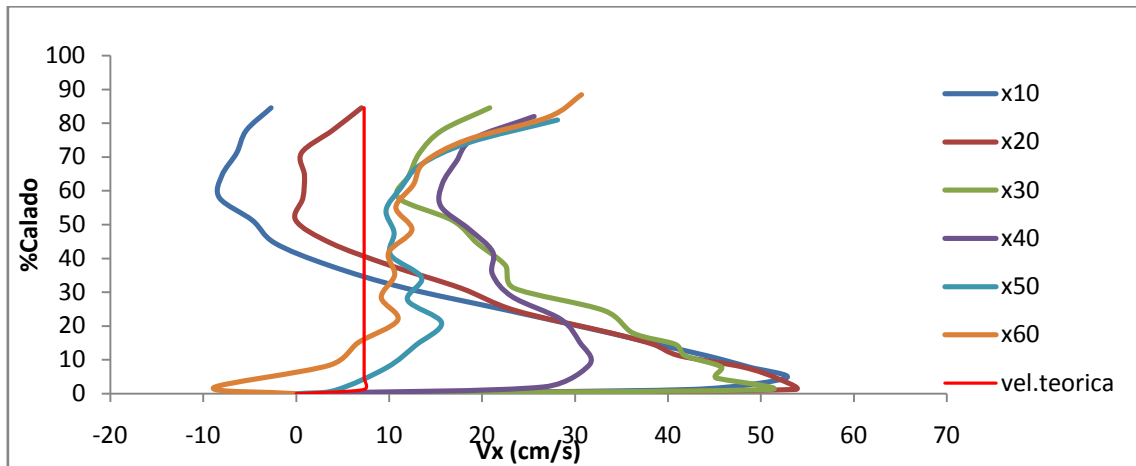


Figura 108: Velocidades horizontales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.4$ m.

Se observa como las velocidades horizontales medias toman los valores máximos cerca de la solera y disminuyen hasta alcanzar el 60% del calado, donde vuelven a aumentar. Los valores máximos se encuentran en las secciones $X=10$, $X=20$ y $X=30$ entre el 0% y el 10% del calado llegando al valor máximo de 53.67 cm/s.

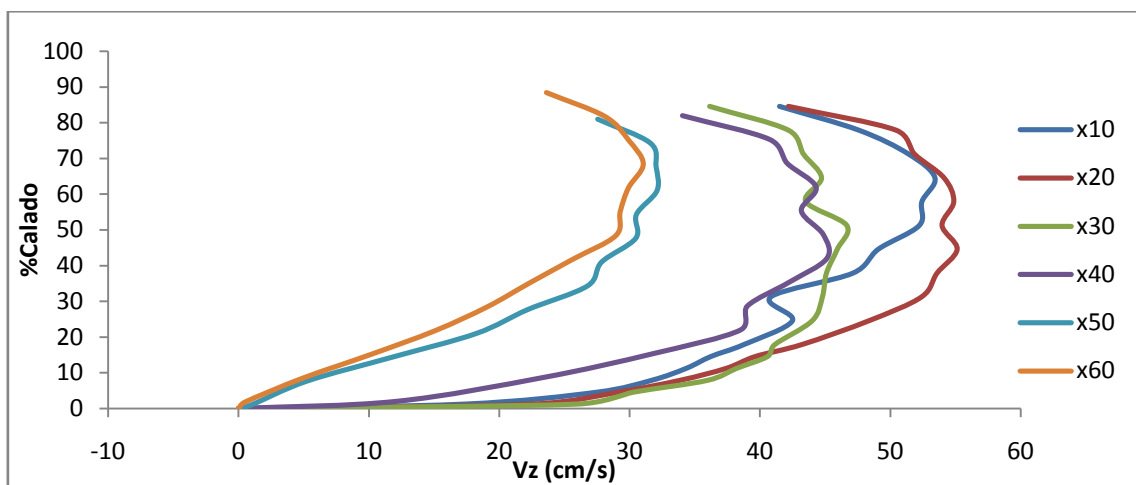


Figura 109: Velocidades verticales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.4$ m.

Las velocidades verticales medias tienen una curva creciente con un punto de inflexión en el 60% de calado volviéndose decreciente. Los valores máximos se encuentran en las secciones más cercanas al chorro y menores en las secciones X=50 y X=60.

-Colchón = 0.485 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias, para un colchón de 0.485 m formado por 5 barreras.

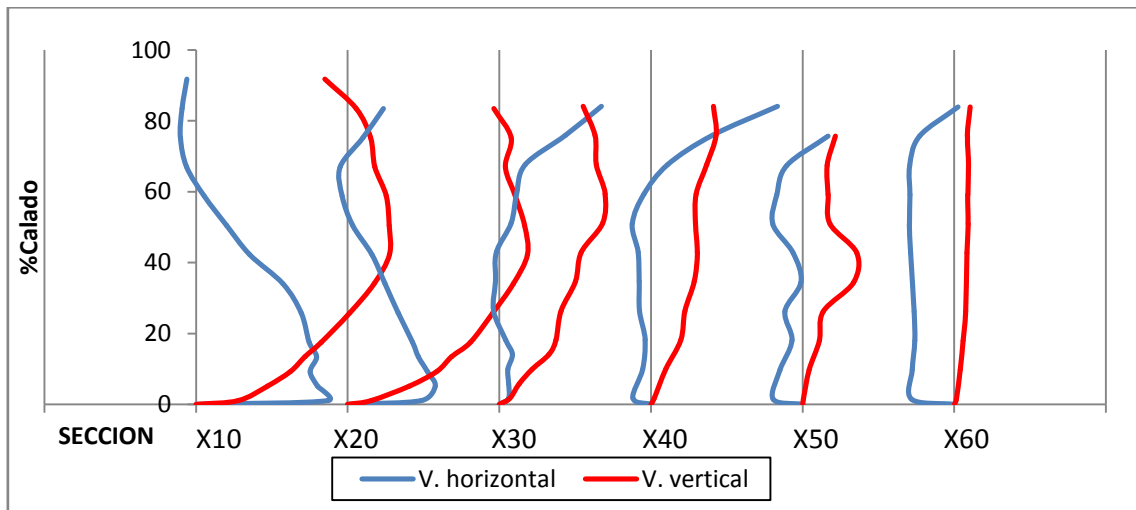


Figura 110: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 30.67 l/s y un colchón de 0.485 m.

Se observa como las velocidades horizontales van disminuyendo conforme nos alejamos del chorro, en las dos primeras secciones se observa un punto de inflexión en el 60% del calado, en las dos últimas secciones son negativas. Las velocidades verticales disminuyen conforme aumenta la distancia del chorro.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección X=30, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

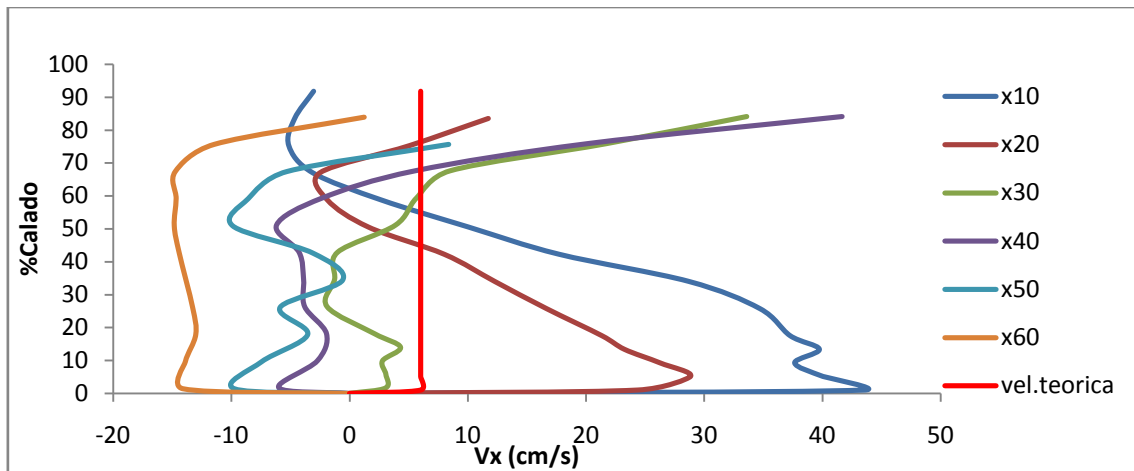


Figura 111: Velocidades horizontales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.485$ m.

En el perfil de velocidades horizontales se puede observar dos tendencias diferentes, una para la curva de las secciones $X=10$ y $X=20$, que toma valores máximos en la zona más cercana a la solera que posteriormente disminuyen, y otra para las secciones restantes, donde se alcanzan valores bajos hasta llegar al 50%-70% del calado donde aumentan hasta alcanzar los valores máximos de velocidad horizontal.

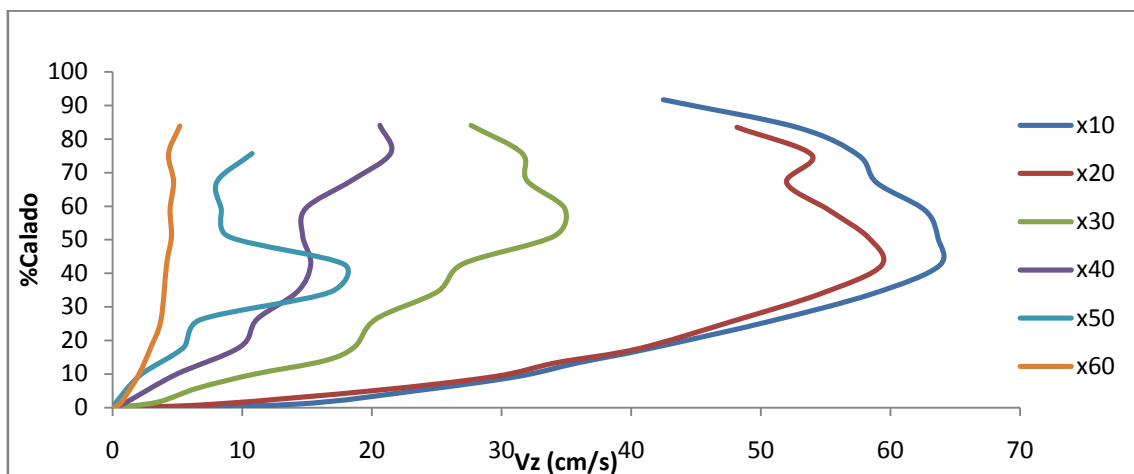


Figura 112: Velocidades verticales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.485$ m.

En el perfil de velocidades verticales se observan curvas crecientes hasta el 50% de calado que cambian a decrecientes, siendo estas curvas más pronunciadas para las secciones más cercanas al chorro, volviéndose más suaves en las zonas más alejadas, hasta llegar a ser casi constante para la sección $X=60$.

-Colchón = 0.565 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales, para un colchón de 0.565 m formado por 6 barreras.

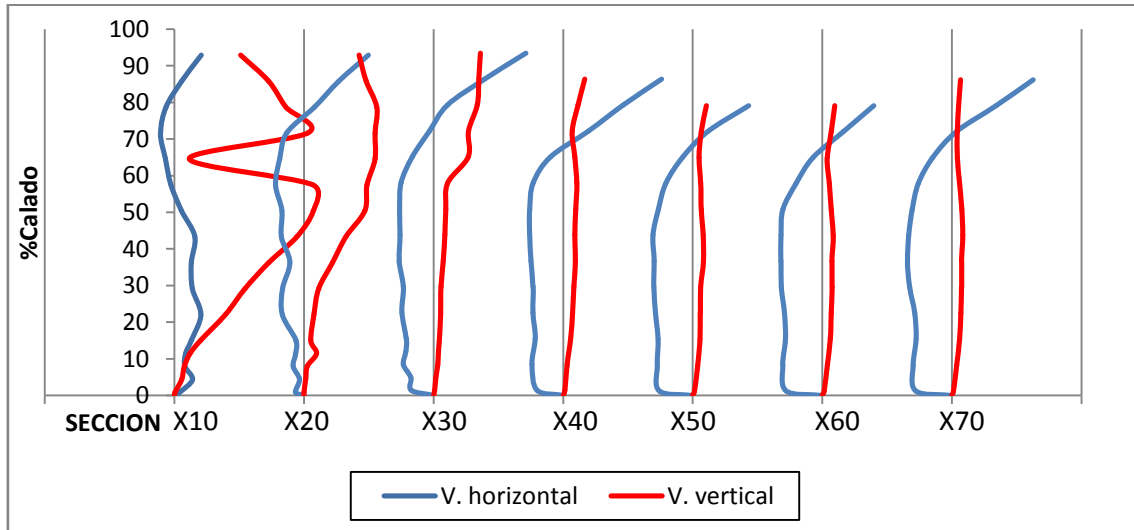


Figura 113: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 30.67 l/s y un colchón de 0.565 m.

Las velocidades horizontales son prácticamente negativas a lo largo de todo el cuenco de amortiguación llegando a ser positivas a partir del 70% del calado.

Las velocidades verticales toman valores grandes para las secciones cercanas al chorro, volviéndose casi nulas en las secciones siguientes formando curvas constantes.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección X=20, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

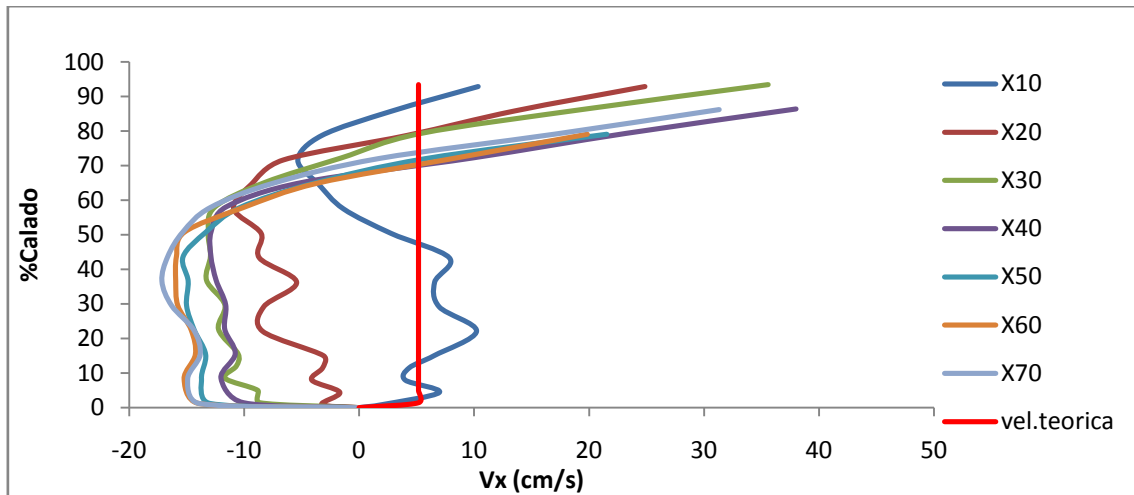


Figura 114: Velocidades horizontales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.565$ m.

Las velocidades horizontales medias son bajas en la zona más próxima a la solera y aumentan en el 50%-60% del calado para llegar a alcanzar las máximas velocidades.

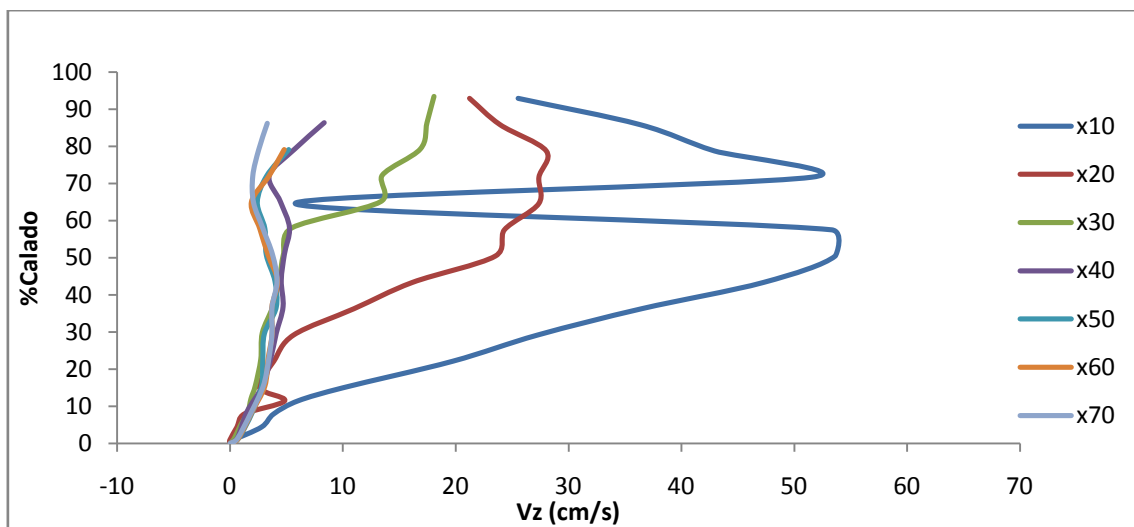


Figura 115: Velocidades verticales medias para $Q=30.67$ l/s e $y=0.565$ m.

La curva formada por las velocidades verticales tiene un aspecto creciente hasta 60% del calado y decreciente en adelante, toma valores mayores en las secciones X=10, X=20, llegando a ser casi constantes para el resto de secciones.

8.3. Caudal de 0.04531 m³/s.

A continuación se realiza el mismo procedimiento para un caudal de 45.31 l/s (0.04531 m³/s).

-Colchón = 0.15 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias, para un colchón de 0.15 m formado por 1 barrera.

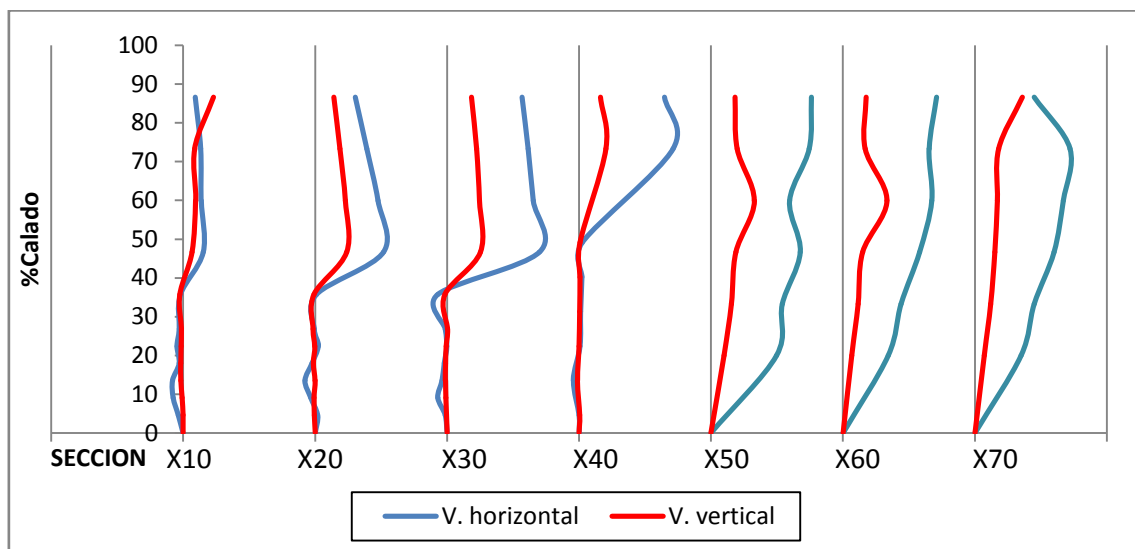


Figura 116: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias para un caudal de 45.31 l/s y un colchón de 0.15 m.

Las velocidades verticales y horizontales tienen una tendencia parecida, siendo en el caso de las horizontales curvas más pronunciadas.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección X=30, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

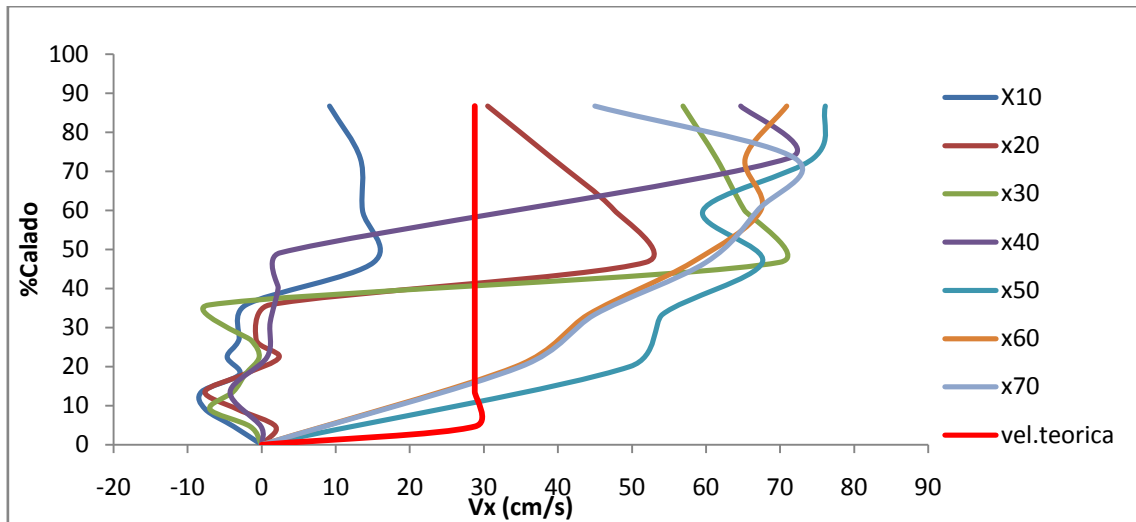


Figura 117: Velocidades horizontales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.15$ m.

En el perfil de velocidades horizontales se observan valores muy pequeños a lo largo de las 4 primeras secciones, tomando valores negativos en la parte más cercana a la solera.

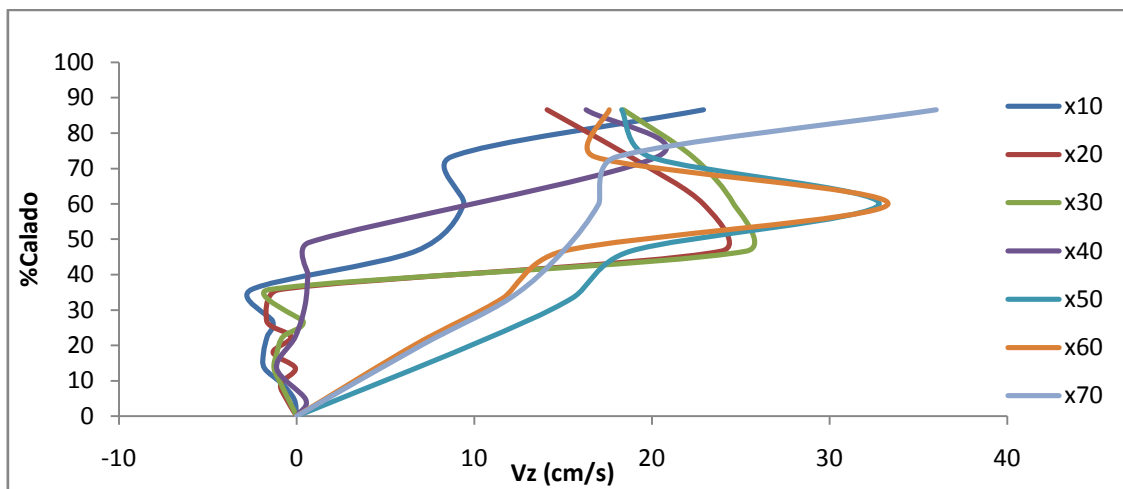


Figura 118: Velocidades verticales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.15$ m.

En el perfil de las velocidades verticales sigue la misma dinámica, valores pequeños negativos y forma irregular.

-Colchón = 0.25 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.25 m formado por 2 barreras.

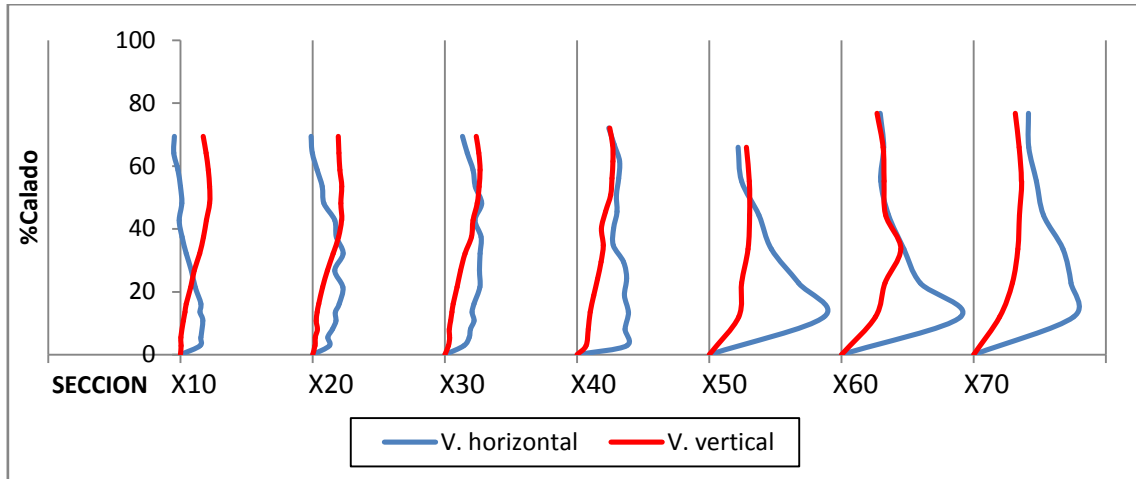


Figura 119: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para en un caudal de 45.31 l/s y un colchón de 0.25 m.

Las velocidades horizontales toman valores mayores al alejarse del impacto del chorro, mientras que las velocidades verticales mantienen la misma forma y magnitud.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección $X=40$, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

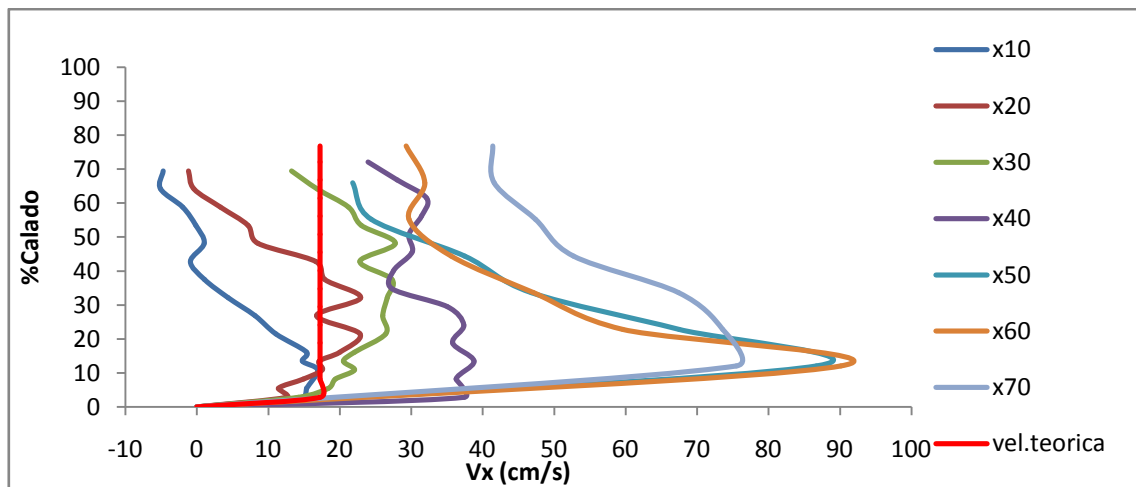


Figura 120: Velocidades horizontales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.25$ m.

Se observa una tendencia decreciente en la curva de velocidades horizontales que alcanza valores mayores en las secciones más alejadas, encontrándose en la sección X=40 las velocidades mayores.

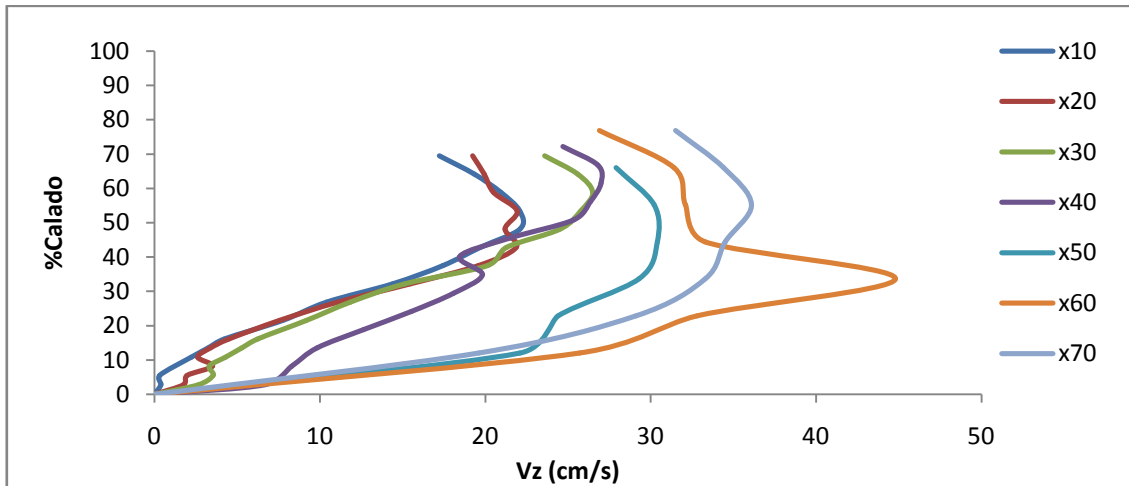


Figura 121: Velocidades verticales medias para las secciones $Q=45.31$ l/s e $y=0.25$ m.

Para las velocidades verticales se forma una curva creciente con un punto de inflexión en el 50%-60% del calado, la curva se mantiene constante a lo largo del cuenco, alcanzando valores mayores en las secciones más alejadas del chorro (X=30, X=30).

-Colchón = 0.335 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.335 m formado por 3 barreras.

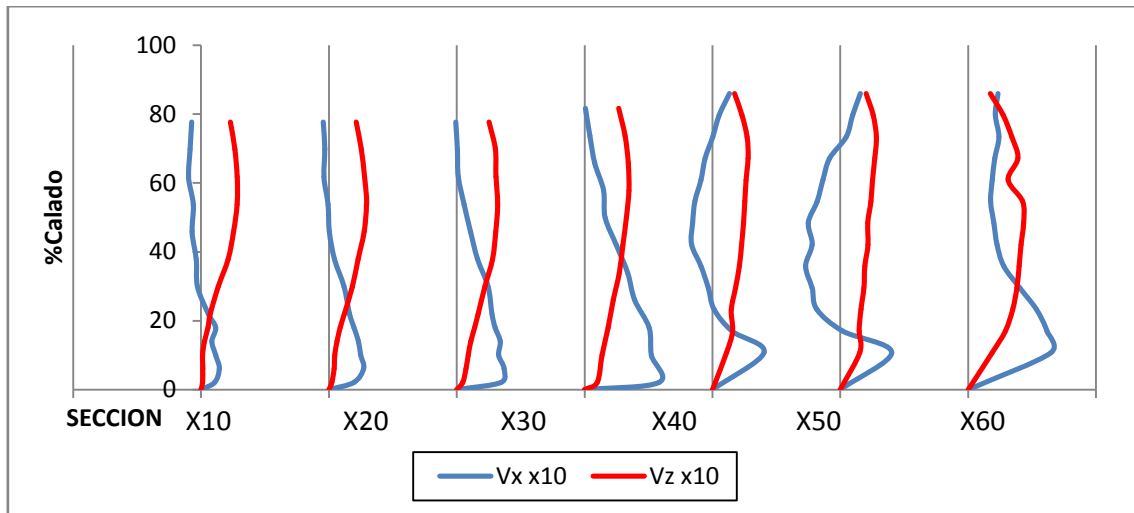


Figura 122: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 45.31 l/s y un colchón de 0.335 m.

Se observa como las velocidades horizontales forman una curva decreciente que se va pronunciando al aumentar la distancia, mientras que las velocidades verticales tienen tendencia a aumentar con el calado y con la distancia al chorro.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección $X=70$, ya que al no apreciarse una sección donde no se produzcan cambios en la velocidad máxima se sitúa en la sección más lejana medida.

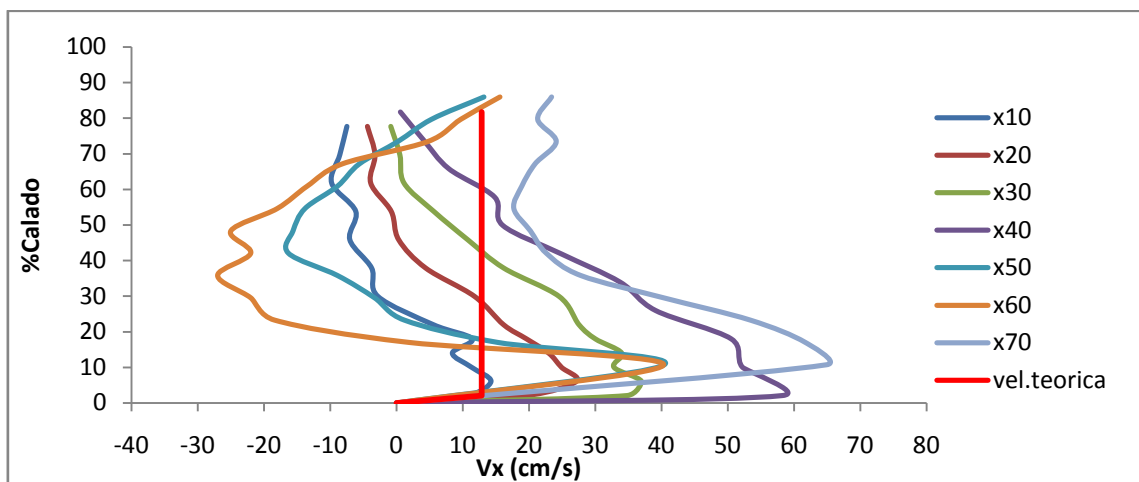


Figura 123: Velocidades horizontales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.335$ m.

Las velocidades horizontales medias tienen forma decreciente, disminuyen su valor al aumentar su porcentaje de calado también aumenta su valor al distanciarse del chorro,

los valores máximos se encuentran en la sección X=40 cercanos a la solera (58.21 cm/s).

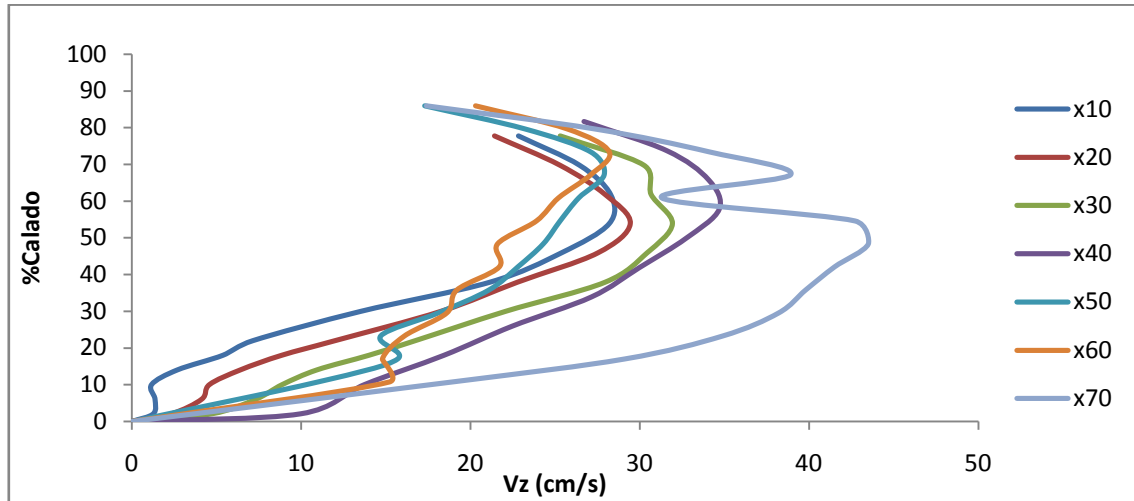


Figura 124: Velocidades verticales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.335$ m.

Las velocidades verticales medias siguen todas la misma tendencia creciente con un punto de inflexión en el 60% del calado, para todas las secciones tienen todas la misma forma alcanzando valores más elevados en secciones más alejadas del chorro.

-Colchón = 0.43 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias, para un colchón de 0.43m formado por 4 barreras.

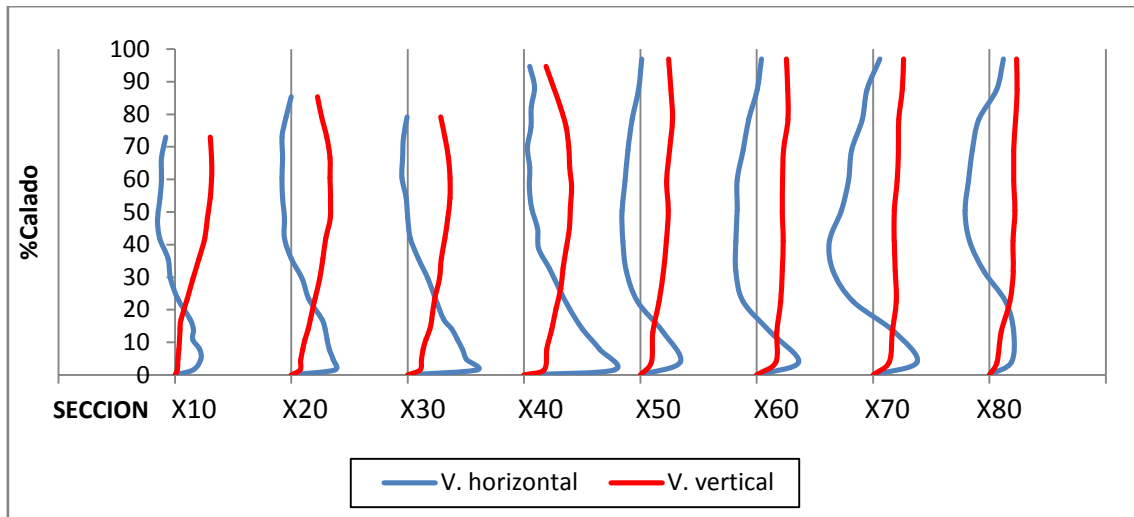


Figura 125: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 45.31 l/s y un colchón de 0.43 m.

Las velocidades verticales y horizontales van aumentando al alejarse del impacto del chorro, en el caso de las velocidades horizontales los valores máximos están cercanos a la solera, mientras que en las velocidades verticales están en la zona superior.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección 80, ya que al no apreciarse una sección donde no se produzcan cambios en la velocidad máxima se sitúa en la sección más lejana medida.

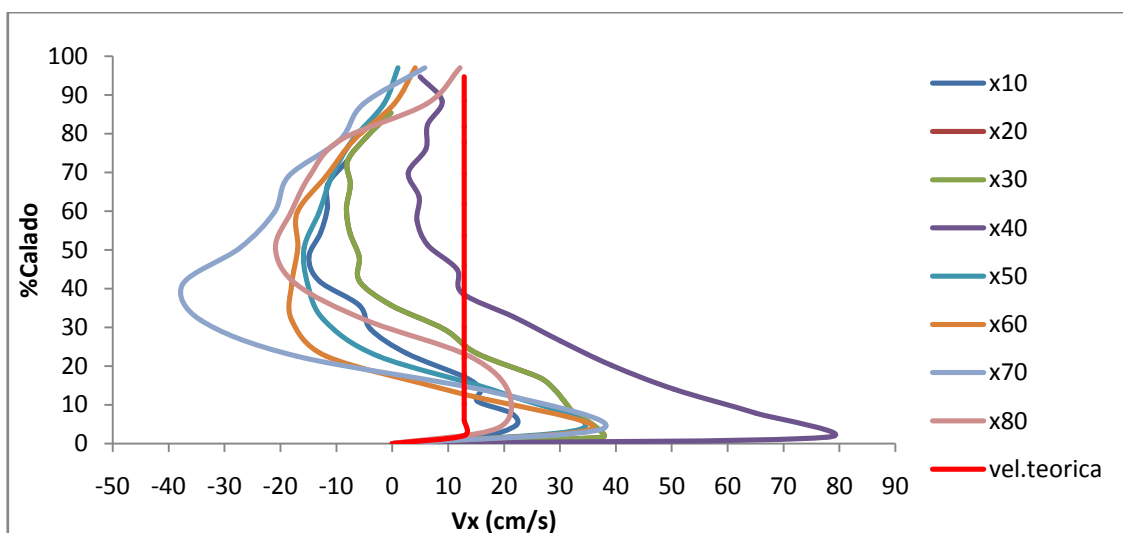


Figura 126: Velocidades horizontales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.43$ m.

El perfil de velocidades horizontales muestra una forma en S, tomando los valores máximos cerca de la solera y disminuyendo a medida que se aumenta el calado. Al alejarse del chorro incidente los valores de velocidad aumentan, tomando los valores máximos para la sección X=40, 77.76 cm/s para un calado del 1.63%.

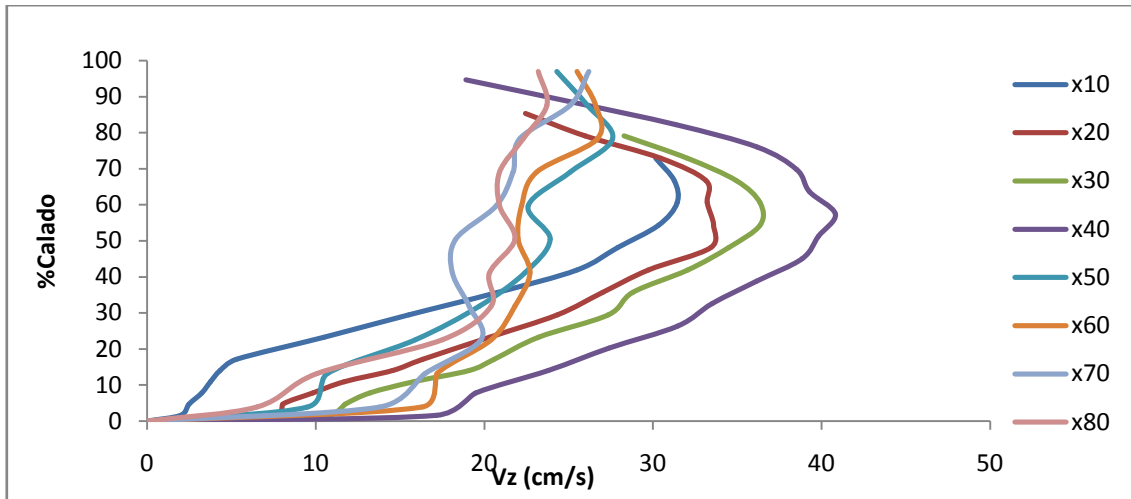


Figura 127: Velocidades verticales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.43$ m.

La forma de la curva de velocidades verticales se mantiene constante a lo largo del cuenco amortiguador, aumentando los valores a medida que alejamos del chorro.

-Colchón = 0.52 m.

A continuación se muestra de forma esquemática la distribución de las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.52 m formado por 5 barreras.

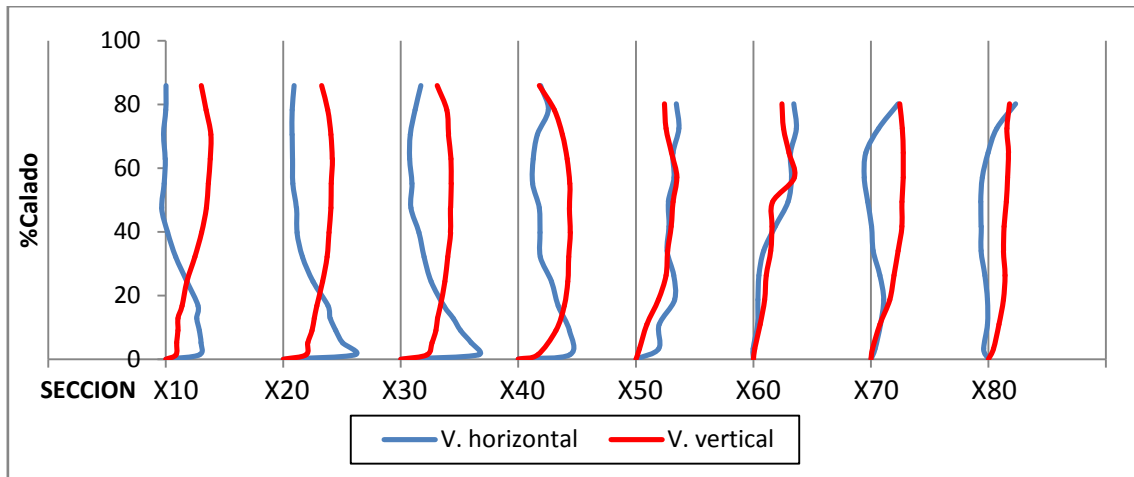


Figura 128: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 45.31 l/s y un colchón de 0.52 m.

Las velocidades horizontales y verticales aumentan con la distancia al chorro, en el caso de las horizontales, su curva tiene forma decreciente, sus valores máximos se encuentran cercanos a la solera. En el caso de las velocidades verticales, tienen forma creciente hasta el 20% del calado, forma continua hasta el 70% del calado y forma decreciente el resto del calado.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección $X=50$, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

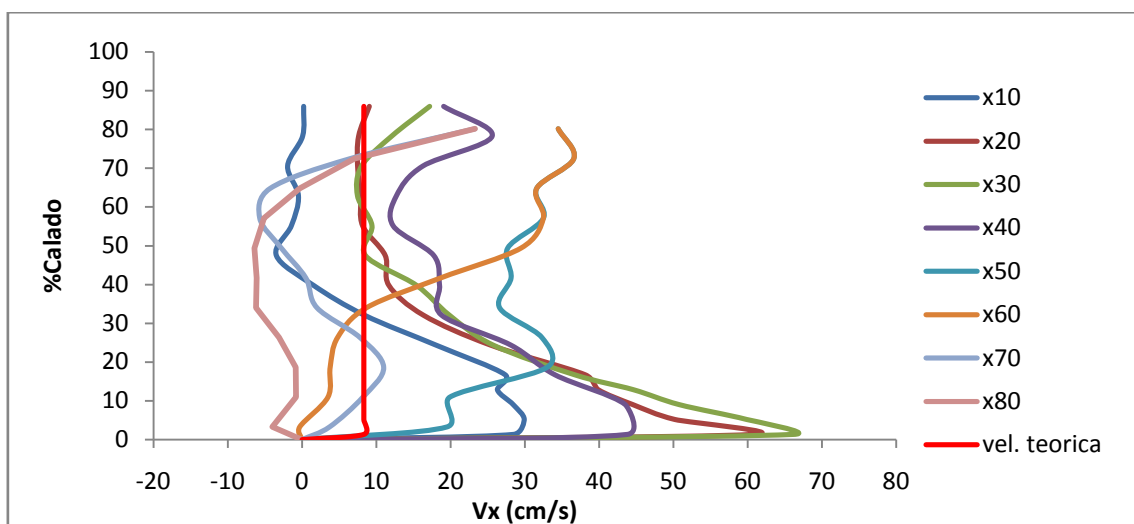


Figura 129: Velocidades horizontales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.52$ m.

En el caso de las velocidades horizontales la curva forma una S que se desplaza a la derecha a medida que nos alejamos del chorro, las velocidades mayores se encuentran en la zona cercana a la solera hasta el 20% del calado.

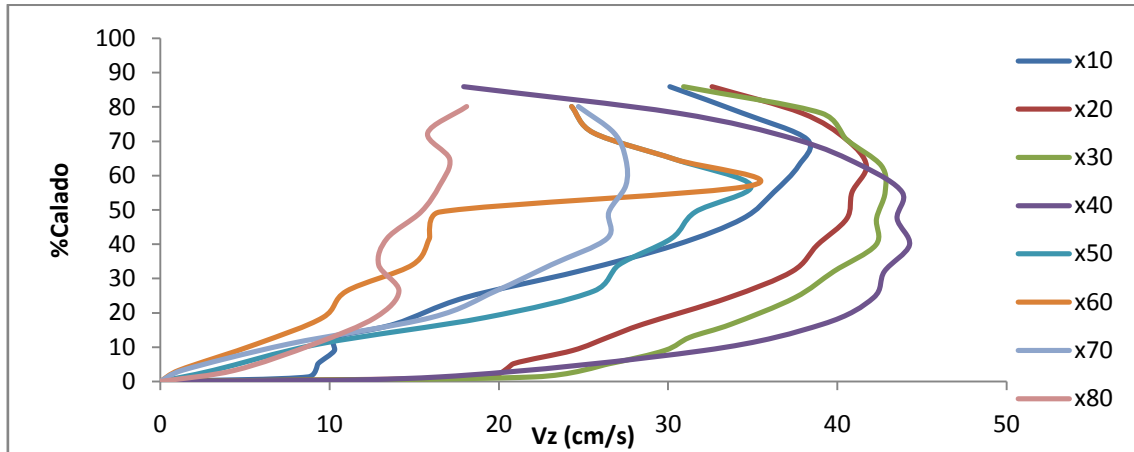


Figura 130: Velocidades verticales medias para $Q=45.31 \text{ m}^3/\text{s}$ e $y=0.52 \text{ m}$.

Las velocidades verticales aumentan a medida que nos acercamos a la superficie del colchón, hasta que cerca del 60% del calado vuelven a disminuir.

-Colchón = 0.597 m.

A continuación se muestra de forma esquemática las velocidades verticales y horizontales medias para un colchón de 0.597 m formado por 6 barreras.

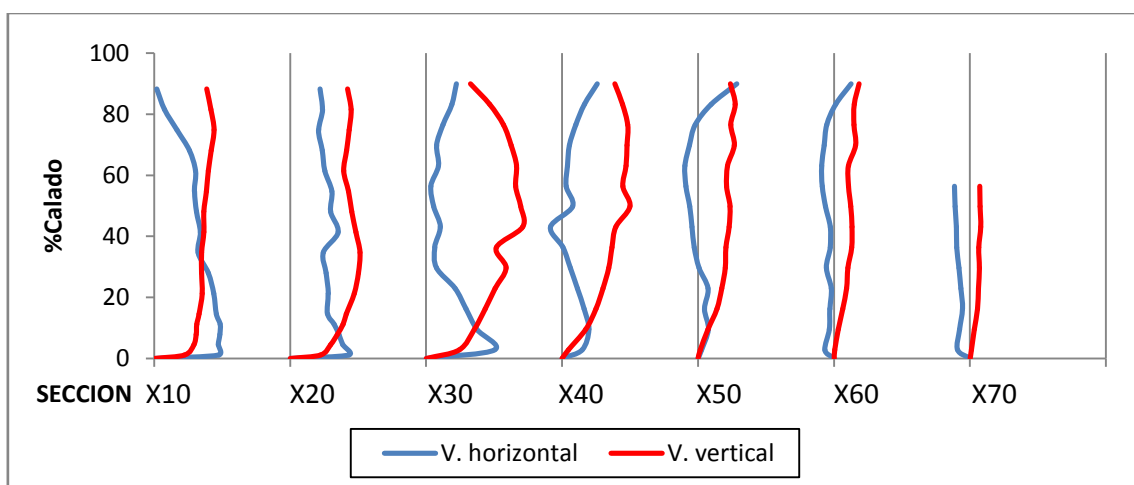


Figura 131: Secciones de velocidades verticales y horizontales medias, para un caudal de 45.31 l/s y un colchón 0.596 m .

Las velocidades horizontales al igual que en los casos anteriores toman valores altos en la zona más cercana a la solera y disminuyen al ascender al contrario que en las velocidades verticales.

La longitud del resalto L_j se ha fijado en la sección $X=50$, ya que se aprecia que no hay variaciones en la velocidad máxima.

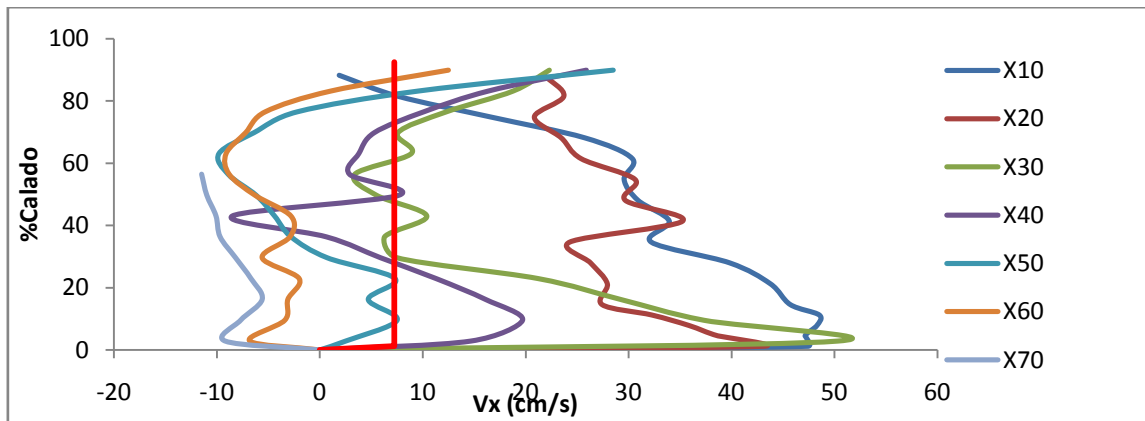


Figura 132: Velocidades horizontales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.596$ m.

En las velocidades horizontales medias se observa que las curvas tienen la misma forma, en el caso de la sección $X=10$ la curva toma una forma más pronunciada alcanzando valores mayores en la zona cercana a la solera y los menores valores en la zona más alejada, mientras que en la sección $X=20$ se mantiene más constante al igual que en las demás secciones.

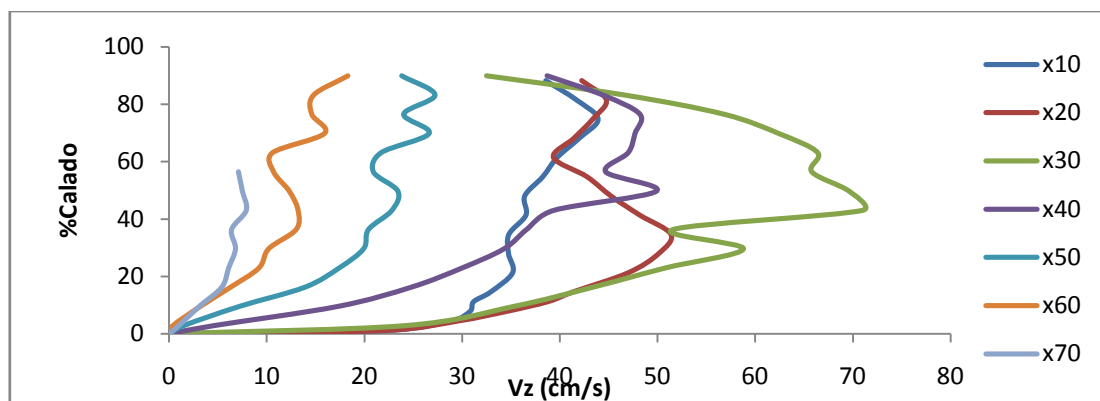


Figura 133: Velocidades verticales medias para $Q=45.31$ l/s e $y=0.596$ m.

Las velocidades verticales medias aumentan su valor al alejarse de la solera, llegando a alcanzar velocidades mayores en la sección más alejada entre el 30%-40% de calado.

9. LONGITUD EN RESALTO HIDRÁULICO SUMERGIDO

Considerando y_0 como el calado contraído e y_3 como la profundidad al comienzo del resalto sumergido; se formaron diferentes resaltos sumergidos para observar las condiciones de flujo y medir el perfil superficial y los campos de velocidad.

Como en el caso de los resaltos libres, el final del resalto sumergido ($x=L_{sj}$) se determina como la primera sección donde casi no existe una variación de la velocidad máxima del flujo. Así, L_{sj} es la longitud del resalto, siendo y_4 la profundidad del agua donde $x=L_{sj}$ (figura 134).

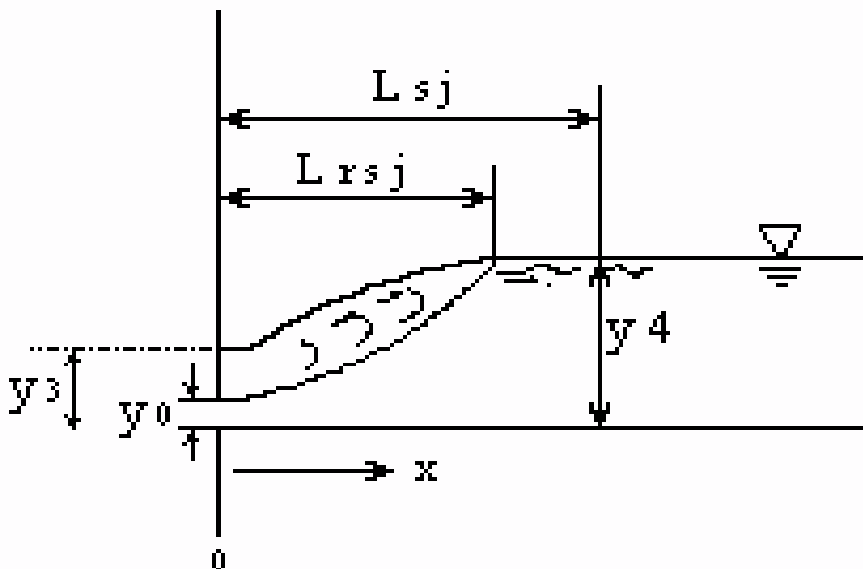


Figura 134: Definición esquemática para el resalto sumergido (Márquez, 2006).

La sección donde $x=L_{sj}$ es la primera en la que la superficie del agua llega a estar nivelada y ya no se aprecia una alteración del flujo en la superficie.

La sección donde todavía se observa un flujo alterado en la superficie se define como final del rulo ($x=L_{rsj}$), siendo L_{rsj} la longitud del rulo. Cuando la inclinación de la superficie es pequeña, L_{rsj} y L_{sj} llegan a ser casi lo mismo, mientras que la diferencia entre L_{rsj} y L_{sj} llega a ser más grande cuando la inclinación de la superficie se incrementa.

y_2 es el calado conjugado en el caso de resaltos hidráulicos libres. Se obtiene mediante la ecuación de Bélanger de los calados conjugados.

La línea de ajuste expresada en la ecuación 27 para resaltos sumergidos corresponde a los resultados experimentales obtenidos por Ohtsu et al. (1990):

$$\frac{L_{sj}}{y_2} = \left(5 \frac{y_4}{y_2} \right) + 0.9 \quad 27$$

A partir de la ecuación 27, se puede obtener la ecuación 28 para el caso $y_4/y_2=1$:

$$L_{sj} = 5.9y_2 \quad 28$$

De esta manera, Ohtsu hace coincidir en su ajuste este valor para el caso de resalto libre. Aunque el coeficiente 5.9 es válido para un rango de números de Froude de $[6 \leq F_1 \leq 11]$, se emplea un coeficiente más bajo (del orden 5.4) para los números de Froude $[2.5 \leq F_1 \leq 5]$.

La curva de ajuste expresada mediante la ecuación 29 constituye el ajuste a los resultados experimentales obtenidos por Márquez (2006) en un canal de laboratorio:

$$\frac{L_{sj}}{y_2} = \left(7.44 \frac{y_4}{y_2} \right) - 3.04 \quad 29$$

A partir de la ecuación 29 se puede establecer que para el caso del resalto libre ($y_4/y_2=1$), la relación viene expresada por la ecuación 30:

$$L_j = 4.4y_2 \quad 30$$

De acuerdo con los resultados de la ecuación 30 se observa que la longitud L_{sjc} , es inferior que el correspondiente valor para resalto libre del Bureau of Reclamation, expresado mediante la ecuación 31:

$$L_j = 6.1y_2 \quad 31$$

Silvester (1964) propone la siguiente expresión para el cálculo de los resaltos hidráulicos:

$$\frac{L_j}{y_0} = 9.5(F_0 - 1)^{1.01} \quad 32$$

Rao y Rajaratnam (1963) también proponen una ecuación experimental para L_{sj} :

$$\frac{L_{sj}}{y_2} = 4.9S + 6.1 \quad 33$$

Donde $S = (y_4 - y_2)/y_2 = y_4/y_2 - 1$ es el valor de sumergencia del resalto.

En las tablas 14, 15 y 16 se muestran la longitud L_j de los resaltos hidráulicos calculados por los métodos anteriores:

Y0	Y3	V0	F0	y2	Y4	V4	y4/y2	Ohtsu		Marquez		Silvester	Rajarat.	Bureau	observ.
								Lj	Lj/y2	Lj	Lj/y2	Lj	Lj	Lj	Lj
0.0150	0.1150	1.2349	3.2193	0.0612	0.1250	0.1482	2.0424	0.6801	11.1121	0.7439	12.1556	0.3188	0.6859	0.3733	0.4
0.0150	0.1950	1.2349	3.2193	0.0612	0.2000	0.0926	3.2679	1.0551	17.2394	1.3019	21.2730	0.3188	1.0534	0.3733	0.4
0.0150	0.3080	1.2349	3.2193	0.0612	0.3130	0.0592	5.1142	1.6201	26.4711	2.1427	35.0098	0.3188	1.6071	0.3733	0.4
0.0150	0.3900	1.2349	3.2193	0.0612	0.3875	0.0478	6.3315	1.9926	32.5575	2.6969	44.0664	0.3188	1.9722	0.3733	0.4
0.0150	0.4700	1.2349	3.2193	0.0612	0.4670	0.0397	7.6305	2.3901	39.0524	3.2884	53.7308	0.3188	2.3617	0.3733	0.3
0.0150	0.5650	1.2349	3.2193	0.0612	0.5550	0.0334	9.0684	2.8301	46.2418	3.9431	64.4285	0.3188	2.7929	0.3733	0.3

Tabla 14: Longitudes de resaltos hidráulicos para $Q=19.45$ l/s.

Y0	Y3	V0	F0	y2	Y4	V4	y4/y2	Ohtsu		Marquez		Silvester	Rajarat.	Bureau	observ.
								Lj	Lj/y2	Lj	Lj/y2	Lj	Lj	Lj	Lj
0.0200	0.1225	1.4605	3.2972	0.0838	0.1050	0.2782	1.2531	0.6004	7.1654	0.5265	6.2829	0.4401	0.6151	0.5111	0.6
0.0200	0.2250	1.4605	3.2972	0.0838	0.2335	0.1251	2.7866	1.2429	14.8331	1.4825	17.6924	0.4401	1.2447	0.5111	0.6
0.0200	0.3300	1.4605	3.2972	0.0838	0.3250	0.0899	3.8786	1.7004	20.2929	2.1633	25.8167	0.4401	1.6931	0.5111	0.6
0.0200	0.4250	1.4605	3.2972	0.0838	0.4150	0.0704	4.9527	2.1504	25.6633	2.8329	33.8078	0.4401	2.1341	0.5111	0.5
0.0200	0.5000	1.4605	3.2972	0.0838	0.4900	0.0596	5.8477	2.5254	30.1386	3.3909	40.4670	0.4401	2.5016	0.5111	0.3
0.0200	0.5870	1.4605	3.2972	0.0838	0.5800	0.0504	6.9218	2.9754	35.5089	4.0605	48.4581	0.4401	2.9426	0.5111	0.2

Tabla 15: Longitudes de resaltos hidráulicos para $Q=30.67$ l/s.

								Ohtsu	Marquez		Silvester	Rajarat.	Bureau	observ.	
Y0	Y3	V0	F0	y2	Y4	V4	y4/y2	Lj	Lj/y2	Lj	Lj/y2	Lj	Lj	Lj	Lj
0.0230	0.0800	1.8762	3.9498	0.1175	0.1200	0.3596	1.0214	0.7057	6.0068	0.5356	4.5590	0.6515	0.729	0.7167	0.3
0.0230	0.2325	1.8762	3.9498	0.1175	0.2550	0.1692	2.1704	1.3807	11.7520	1.5400	13.1078	0.6515	1.3905	0.7167	0.4
0.0230	0.3400	1.8762	3.9498	0.1175	0.3450	0.1251	2.9364	1.8307	15.5822	2.2096	18.8071	0.6515	1.8315	0.7167	0.7
0.0230	0.4550	1.8762	3.9498	0.1175	0.4400	0.0981	3.7450	2.3057	19.6251	2.9164	24.8229	0.6515	2.297	0.7167	0.8
0.0230	0.5450	1.8762	3.9498	0.1175	0.5225	0.0826	4.4472	2.7182	23.1360	3.5302	30.0472	0.6515	2.7012	0.7167	0.5
0.0230	0.6200	1.8762	3.9498	0.1175	0.6000	0.0719	5.1068	3.1057	26.4342	4.1068	34.9549	0.6515	3.081	0.7167	0.5

Tabla 16: Longitudes de resaltos hidráulicos para $Q=45.31$ l/s.

Comparando los resultados obtenidos con las gráficas de perfiles longitudinales del apartado 8, se puede observar que el método de Ohtsu (ecuación 27), el método ajustado por Márquez (ecuación 29) y el método de Rao y Rajaratnam (ecuación 33) dan valores mayores a los reales debido a que la relación de calados y_4/y_2 son elevadas, mientras que los métodos de Silvester (ecuación 32) y Bureau of Reclamation (ecuación 31) se ajustan mejor.

10. CAMPOS DE VELOCIDAD MEDIA EN LOS RESALTOS HIDRAULICOS.

Desde el punto de vista del diseño de disipadores de energía hidráulica, es importante conocer que las condiciones para el desarrollo de la capa límite cambian con el número de Froude al comienzo del resalto hidráulico libre, modificándose las velocidades dentro del mismo.

Rajaratnam (1965) realizó una investigación del campo de velocidades en el resalto considerando el resalto libre como chorro de pared. Sin embargo, 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 suponer que el resalto actúa como un chorro de pared, sin tener en cuenta el efecto de la superficie libre. Considerando el efecto que el desarrollo de la capa límite tiene en las condiciones del flujo del resalto, Leutheusser y Kartha (1972), y Wilson y Turner (1972) realizaron diferentes experimentos. Sin embargo, la precisión de los instrumentos de medida podrían haber perturbado en algún grado las medidas debido a los pequeños valores medidos de los calados contraídos.

Examinando la distribución experimental de velocidades medias en varias secciones, se encuentra una distribución de velocidades semejante dentro del rango $0.2 \leq x/L_j \leq 0.7$, independiente de F_1 y x . En la figura 135 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, e $y_{m\acute{a}x}$ es la distancia perpendicular a la solera en la que $\bar{u} = u_m$.

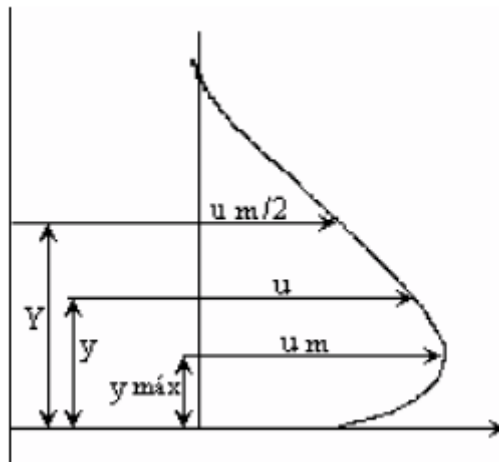


Figura 135: Definición esquemática de Y e $y_{m\acute{a}x}$ (Márquez, 2006).

Esta distribución de velocidad se expresa por una ley potencial (ecuación 34) y una ley exponencial (ecuación 35):

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \left\{ \frac{1}{k} \left(\frac{y}{Y} \right) \right\}^{\frac{1}{n}}, \quad 0 \leq \frac{y}{Y} \leq k \quad 34$$

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{1.177}{1-k} \left(\frac{y}{Y} - k \right) \right\}^2 \right], \quad k \leq \frac{y}{Y} \leq 1.5 \quad 35$$

donde $k = y_{max}/Y$

En la tabla 17 se recogen los coeficientes k y n correspondientes a las ecuaciones 34 y 35, obtenidos en diferentes situaciones por Ohtsu et al. y por Márquez:

Distribución de Velocidad	k	n
Resalto libre y sumergido (Márquez, 2006) $2.5 \leq F_r \leq 5$ $0.25 \leq x/L_f \leq 0.75$ $4 \leq y_4/y_0 \leq 10$	0.342	9.5
Resalto sumergido (Márquez, 2006) $2.5 \leq F_\theta \leq 5$ $0.25 \leq x/L_f \leq 0.75$	0.302	9.15
Resalto libre (caso “a”) Ohtsu et al. $5 \leq F_1 \leq 7.3$ $0.2 \leq x/L_f \leq 0.7$	0.333	12

Resalto libre (caso “b”) Ohtsu et al. $5 \leq F_1 \leq 7.3$ $0.2 \leq x/L_j \leq 0.7$	0.351	7
--	-------	---

Tabla 17: Coeficientes correspondientes a los ajustes realizados en la distribución de velocidades.

En el caso de los resaltos hidráulicos sumergidos, si la profundidad aguas abajo es lo suficientemente grande y la difusión del chorro no se ve afectada por la superficie libre, la condición de flujo puede ser tratada como un chorro de pared. Si la profundidad aguas abajo disminuye tanto que la difusión del chorro se ve afectada por el remolino superficial, la condición de flujo se define como un resalto sumergido. Las características de velocidad del resalto sumergido se consideran idénticas al caso del resalto libre si la profundidad aguas abajo se acerca a y_2 (profundidad secante de y_0).

Si los datos experimentales obtenidos en el flujo principal son tratados en base a la ecuación 36, se obtiene una ley de similitud para la distribución de velocidades dentro del rango $0.2 < x/L_{sj} < 0.7$, como se explica en la figura 136:

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = f\left(\frac{y}{Y}\right) \quad 36$$

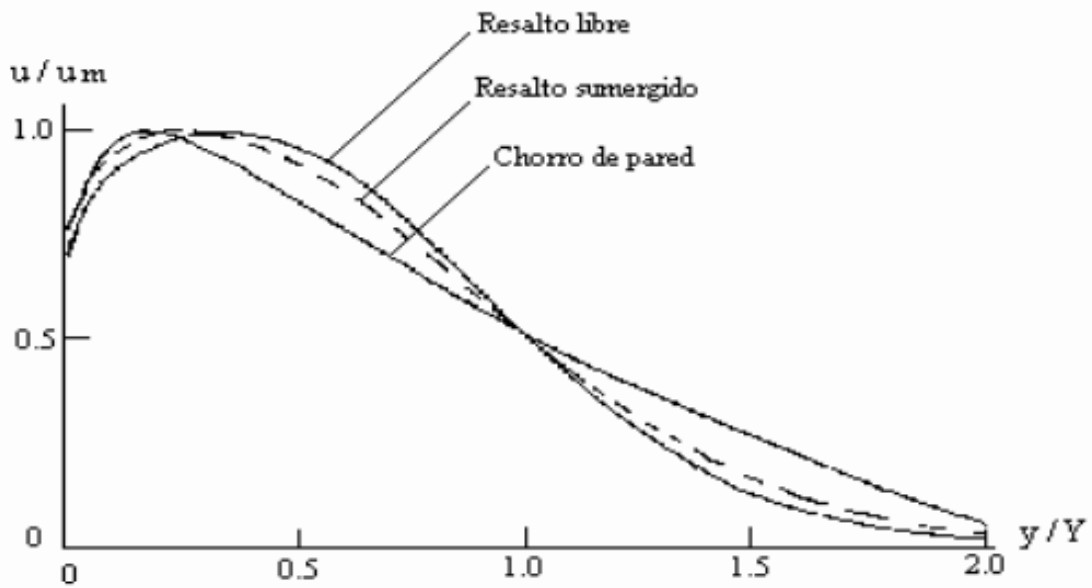


Figura 136: Ley de similitud para la distribución de velocidades (diagrama aclaratorio) (Márquez, 2006).

Los datos experimentales pueden ser explicados por la ecuación 37, si la relación y_4/y_0 es grande, y por la ecuación del resalto libre si $y_4/y_0 \rightarrow y_2/y_0$.

$$\frac{\bar{u}}{u_m} = 1.48\eta^{1/7}[1 - \text{erf}(0.68\eta)] \quad 37$$

Dónde:

Y es la distancia perpendicular a la solera, en la que $\bar{u} = u_m/2$.

$$\eta = y/Y$$

La función error erf es la función primitiva de la distribución de gauss o normal:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad 38$$

En la figura 137 se representan los resultados obtenidos para los resaltos hidráulicos sumergidos junto con las leyes teóricas propuestas por Ohtsu y la universal y de resaltos sumergidos de Márquez (2006).

Algunos datos medidos en la zona cercana a la superficie del colchón se han eliminado por presentar valores anómalos.

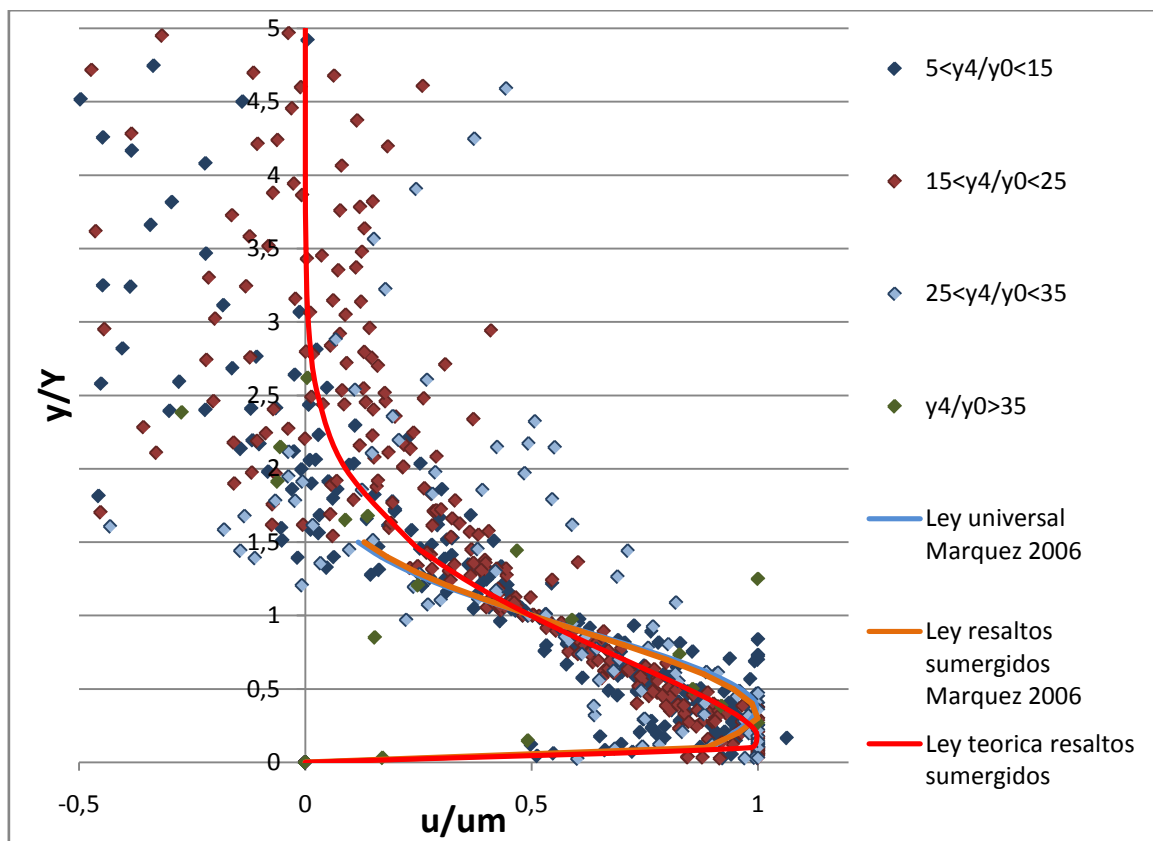


Figura 137: Distribución de velocidades en resaltos sumergidos.

Se observa que al aumentar la relación y_4/y_0 los datos se alejan de la ley teórica para resaltos sumergidos.

En nuestro caso, los resultados se muestran más dispersos, las leyes teóricas propuestas por Ohtsu y ajustada por Márquez (2006) no se ajustan adecuadamente. La ley teórica de resaltos sumergidos de la ecuación 37 se ajusta mejor a los datos observados.

11. PERDIDA DE ENERGÍA EN RESALTOS HIDRÁULICOS SUMERGIDOS

Se considera la ecuación de la energía del flujo medio para la zona de resalto ($0 \leq x \leq L_j$). En este caso, los términos de tensión viscosa media y los efectos de la tensión de Reynolds en el volumen de control no se tienen en cuenta, por lo que se obtiene:

$$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \lambda_1 y_1 = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \lambda_2 y_2 + \left[-\frac{1}{\gamma q} \int_{(D)} \{ \rho(\bar{u}'^2 - \bar{v}'^2) \frac{d\bar{u}}{dx} + \rho \bar{u}'' \left(\frac{d\bar{u}}{dy} + \frac{d}{dx} \right) \} dw \right] \quad 39$$

Donde:

q es el caudal unitario $q=Q/B$.

ρ es la densidad del agua.

\bar{u} es la velocidad media en el eje x .

\bar{v} es la velocidad media en el eje y .

\bar{u}' es la velocidad media fluctuante en el eje x .

\bar{v}' es la velocidad media fluctuante en el eje y .

α es el coeficiente de energía o de Coriolis.

$dw = (dS dA)$ es el volumen elemental infinitesimal del volumen de control.

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

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

De acuerdo con esto, la ecuación anterior puede ser expresada de esta forma:

$$\frac{v_1^2}{2g} + y_1 = \frac{v_2^2}{2g} + y_2 + \left[-\frac{1}{\gamma q} \int_{(D)}^{L_j} \int_0^{y(x)} \{ \rho (\bar{u}'^2 - '2) \frac{d\bar{u}}{dx} + \rho \bar{u}'' \left(\frac{d\bar{u}}{dy} + \frac{d}{dx} \right) \} dw dx \right] \quad 40$$

Considerando la ecuación de energía para la turbulencia, se obtiene:

$$Prod.Turb. = Disip.Vis. + Convecc.Turb. \quad 41$$

Dónde:

Prod.Turb. = producción turbulenta (tercer término en el lado de la derecha de la ecuación 40). Es la cantidad total de energía transferida desde el flujo medio a la energía turbulenta.

Disip.Vis. = Disipación viscosa.

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

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 se pueden despreciar frente al resto de factores, quedando:

$$H_0 = H_4 + (Disip.Vis. + Convecc.Turb.) \quad 42$$

$$100(\%) = \left[\frac{Disip.Vis.}{H_0 - H_4} + \frac{Convecc.Turb.}{H_0 - H_4} \right] x 100(\%) \quad 43$$

Donde:

$$H_0 = \lambda_3 y_3 + \alpha_0 v_0^2 / 2g$$

$$H_4 = \lambda_4 y_4 + \alpha_4 v_4^2 / 2g$$

$$\lambda_3 = \lambda_4 = 1$$

$$\alpha_0 = \alpha_4 = 1$$

$$Disip.Vis. = \frac{1}{\gamma q} \int_0^{L_{sj}} \int_0^{y(x)} \mu \left(\frac{du'_i}{dx_j} + \frac{du'_j}{dx_i} \right) \frac{d'_i}{dx_j} dy dx$$

$$Convecc.Turb. = \frac{1}{\gamma q} \int_0^{y_4} \rho \frac{\overline{V'^2}}{2} \bar{u} dy$$

$$\overline{V'^2} = u'^2 + v'^2 + w'^2$$

q = caudal unitario circulante

De las medidas de velocidad media \bar{u} e intensidad turbulenta $\overline{u'^2}$ en las secciones donde $x \geq L_{sj}$, y haciendo uso de la suposición de que $\overline{V'^2} = 2\overline{u'^2}$, se obtienen los valores de $(Convecc.Turb.)_x$.

$$(Convecc.Turb.)_x = \frac{1}{\gamma q} \left(\int_0^{y_4} \rho \frac{\overline{V'^2}}{2} \bar{u} dy \right)_{x=x} \quad 44$$

$$(Convecc.Turb.)_x = \frac{1}{\gamma q} \left(\int_0^{y_4} \rho \frac{\overline{V'^2}}{2} \bar{u} dy \right)_{x=L_{sj}} \quad 45$$

El valor de $Disip.Vis$ también se ha determinado por sustitución de los valores H_0 , H_4 y $(Convecc.Turb.)_{x=L_{sj}}$ en la ecuación 43.

$$H_0 = H_4 + Disip.Vis. \quad 46$$

Los valores de $Disip.Vis./(H_0-H_4)$ resultan ser muy superiores a los de $Convecc.Turb./(H_0-H_4)$ y por este motivo se puede concluir que $Convecc.Turb./(H_0-H_4)$ es despreciable.

De acuerdo con esto, L_{sj} se interpreta como la longitud de la zona requerida para disipar el total de la energía perdida en el resalto sumergido. La pérdida de energía entre el inicio ($x=0$) y el final ($x=L_{sj}$) del resalto sumergido puede ser expresada mediante la siguiente ecuación unidimensional:

$$H_L = \left(\frac{v_0^2}{2g} + y_3 \right) - \left(\frac{v_4^2}{2g} + y_4 \right) \quad 48$$

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

$$\frac{H_L}{H_0} = \frac{2 \left(\frac{y_3}{y_0} - \frac{y_4}{y_0} \right) + \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{y_4}{y_0} \right)^2} \right] F_0^2}{2 \left(\frac{y_3}{y_0} \right) + F_0^2} \quad 49$$

Cuando $y_3=y_0$ y $F_0=F_1$ se tiene la ecuación de resalto libre.

En nuestro caso tenemos:

Q (m ³ /s)	0.01945	0.03067	0.04531
B (m)	1.05	1.05	1.05
Y ₀ (m)	0.015	0.02	0.023
F ₀	3.219	3.297	3.949

Tabla 18: Valores de B, F₀ e Y₀ para cada caudal.

Con el fin de ver el grado de ajuste a los resultados obtenidos mediante la fórmula 49, se han realizado leyes teóricas para valores de y_3/y_0 definidos. Para graficar las leyes teóricas se necesita una ecuación que relacione y_3 con y_4 . Se han representado en un gráfico los valores de y_3 e y_4 , y se ha obtenido la ecuación de la línea de tendencia (figura 138).

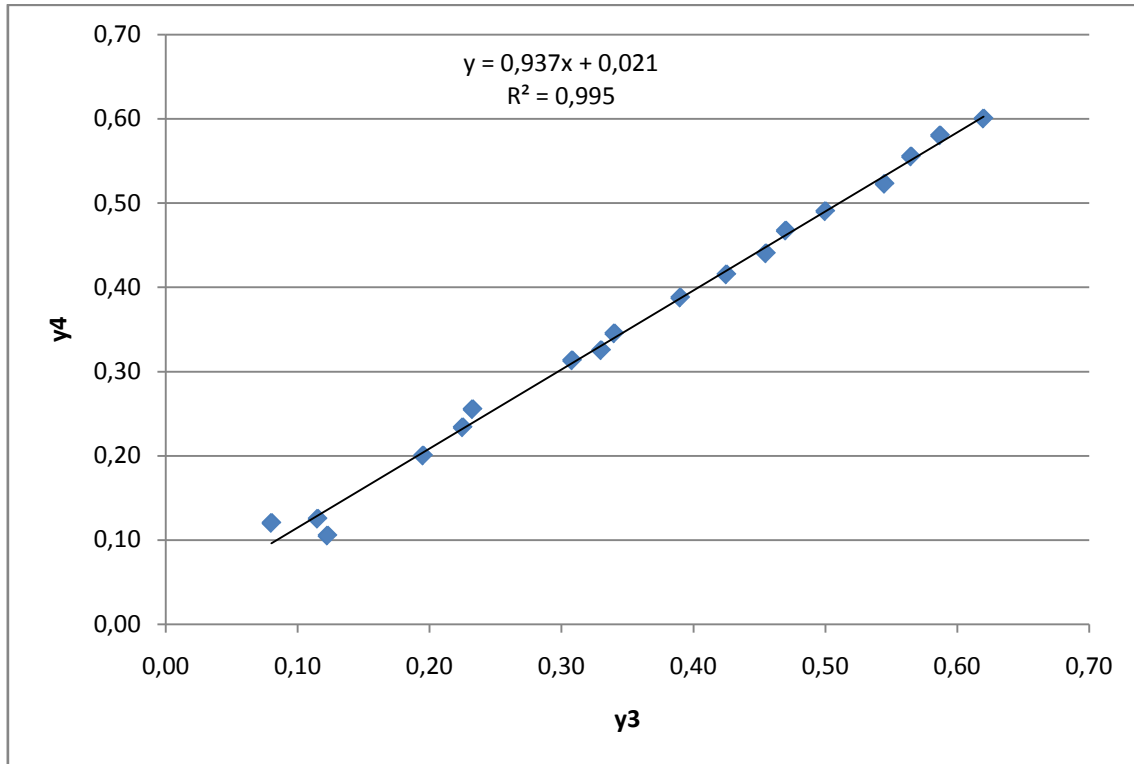


Figura 138: Relación entre los calados y_3 e y_4 .

Con la ecuación de la línea de tendencia se tiene:

$$y_4 = 0.9374y_3 + 0.0211 \quad 50$$

En la figura 139 se representan los valores obtenidos experimentalmente, divididos en grupos según la relación y_3/y_0 a la que pertenecen.

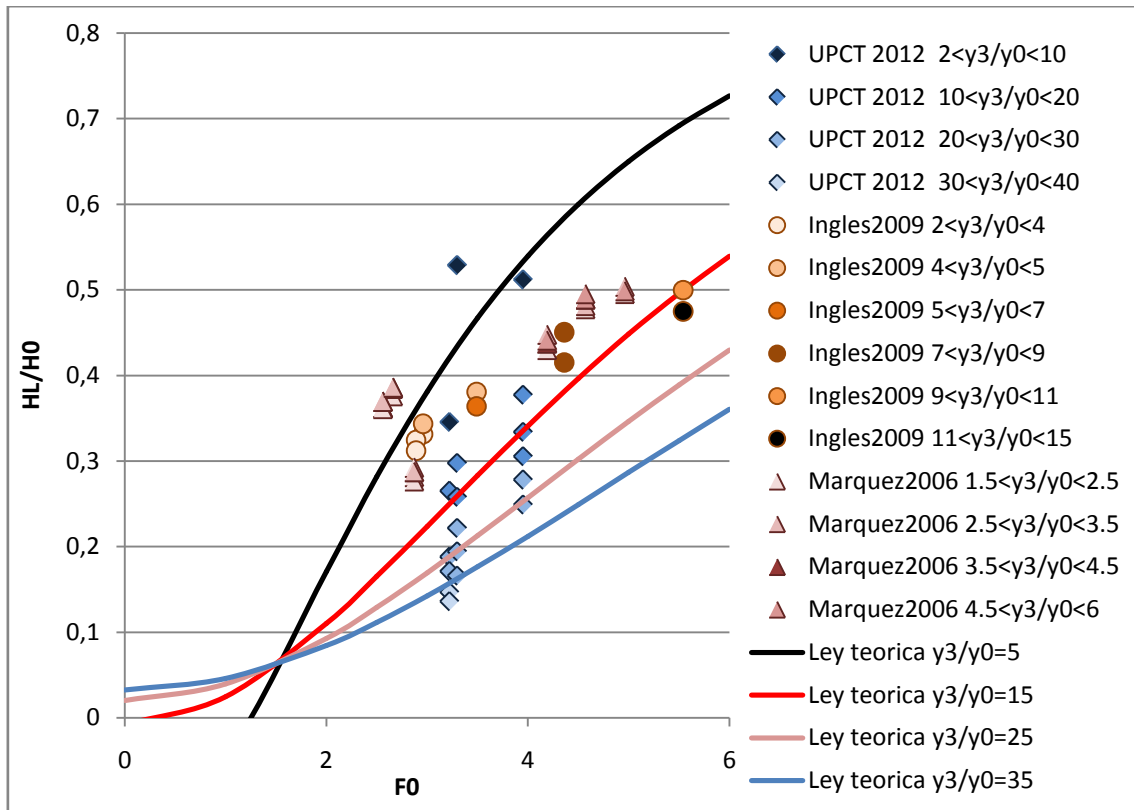


Figura 139: Pérdida relativa de energía en resaltos sumergidos, H_L/H_0 vs F_0 .

Se han representado los resultados junto con los obtenidos por Inglés (2009) y Márquez (2006) con el fin de observar las diferencias.

Los estudios de Márquez e Inglés fueron realizados en un canal de laboratorio de pequeñas dimensiones, restringiéndose los datos a relaciones $y_3/y_0 < 15$, por lo que sus resultados no se pueden comparar en todo el rango de valores obtenidos.

En nuestro caso, los resultados se encuentran dentro de los márgenes establecidos por la formulación teórica, observándose como las leyes teóricas pasan por el centro de la nube de puntos en cada intervalo y_3/y_0 .

Se observa como a mayores F_0 la pérdida de energía relativa H_L/H_0 aumenta. Esto se aprecia mejor en el caso de Inglés y Márquez.

En la figura 140 se grafica la relación $H_L/H_0 = f(y_3/y_0, F_0)$.

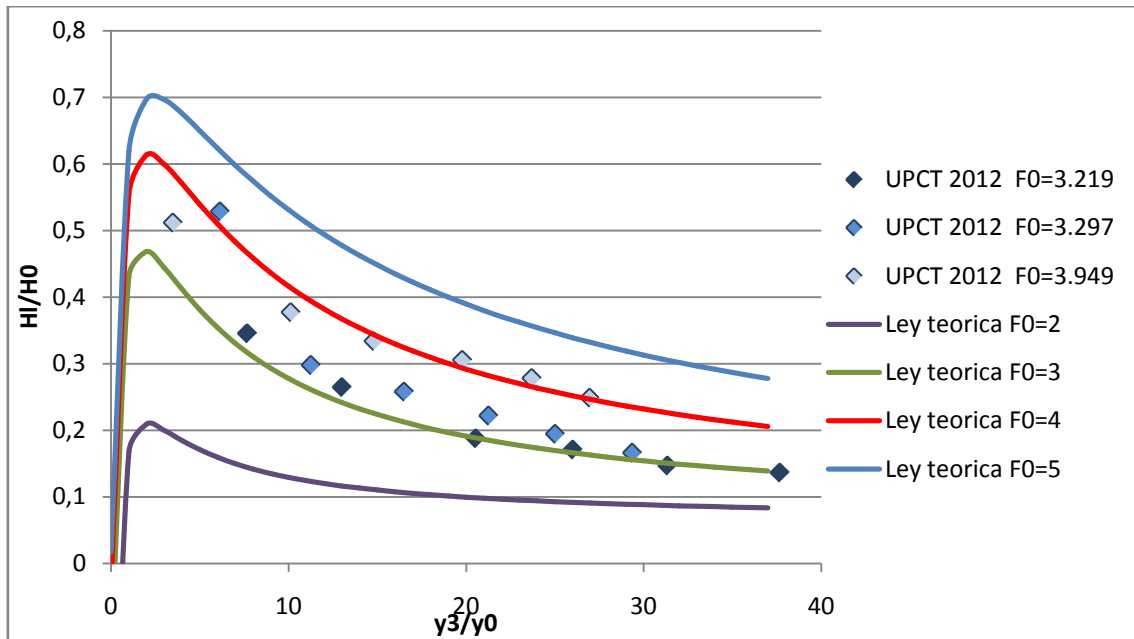


Figura 140: Pérdida de energía relativa para resaltos sumergidos. H_1/H_0 vs y_3/y_0 .

En general, los resultados están bastante bien ajustados a las leyes teóricas, obteniéndose los valores entre las curvas teóricas correspondientes a $F_0=3$ y $F_0=4$. Se puede observar que a mayores diferencias entre y_3 e y_0 , la pérdida de energía relativa es menor.

Se han representado los resultados junto con los obtenidos en los proyectos anteriores de Márquez (2006) e Inglés (2009) (figura 141), aunque los resultados de años anteriores presentan una relación y_3/y_0 considerablemente menor, los valores se mantienen entre los límites definidos por las leyes teóricas.

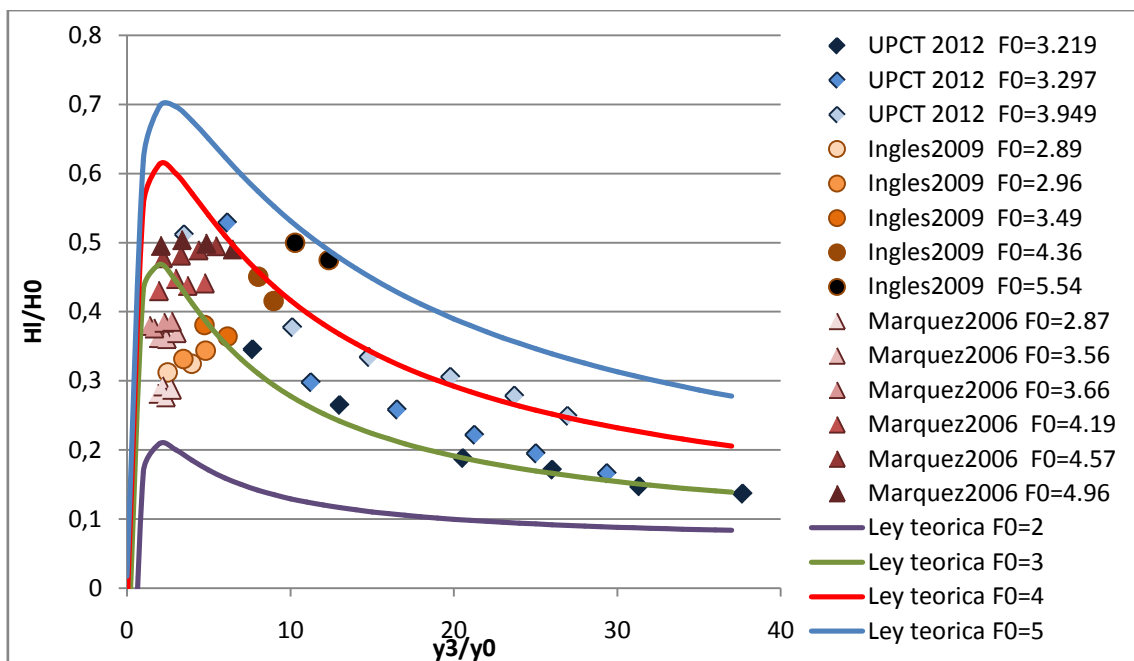


Figura 141: Pérdida de energía relativa para resaltos sumergidos. H_1/H_0 vs y_3/y_0 .

A continuación se representa el porcentaje de disipación de energía en relación con F_0 , obtenida mediante la expresión:

$$\% \text{ de disipación de energía} = \left(1 - \frac{H_4}{H_0}\right) \times 100 \quad 51$$

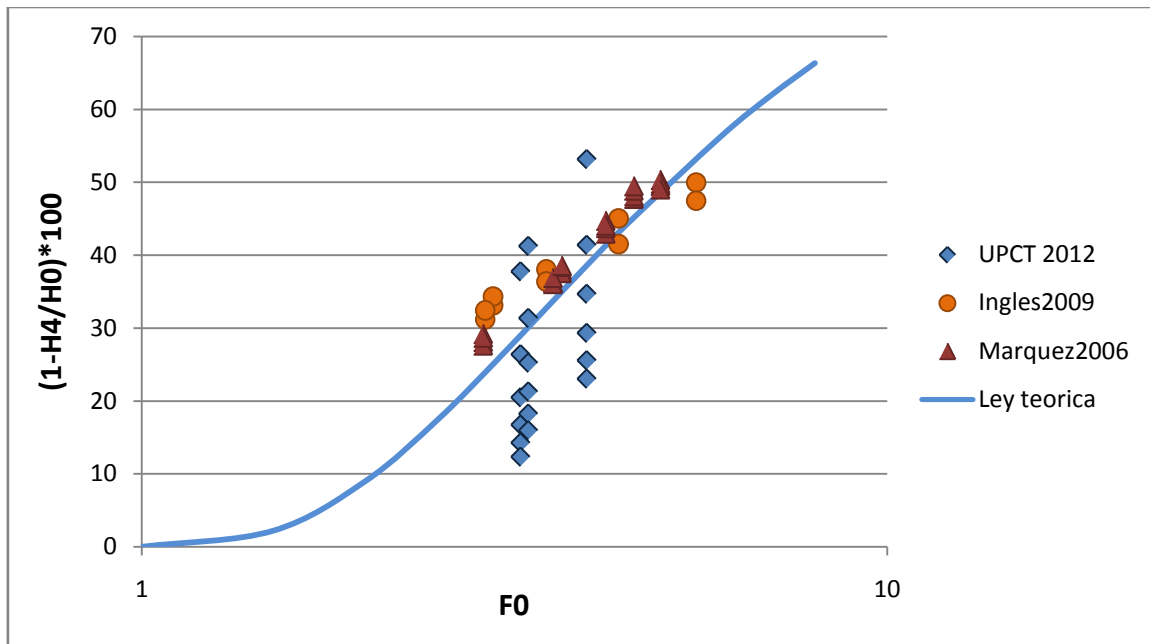


Figura 142: Disipación de energía en resaltos sumergidos para velocidades medias.

Para calcular la ley teórica se ha utilizado la ecuación 52, válida para resaltos libres y sumergidos.

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad 52$$

Se observa que el porcentaje de disipación de energía aumenta con el número de Froude.

En el caso del cuenco de disipación los resultados se encuentran muy dispersos. Para el caso de Inglés (2009) y Márquez (2006), los resultados se ajustan bastante bien a la ley teórica aunque tiende a subestimarlos para valores bajos de F_0 y a sobrestimarlos para valores altos de F_0 .

Por último, se ha evaluado la disipación de energía en los resaltos hidráulicos sumergidos debido a la reducción de velocidades máximas entre la sección inicial del resalto ($x=0$) y la sección final del mismo ($x=L_j$), calculada mediante:

$$\% \text{ reducción } V_{m\acute{a}x. \text{ experimental}} = \left(1 - \frac{v_4}{v_0}\right) \times 100 \quad 53$$

En la figura 143 se han representado los resultados obtenidos, junto con los de Márquez (2006) e Inglés (2009). Se ha graficado la ley teórica de disipación de energía debido a la reducción de velocidades máximas para resaltos hidráulicos libres obtenida por Inglés (2009), quien no obtuvo una gran diferencia entre el caso de resaltos libres y sumergidos.

$$\% \text{ reducción } V_{m\acute{a}x. \text{ experimental}} = 30 \ln(4.8Fr_1) - 9.6 \quad 54$$

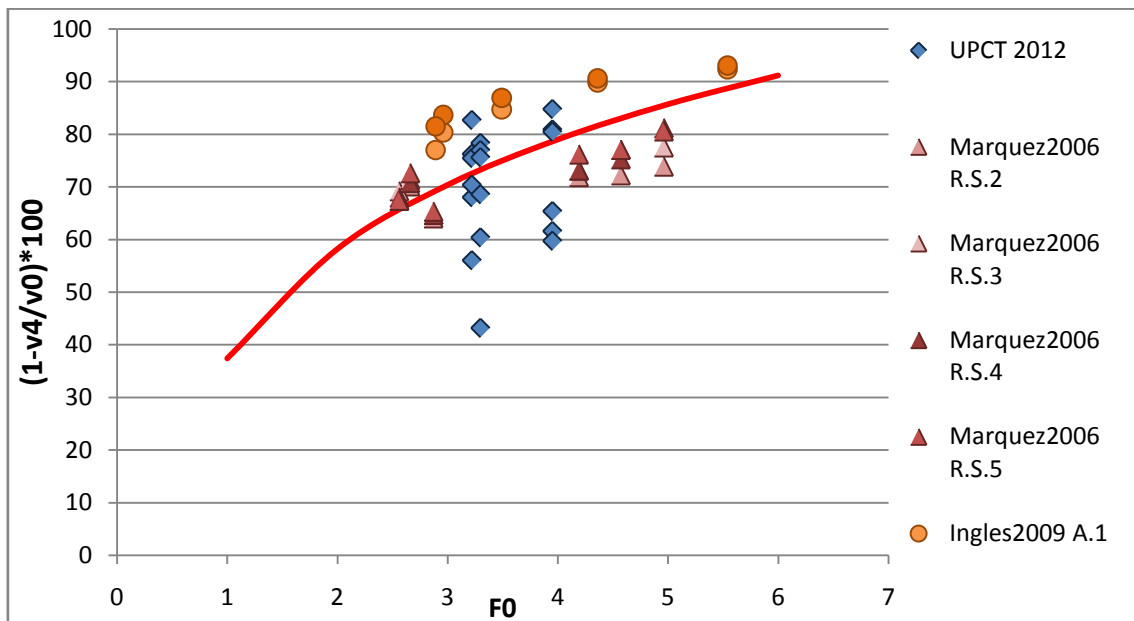


Figura 143: Disipación de energía en resaltos sumergidos debido a la reducción de velocidades máximas.

Los resultados obtenidos en el cuenco de disipación se encuentran bastante dispersos, situándose entre el 60% y el 90% de disipación de energía.

Se observa que en los aliviaderos se produce una mayor reducción de energía (Inglés, 2009), siendo esta mayor que la ley teórica y que los resaltos hidráulicos sumergidos originados por vertido libre.

Los resultados de Márquez tienden a situarse por debajo de la ley teórica para resaltos libres, mientras que los valores de Inglés están ligeramente por encima.

12. CONCLUSIONES

El objetivo buscado en la realización de este proyecto ha sido el análisis de velocidades medidas en la formación de resaltos hidráulicos sumergidos obtenidos en un cuenco de amortiguación de un vertedero de caída libre para distintos calados y colchones.

Configuración de la sonda

Para el correcto funcionamiento de la sonda los principales parámetros introducidos son el rango de velocidad, cuyo valor establecido es de 250 cm/s, la frecuencia de muestreo que fue de 10 Hz, y la salinidad, cuyo valor estimado fue de 2 ppm.

Como se explicó anteriormente, el equipo de medida de velocidades instantáneas ADV necesita estar sumergido. La sonda no funciona correctamente en flujo bifásico (agua-aire), lo que ocurre en el caso de los resaltos hidráulicos debido a la entrada de burbujas de aire. El tratamiento de datos realizado ha permitido obtener unos buenos resultados comparables con trabajos experimentales ya afianzados. 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

-Métodos de filtrado:

El método de Gorin y Nikora (2002) desecha demasiados datos, desvirtuando la serie.

El método de Molina (2010) utiliza valores muy bajos de λ , desechando la mayor parte de la serie de datos.

El parámetro de umbral de aceleración λ , produce buenos resultados para series con baja varianza, pero funciona mal para series con elevada varianza.

El parámetro que mejor resultados obtiene es el umbral de velocidad k . Se ha escogido el filtrado con un valor de $k=2$.

-Análisis de velocidades medias:

Del análisis de velocidades medias se han extraído las siguientes conclusiones:

Para una correcta caracterización del chorro de fondo se deben realizar medidas en las zonas próximas a la solera. En algunos casos si se ha podido captar bien este fenómeno.

Con colchones elevados las barreras interfieren en las distribuciones de velocidad produciendo un flujo negativo desde la solera hasta el 60-70% del calado, a partir de este punto la velocidad se vuelve positiva, aumentando de manera progresiva hasta la superficie.

Para un mismo caudal, la longitud durante la cual las distribuciones de velocidades son afectadas por el resalto hidráulico sumergido es inversamente proporcional a la altura del colchón.

-Longitud en resalto hidráulico:

La longitud del resalto hidráulico se ha tomado como la de la sección donde deja de haber una variación en la velocidad máxima, se ha comparado con la de diferentes autores.

El método de Ohtsu (1990), el método ajustado por Márquez (2006) y el método de Rao y Rajaratnam (1963) dan valores mayores a los reales debido a que la relación de calados y_4/y_2 es elevada, mientras que los métodos de Silvester (1964) y Bureau of Reclamation (1987) se ajustan mejor.

-Campos de velocidad media en los resaltos hidráulicos:

Observando la distribución experimental de nuestros datos se llega a la conclusión de que al aumentar la relación y_4/y_0 los datos se alejan ligeramente de las leyes teóricas para resaltos sumergidos, propuestas por Ohtsu (1990) y Márquez (2006). Se ha obtenido una nueva ley de distribución que se ajusta mejor.

-Pérdida de energía en resaltos hidráulicos sumergidos:

En el caso de la pérdida de energía relativa de la relación H_L/H_0 vs F_0 , los resultados se encuentran dentro de los márgenes establecidos por la formulación teórica. Las leyes teóricas pasan por el centro de la nube de puntos en cada intervalo y_3/y_0 . Se observa como a mayores F_0 la pérdida de energía relativa H_L/H_0 aumenta.

Para el caso de pérdida de energía relativa, H_L/H_0 vs y_3/y_0 , los resultados se ajustan a las leyes teóricas, obteniéndose los valores entre las curvas teóricas correspondientes a $F_0=3$ y $F_0=4$. Se puede observar que a mayores diferencias entre y_3 e y_0 , la pérdida de energía relativa es menor.

En la gráfica de disipación de energía se aprecia como los resultados se encuentran dispersos y el porcentaje de disipación de energía aumenta con el número de Froude.

BIBLIOGRAFIA

- Carrillo Sánchez, José María (2004)**. Determinación experimental de distribuciones de velocidad 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. (1989)**. Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica. Aplicación en el vertido libre de presas de bóveda. Escuela Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.
- Castillo-E, L. G. (2002)**. “Apuntes de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos”. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Confederación Hidrográfica del Duero. Embalse del Porma**. [En línea]. Disponible en Internet: <<http://www.chduero.es/inicio/infraestructuras/Losembalsesdelacuena/EmbalsedelPorma/tabid/235/Default.aspx>> [Consulta: 23 Marzo 2012].
- Cueva del ingeniero civil. Resalto hidráulico**. [En línea]. Disponible en Internet: <<http://www.cuevadecivil.com/2011/03/resalto-hidraulico.html?m=1>> [Consulta: 21 Marzo 2012].
- Ingeniería y computación. Presa de Aldeadávila**. [En línea]. Disponible en Internet: <<http://ingenieriaycomputacion.blogspot.com.es/2010/12/presa-de-aldeadavila-esta-maravilla-de.html?m=1>> [Consulta: 21 Marzo 2012].
- Inglés Sánchez, Esperanza (2009)**. 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.
- Márquez Mulero, María del Carmen (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.
- Molina Miñano, Belén (2010)**. Caracterización de resaltos hidráulicos a través de medidas de velocidades instantáneas con equipo Doppler. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.
- Moore W. L (1943)**. Energy loss at the base of a free overall. Transactions, American Society of Civil Engineers, vol. 108, pp. 1343-1360.
- Nortek (2003)**. User Guide. Technical Documentation.
- Sontek ADV Field (2001)**. *Acoustic Doppler Velocimeter*. Technical Documentation.
- Ven Te Chow (1998)**. Hidráulica de canales abiertos. Ed. McGraw-Hill.

-Vera Morales, Carlos (2011). Determinación experimental de distribuciones de velocidad e índices turbulentos en el cuenco de amortiguación de un aliviadero de vertido libre por coronación. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.