

Capítulo 4. Análisis de los resultados en el dominio del tiempo

1. Introducción

Con los ensayos llevados a cabo se ha pretendido caracterizar el campo de presiones sobre toda la rápida. El estudio experimental se ha enfocado bajo dos planteamientos distintos:

- Enfoque global. Se ha estudiado la evolución de la presión a lo largo del eje de simetría longitudinal del aliviadero, en función del caudal circulante. Las tareas llevadas a cabo para el desarrollo de este estudio así como las principales conclusiones obtenidas se presentan en el apartado 3 del presente capítulo.
- Enfoque particular. Se han medido los perfiles de las presiones sobre la huella y contrahuella de dos peldaños distintos, para todo el rango de caudales. En el apartado 4 se detallarán los resultados que se deriven de este análisis.

Los sensores utilizados, de tipo piezorresistivo, fueron descritos en el apartado 4.1 del capítulo 2. La resolución de los mismos, considerando todas las posibles fuentes de error, es de 3.5 mm de columna de agua.

Ya ha sido comentada, en el mismo apartado 4.1 del capítulo 2, la utilización de una tarjeta analógico – digital, que permite la comunicación entre los sensores de presión y el ordenador y que transforma la señal captada por ellos a registros de voltaje, así los registros de presión sufren ya un preproceso en el mismo instante en que son tomados. A continuación a través del programa diseñado para la adquisición de las presiones, una vez el registro ha sido captado por el ordenador, se procederá a pasar de la serie temporal de voltaje a la serie de presión. Para ello será necesario conocer la recta de transformación de voltaje a presión correspondiente a cada ensayo y que se obtiene al inicio de cada sesión de ensayos. De esta manera se han ido obteniendo cada uno de los registros de presión durante la campaña experimental en el laboratorio. Paralelamente, ya en gabinete, se han tratado los citados registros para la obtención de los principales estadísticos que permiten su análisis y comprensión.

Cada registro de presión se almacena en dos archivos con el mismo nombre aunque con distinta extensión –*.INF y *.PRS–. El primero de ellos contiene los datos de control de dicho ensayo (p.e. fecha y hora del ensayo, caudal circulante o ubicación de los puntos de medida) y el segundo la serie temporal de 2400 datos de cada uno de los cuatro sensores (frecuencia de muestreo 80 Hz). Una vez registrados todos los ensayos, ya en unidades de presión gracias al programa de adquisición de datos que se describió en el apartado 4.2 del capítulo 2, se procedió al tratamiento de los mismos en el dominio del tiempo, tal y como se describirá en el siguiente apartado.

2. Tratamiento de los registros en el dominio del tiempo

Para el procesamiento de los datos en el dominio del tiempo, se elaboró un programa en lenguaje FORTRAN, basado en subrutinas de tratamiento numérico como las bibliotecas del paquete IMSL o las incluidas en Press et al. (1992). Su objetivo fundamental es calcular los estadísticos de mayor interés de cada uno de los registros obtenidos durante las sesiones de ensayo.

2.1. Descripción del programa

El programa se inicia pidiendo al usuario dos variables de control:

- Cómo deben ser escritos los resultados: en metros de columna de agua o en forma adimensional, y
- Qué directorios (ver apartado 4.3 del capítulo 2), es decir, que grupo de ensayos van a ser procesados –p.e. análisis de la bidimensionalidad del modelo, estimación del perfil de presiones sobre la huella de un escalón, etc.–.

Una vez seleccionados los directorios, el programa lee el archivo que se ha creado en cada uno de ellos (ARCHIVOS.DAT) en los que se detallan el número de registros que serán procesados y, a continuación, el nombre de dichos registros (p.e. A35Q150). Seguidamente el programa lee los dos archivos que contienen un determinado ensayo (p.e. A35Q150.INF y A35Q150.PRS). Esos mismos nombres son utiliza-

dos al escribir los resultados, en forma adimensional o no según se haya seleccionado, (p.e. A35Q150.RES). Además de los citados archivos de resultados, el programa agrupa todos los registros correspondientes a un mismo caudal en un único archivo de resultados (p.e. Q150.RES), de esta manera se facilita la presentación de los estadísticos calculados para un mismo caudal en los distintos puntos de medida.

La adimensionalización de las diversas variables se establece según se han definido en el apartado 5.2 del capítulo 2, de la siguiente manera:

- La presión, en m.c.a., se comparará con la altura ($h=0.100\text{ m}$) de un escalón:

$$\Pi_p = \frac{p/\gamma}{h} \quad (4.1)$$

- El caudal se adimensionalizará comparando el calado crítico con la altura del escalón:

$$\Pi_q = \frac{y_c}{h} = \frac{\sqrt[3]{q^2/g}}{h} \quad (4.2)$$

- La posición de los puntos de medida según cuatro coordenadas, considerando el convenio ya presentado en el citado apartado 5.2 del capítulo 2:

- El escalón de medida se propuso caracterizarlo según la distancia de su arista externa al umbral del aliviadero. En (4.3) se detalla la expresión con la que se ha calculado. En ella, N corresponde al número de peldaños de altura uniforme ($h = 0.100\text{ m}$, $l = 0.08\text{ m}$) que hay desde el umbral al escalón de medida, $\theta = 51.34^\circ$ es el ángulo del aliviadero con la horizontal, c es la longitud del tramo, rasante a las aristas de los escalones, de la transición desde el umbral hasta el primer peldaño de altura constante y k_s es el tamaño de la macro – rugosidad correspondiente a un escalón, es decir la altura de un peldaño medida perpendicularmente a la dirección del flujo ($k_s = h \cdot \cos \theta$):

$$\Pi_L = \frac{L}{k_s} = \frac{N \cdot \sqrt{h^2 + l^2} + c}{h \cdot \cos \theta} = \frac{0.128 \cdot N + 0.638}{0.062} \quad (4.3)$$

- Además se definirán tres coordenadas (x, y, z) que describirán en cada escalón la posición exacta del punto de registro.

$$\left(\Pi_x, \Pi_y, \Pi_z \right) = \left(\frac{x}{B}, \frac{y}{l}, \frac{z}{h} \right) \quad (4.4)$$

Se caracterizará la presión no sólo en cuanto a su magnitud mediante la estimación de su media muestral, sino también en cuanto a su variabilidad, calculando su desviación típica muestral así como el valor máximo y mínimo de cada registro. De cualquier modo hay que tener en consideración, después de captar una serie de 2400 valores, que su máximo y mínimo podrían no ser representativos del ensayo puesto que podrían ser debidos a anomalías puntuales durante la realización del mismo (p.e. una burbuja de aire que quedara atrapada en un cierto instante sobre el punto de medida). Por este motivo se calculan y presentan los valores correspondientes a un cierto nivel de probabilidad de ser superados que son representativos de dichos valores extremos. Se escogieron los valores del 5% y 95% de probabilidad de ser rebasados. Para completar la información se calculó también el valor superado en un 50% del tiempo que duró el registro. Este valor, estimador de la mediana muestral, al compararlo con la media muestral permitirá tener una idea de la simetría de distribución de probabilidades de dicha serie temporal. Como es sabido, una distribución simétrica presenta valores iguales de la media y mediana muestrales (Benjamin y Cornell (1981)).

3. Evolución de la presión a lo largo de la rápida

3.1. Objetivos y metodología de trabajo

En algunas de las publicaciones de la bibliografía existente se hace referencia al desarrollo de un flujo uniforme suficientemente aguas abajo del punto de inicio de entrada de aire (Rajaratnam (1990), Stephenson (1991), Bindo (1993), Christodoulou (1992), etc.) tal y como se ha podido ver en los apartados 1.5 y 2.4 del estado del conocimiento. También se ha citado que Matos (1997), discutiendo el artículo de Rice et al. (1996), pone en duda que en alguna de las experiencias anteriores llegue a producirse dicho régimen uniforme, hecho que igualmente se cuestiona en Sánchez-Juny et al. (1998). A la vista de esta controversia se pretendió analizar este punto midiendo la variación de la presión a lo largo de la rápida.

El estudio de la evolución de la presión a lo largo de la rápida en función del caudal circulante forma parte del enfoque global del estudio hidráulico de la estructura. El objetivo básico fue el de analizar si se alcanzaba a desarrollar suficientemente aguas abajo de la estructura un régimen uniforme. Si se alcanzara dicho régimen las características del flujo como el calado, la velocidad, la concentración de aire o el campo de presiones sobre los peldaños, deberían ser independientes del escalón sobre el que fueran analizados. Por este motivo se procedió a medir la presión sobre los centros de simetría de las huellas de los escalones, considerando dicho punto como representativo de todo el escalón. Si el citado régimen uniforme llegara a establecerse lo haría en la zona de flujo completamente desarrollado (completamente aireado), por ello sería suficiente analizar las presiones en la parte inferior del aliviadero. A pesar de ello, a fin de conocer con algo más de detalle el campo de presiones, los ensayos se han completado de la siguiente manera:

- Caudales principales. En el modelo corresponden a los caudales desde 50 l/s a 200 l/s de 50 en 50 l/s. Se han medido las presiones sobre todas las huellas (en su centro de simetría) desde el extremo más aguas arriba al más aguas abajo.
- Caudales secundarios. Corresponden, en el modelo, a caudales intermedios a los principales. En estos casos se ha medido cada dos o tres peldaños, con el objetivo de adquirir una primera aproximación de las presiones en tales casos intermedios.

En cada caso se llevaron a cabo al menos dos medidas, a fin de contrastar la repetibilidad de las mismas. Además para todo el rango de caudales en modelo (de 50 l/s a 200 l/s de 25 en 25 l/s), también se han medido las presiones sobre los centros de simetría de algunas contrahuellas. Estos ensayos se han llevado a cabo mediante el sistema de carga constante que ha sido detallado en el apartado 4.1 del capítulo 3.

Para favorecer la formación del flujo completamente desarrollado se realizó una experiencia que consistió en provocar la entrada a la rápida en carga. Ello se consiguió cubriendo con una plancha de 1 x 0.60 m², desde el primer escalón de la zona de transición hasta el primer escalón de pendiente 0.8 con la horizontal. Dicha plancha se colocó paralela a la zona de pendiente uniforme y dejando una abertura variable en su extremo aguas abajo. De esta manera se consiguió que el flujo saliera de la zona en carga con una velocidad superior a la que dispone en el mismo escalón con el funcionamiento natural del umbral en lámina libre. Ello podría tener el efecto artificioso de aumentar la longitud del aliviadero.

En la Tabla 4.1 se resumen las experiencias desarrolladas para caracterizar la evolución de la presión a lo largo de la rápida, mostrándose qué caudales fueron ensayados, en qué escalones y para cuál de las tres experiencias: registros en los centros de simetría de las huellas con el umbral en lámina libre (H), de las contrahuellas (C) o en las mismas huellas con el umbral trabajando en presión (P).

3.2. Resultados

Los resultados obtenidos se analizarán por separado según se encuentren los puntos de medida en la huella o en la contrahuella de un escalón. Es interesante tener en cuenta que los valores que se presentarán en los gráficos de este apartado corresponden a valores puntuales. En otras palabras, se muestran las medidas en los centros de simetría como representativas de la huella o contrahuella correspondientes, teniendo en cuenta que si se hubiera elegido otro punto de medida distinto (p.e. un punto más cercano a la arista exterior, o el más cercano a la arista interior) el nivel de presiones hubiera sido sensiblemente distinto, tal y como se expone en el apartado 4.

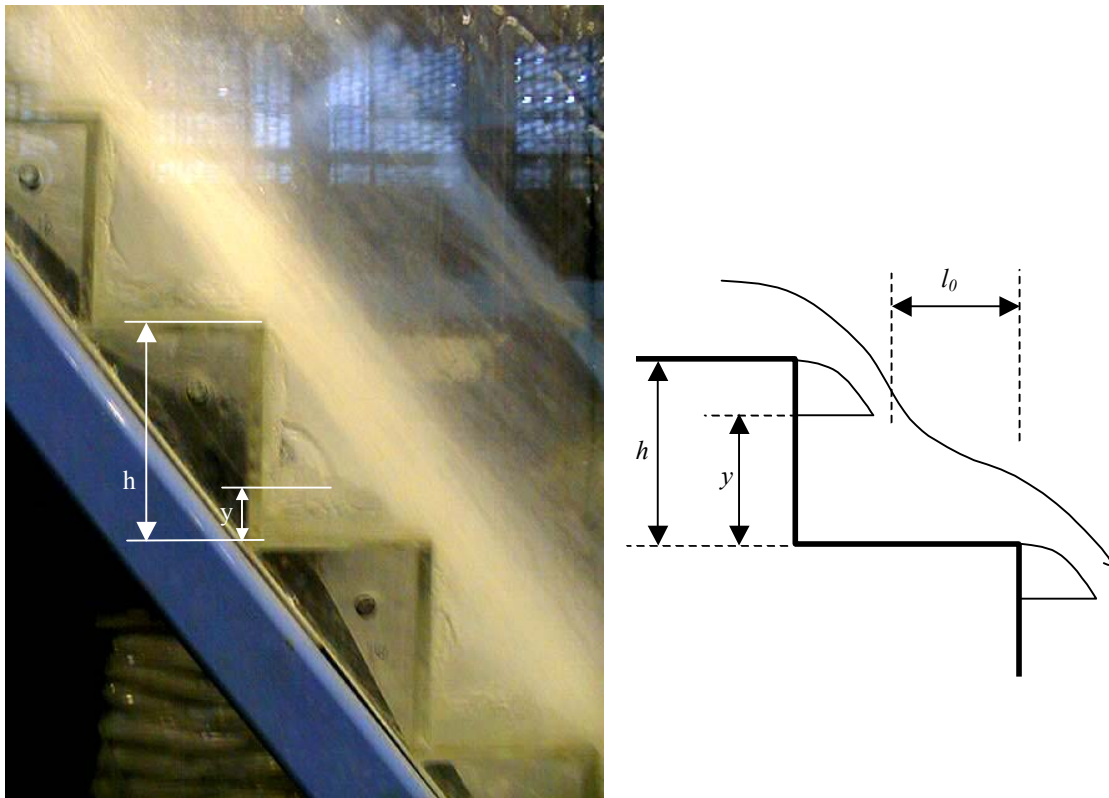


Figura 4.1. Criterio visual para el cambio de régimen escalón a escalón a rasante fijado en el momento en que $y \approx h$.

De esta manera, aprovechando las estimaciones de Essery y Horner (1978), Rajaratnam (1990) y la propia del autor, podría ajustarse una expresión que permitiera determinar, de manera aproximada, el cambio de flujo escalón a escalón a rasante en función de la pendiente del aliviadero.

Tabla 4.2. Cambio de flujo escalón a escalón a flujo rasante. Observaciones experimentales.

Referencia	y_c/h	h/l
Essery y Horner (1978)	1.20	0.200
	0.815	0.421
	0.816	0.526
	0.831	0.736
	0.813	0.842
Rajaratnam (1990)	0.80	0.4...1.28
Autor	0.83	1.25

Un ajuste de mínimos cuadrados de estas observaciones permite obtener la siguiente expresión, con una correlación algo baja $r = 0.502$, en la que se indican los intervalos de confianza del 90% de cada término:

$$\frac{y_c}{h} = (0.983 \pm 0.215) - (0.171 \pm 0.270) \frac{h}{l} \quad (4.5)$$

como primera aproximación, esta expresión podrá ser aplicada para estructuras con pendientes h/l entre 0.2 y 1.3. Nótese, que el intervalo de confianza de la pendiente de la recta ajustada permitiría aceptar el ajuste de valores positivos de la pendiente en los alrededores de uno de los extremos del intervalo. En cambio, si se atiende a la geometría de los escalones parece adecuado pensar que, si se mantiene fijo el valor de h , cuanto menor sea la pendiente de la estructura respecto la horizontal (menores valores de h/l), mayor debe ser el caudal umbral de cambio de régimen (mayor y_c/h), ya que mayor debe ser en tal caso la distancia a salvar por el chorro incidente en el escalón aguas abajo hasta la arista externa del escalón (l_0 en la Figura 4.1). Así, el autor opina que la ecuación (4.5) debe ser tomada como una primera aproximación y debería ser contrastada con mayor número de experiencias.

Si bien en Degoutte et al. (1992) y Peyras et al. (1991) se presentan dos puntos que podrían complementar este ajuste (ver Tabla 4.3) éstos no han sido considerados en la obtención de la ecuación (4.5) puesto que la experiencia se aparta sensiblemente de las llevadas a cabo por los autores mostrados en la Tabla 4.2: ésta corresponde a una estructura escalonada formada por gaviones, que presenta unas características hidráulicas significativamente distintas (permeabilidad de los gaviones y alturas de los escalones de aproximadamente el 20% de la altura total de la estructura cuando lo habitual en estos estudios es moverse entre el 1.5 y el 3%). Es interesante mencionar que Chanson (1994a) utiliza dichos puntos para su ajuste, hecho que podría explicar sus discrepancias con los puntos de la Tabla 4.2. Igualmente en la Tabla 4.3 se muestra la referencia Beitz y Lawless (1992) usada por Chanson (1994a) y no utilizada para la obtención del ajuste (4.5), debido a que al autor finalmente no consiguió consultar dicha referencia y no se dispone de la información suficiente a cerca del criterio usado por los citados autores para la obtención de dichos datos.

En la Figura 4.2 se comparan los datos observados por los diversos autores mostrados en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3, con el ajuste de la expresión (4.5).

Tabla 4.3. Cambio de flujo escalón a escalón a flujo rasante. Observaciones experimentales de Degoutte et al. (1992) y Beitz y Lawless (1992).		
Referencia	yc/h	h/l
Beitz y Lawless (1992)	0.4	1.25
Degoutte et al. (1992)	0.74	0.33
	0.62	1.00

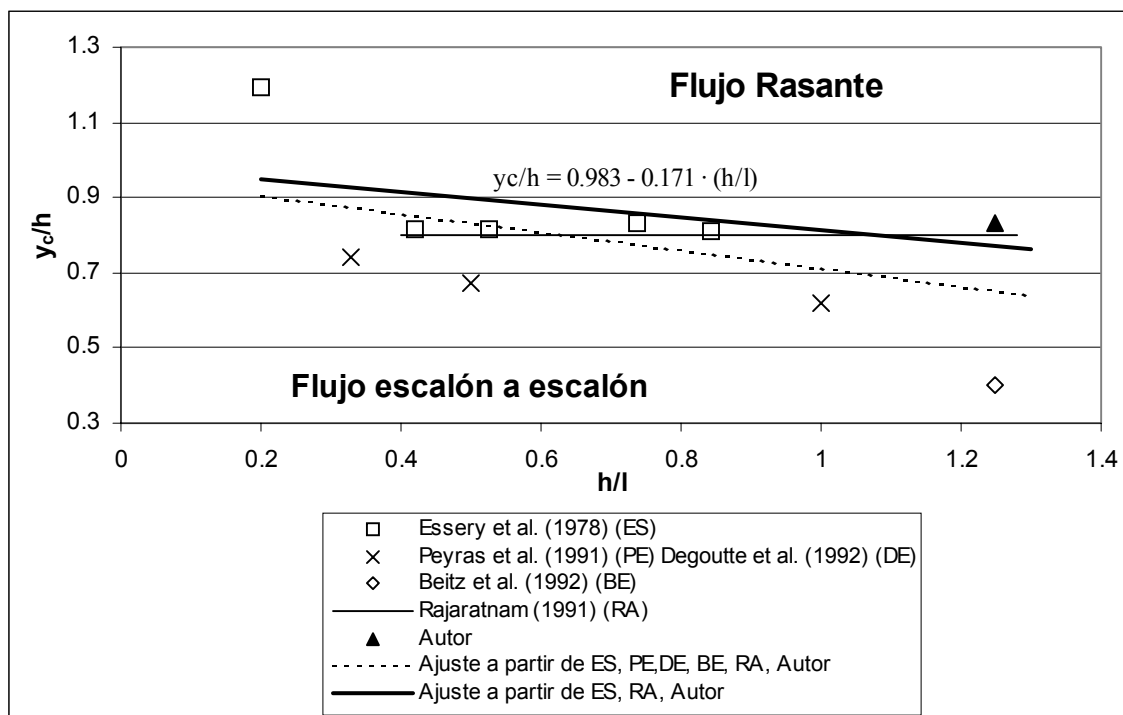


Figura 4.2. Paso de flujo escalón a escalón a flujo rasante. Comparación de observaciones experimentales con el ajuste (4.5)

3.2.2. Punto de inicio de entrada de aire

Como se verá, el comportamiento de las presiones a lo largo de la rápida depende en gran manera de la entrada de aire al flujo. Así, antes de presentar cualquier consideración acerca de las presiones ejercidas por el flujo sobre los peldaños, se caracterizará la posición del punto de inicio de entrada de aire al flujo.

En la Tabla 4.4 se presenta la zona en la que, de manera natural, se observó el inicio del proceso de entrada de aire en el flujo, que se resume según la notación que se esquematiza en la Figura 4.3.

La *Zona 1* corresponde a la región con aguas transparentes, situada inmediatamente a continuación de la cresta del aliviadero. En esta zona aún no se ha iniciado el proceso de entrada de aire. En la Tabla 4.1 se delimita su extremo más alejado del umbral de la estructura, hacia aguas abajo de ese límite se inicia la entrada de aire. En la *Zona 2* el aire empieza a progresar desde los cajeros hacia el centro del aliviadero, formándose una típica forma de U. Sin duda este aspecto se debe al ancho del modelo, de manera que con los anchos habituales en prototipo no se producirá esta forma pasando a tener el aspecto de una paralela al umbral del aliviadero. Cuando todo el ancho de la rápida superficialmente deja de ser transparente se inicia la *Zona 3*. En este caso, a pesar de su aspecto, visualmente se aprecia que no todo el flujo en esta posición se encuentra completamente aireado, es más, por debajo de la zona rasante, en la celda atrapada entre la huella y contrahuella se aprecia visualmente una concentración de burbujas de aire inferior a la que se observa en la misma región en la *Zona 4*, que es considerada por ello la región completamente aireada, y con el flujo completamente desarrollado.

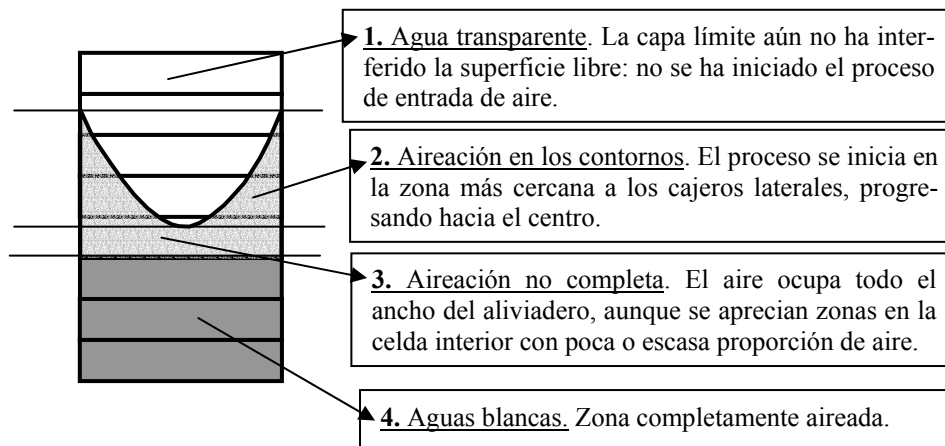


Figura 4.3. Zonas observadas en los escalones en los que se lleva a cabo el proceso de entrada de aire.



Figura 4.4. Detalles de la zona de entrada de aire en el modelo del Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la UPC.

Tabla 4.4. Delimitación de la región en la que se lleva a cabo el proceso de entrada de aire en el flujo.

y/h	L/k_s		
	Límite aguas abajo de la Zona 1	Límite aguas abajo de la Zona 2	Límite aguas abajo de la Zona 3
0.891	8.163	12.26	16.36
1.17	10.21	16.36	20.46
1.41	12.26	20.46	24.56
1.64	14.31	24.56	30.71
1.85	16.36	26.61	32.76
2.05	20.46	28.66	34.81
2.25	22.51	32.76	40.96

El régimen completamente desarrollado se establece en la zona de “aguas blancas”. Wood et al. (1983a) sobre un aliviadero liso propone estimar la posición de la sección de inicio de esta zona ajustando la expresión:

$$\frac{L}{k_s} = A(\sin \alpha)^B \left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot \sin \alpha \cdot k_s^3}} \right)^C = A(\sin \alpha)^B Fr^*{}^C \quad (4.6)$$

donde:

- L es la longitud desde el umbral del aliviadero hasta dicha sección de inicio de la zona de aguas blancas.
- α es el ángulo del aliviadero con la horizontal.
- k_s es la altura del triángulo rectángulo que tiene por catetos la altura y longitud de un escalón.

$$k_s = h \cdot \cos \alpha \quad (4.7)$$

- q es el caudal específico.
- g es la aceleración de la gravedad, y
- A , B y C son los parámetros a ajustar.

El autor ha ajustado a los valores observados en el Laboratorio (ver Tabla 4.4) y los presentados por Tozzi (1994), Sorensen (1985), CEMAGREF (1991), Bindo (1993) y Lejeune (1994) la siguiente expresión, que será válida para estructuras escalonadas de pendiente entre $Iv:0.75h$ y $Iv:0.8h$, y dentro del rango del parámetro Fr^* que se muestra en la Figura 4.5. Por este motivo no aparecerá en ella una dependencia explícita con la pendiente del aliviadero pues los citados autores trabajaron con pendientes muy similares y en cualquier caso con valores típicos de paramentos de presas de gravedad. Así para el ajuste de los coeficientes se tomó un valor representativo de dicha pendiente igual a $Iv:0.8h$.

$$\frac{L}{k_s} = 10.2 \cdot Fr^*{}^{0.7} \quad (\text{Correlación } r = 0.997) \quad (4.8)$$

En el apartado 2.4 del capítulo 1 se ha presentado el trabajo desarrollado por los diversos autores acerca de este tema. En la citada Figura 4.5 se comparan las estimaciones llevadas a cabo sobre aliviaderos escalonados con las desarrolladas por Wood et al. (1983a) sobre perfiles lisos. Nótese como a igualdad de caudal circulante y rugosidad –es decir igual Fr^* – tal y como era de esperar sobre un aliviadero liso el punto de inicio de entrada de aire se produce más aguas abajo que sobre un aliviadero escalonado. Obsérvese como todos los valores experimentales obtenidos por los diversos autores, mantienen un comportamiento bastante bien ajustado a la expresión (4.8) salvo para valores bajos de Fr^* (bajo caudal y/o alto k_s).

No se han comparado con los ensayos desarrollados por Keller (1977) ya que los valores de L/k_s y Fr^* analizados por dicho autor se encuentran fuera de los rangos habituales en aliviaderos escalonados de

hormigón compactado. Así mientras en Keller (1977) se muestran valores de L/k_s entre 10^3 y 10^6 , sobre un aliviadero escalonado aparecen valores entre 10 y 500.

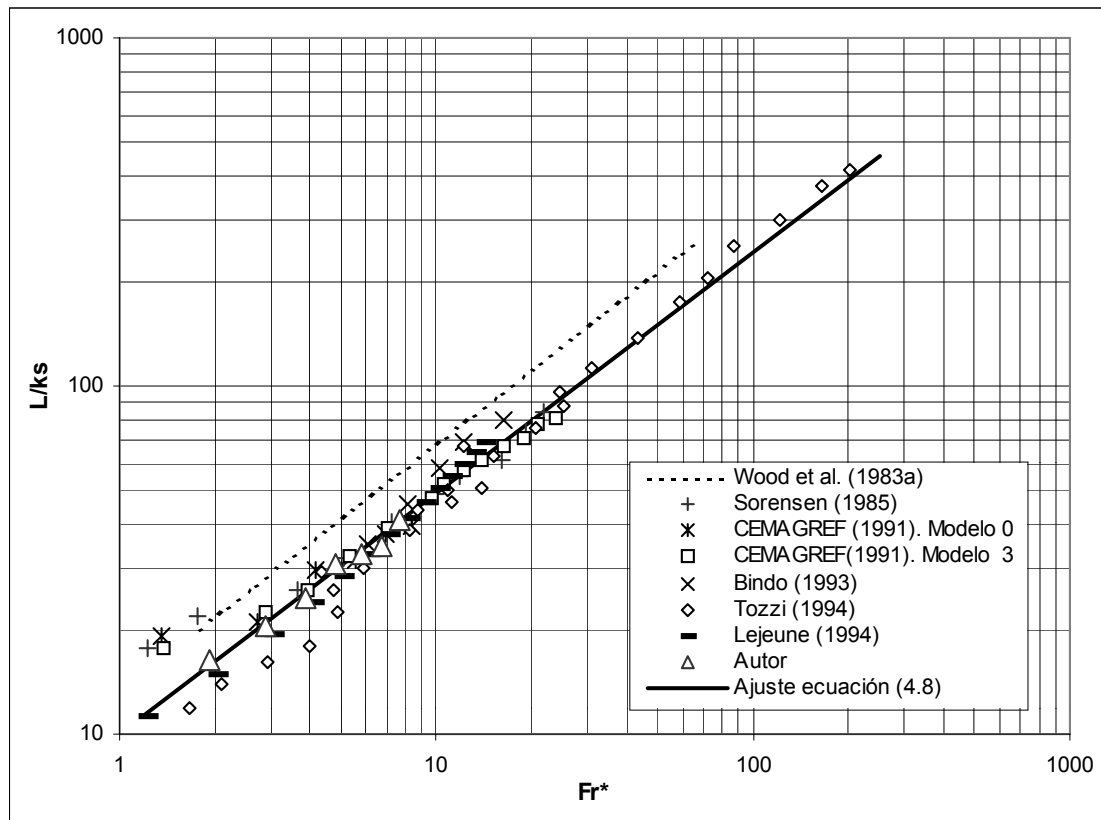


Figura 4.5. Ajuste de la expresión para estimar el punto de inicio de entrada de aire, completado con las estimaciones de Tozzi (1994), Sorensen (1985), CEMAGREF (1991), Bindo (1993) y Lejeune (1994).

La ecuación (4.8) permite estimar el inicio de la zona del aliviadero completamente aireada (zona 4). De manera análoga podrían ajustarse sendas expresiones para estimar el inicio de la sección en la que se inicia la aireación en los contornos (zona 2, expresión (4.10)) y la sección en la que establece una aireación no completa (zona 3, expresión (4.9)). Así se obtiene:

$$\frac{L}{k_s} = 7.81 \cdot Fr^{*0.7} \quad (\text{Correlación } r = 0.996) \quad (4.9)$$

$$\frac{L}{k_s} = 5.09 \cdot Fr^{*0.7} \quad (\text{Correlación } r = 0.983) \quad (4.10)$$

respectivamente para la zona 2 y zona 3. Hay que destacar que para estos ajustes han sido utilizadas únicamente las observaciones llevadas a cabo por el autor que se muestran en la Tabla 4.4. Ambas expresiones tienen un rango de validez análogo al de la ecuación (4.8). Apréciase como en cualquier caso se ha obtenido que, para una rápida de pendiente $1v:0.8h$, la situación de las fronteras de las distintas zonas que describen el inicio de la aireación depende del número de Froude (Fr^*) elevado a un mismo exponente 0.7. En todos los casos se han obtenido buenos niveles de correlación entre los datos observados y los modelos ajustados.

En la Figura 4.6 se comparan los ajustes mostrados en las ecuaciones (4.8), (4.9) y (4.10). Se apreciará como el número de peldaños dentro de las zonas deficientemente aireadas (zonas 1, 2 y 3) tiende a aumentar al aumentar el caudal. Ello habrá que tenerlo en cuenta en el diseño de estas zonas por cuanto que dicha falta de aireación podría, como se verá, repercutir en problemas de cavitación.

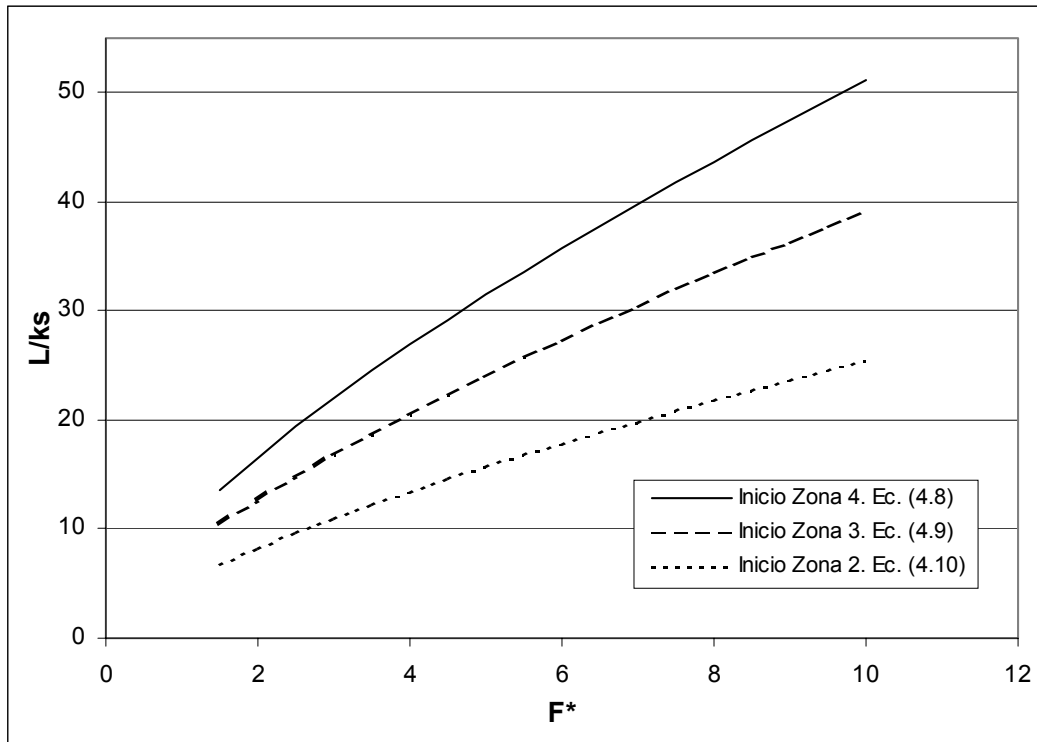


Figura 4.6. Delimitación de las secciones en las que se inicia la aireación sobre el aliviadero en función del caudal.

3.2.3. Evolución de la presión sobre las huellas. Umbral en lámina libre

En los gráficos de la Figura 4.7 a la Figura 4.13 se compararán, para los diferentes caudales ensayados, los resultados obtenidos en los centros de simetría de las huellas, trabajando el umbral de la rápida en lámina libre y desarrollándose un régimen rasante para todos los caudales ensayados. En dichos gráficos, a su vez, se presenta la zona en la que, de manera natural, se inicia el proceso de entrada de aire en el flujo, que se ha resumido en la Tabla 4.4 según la notación que se ha esquematizado en la Figura 4.3.

Las variables que se muestran son la presión media, la desviación típica, las presiones con una probabilidad de ser superadas del 5%, 50% y 95% –percentiles del 95%, 50% y 5% respectivamente–.

Se apreciará, además, que la medida presentada en cada escalón fue repetida, por lo general, al menos dos veces –y en ciertos puntos incluso más de cinco veces–. Se presentan todos los ensayos realizados a fin de que las medidas quedaran justificadas por la repetibilidad del suceso.

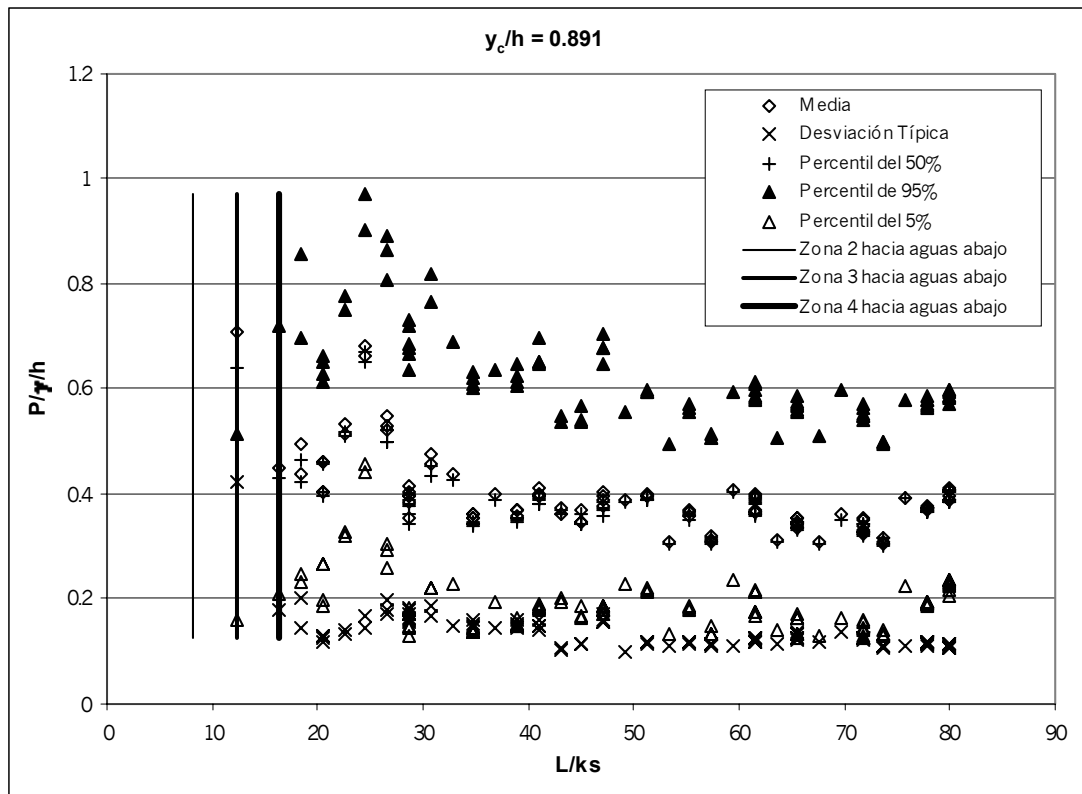


Figura 4.7. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la huella de un escalón. $y_c/h = 0.891$.

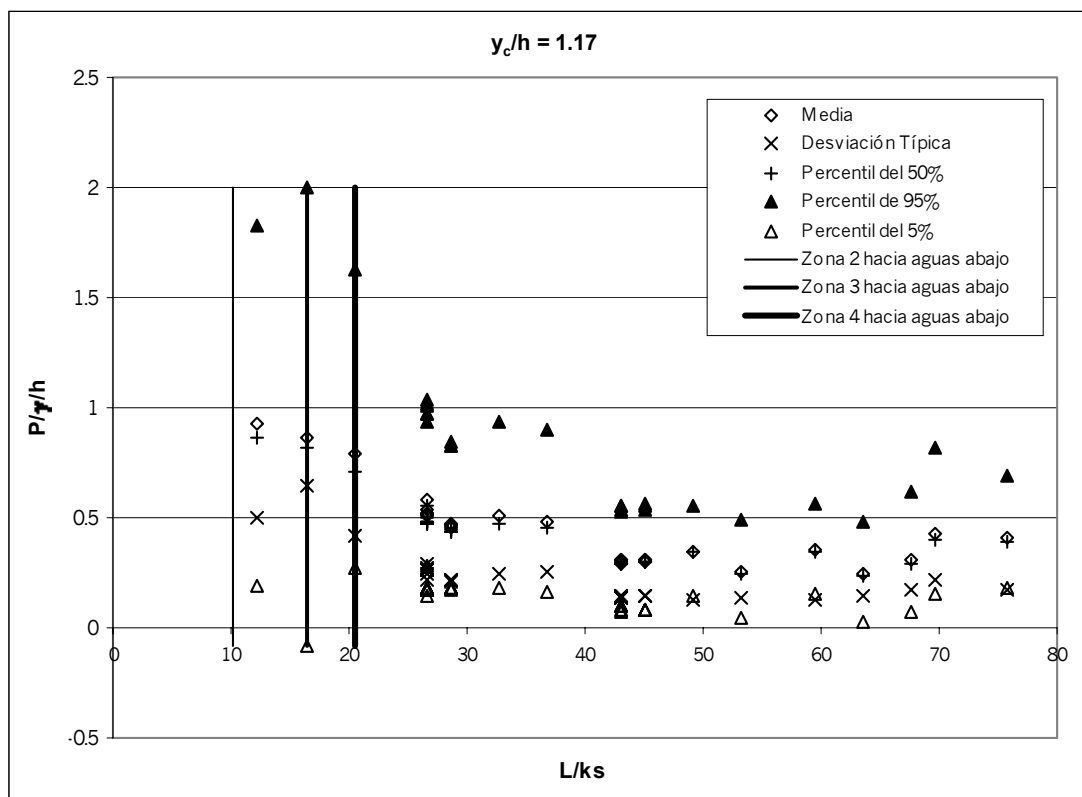


Figura 4.8. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la huella de un escalón. $y_c/h = 1.17$.

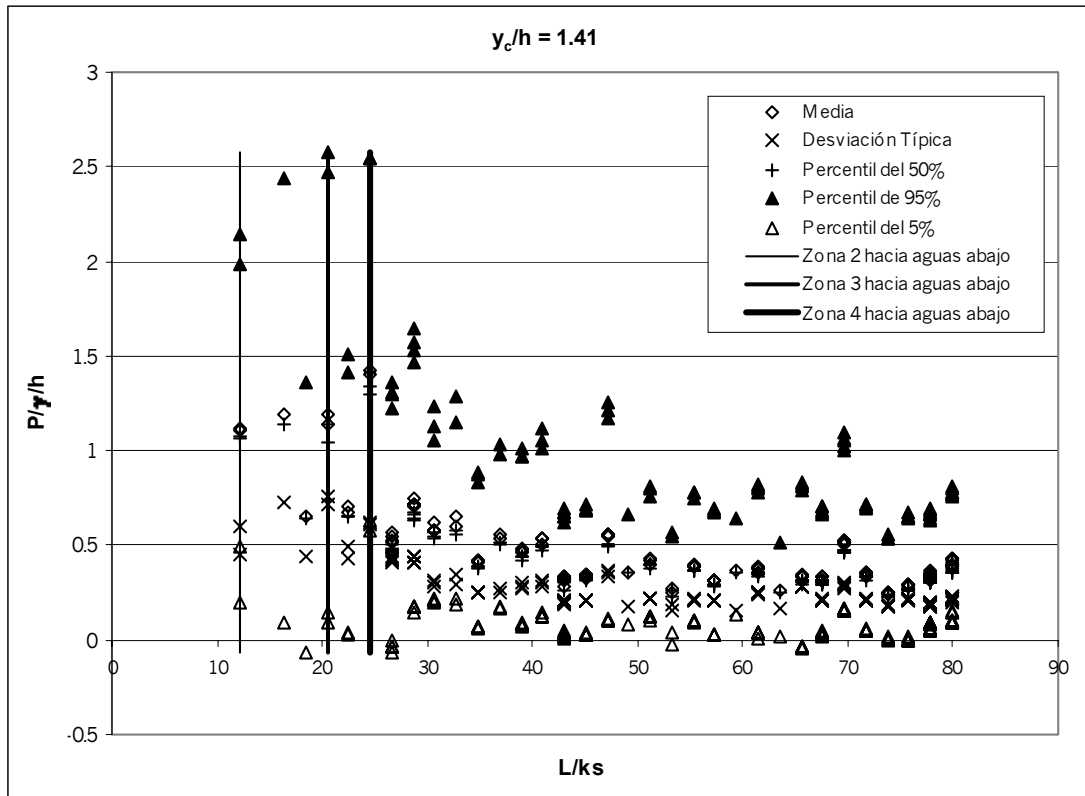


Figura 4.9. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la huella de un escalón. $y_c/h = 1.41$.

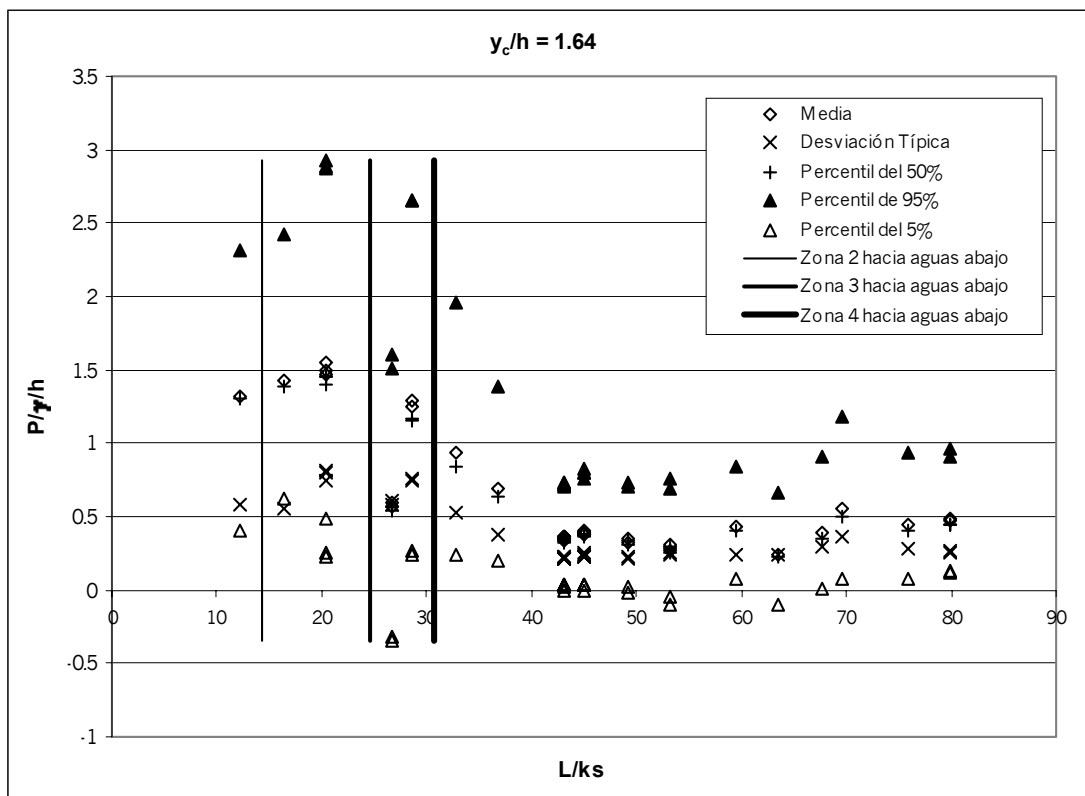


Figura 4.10. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la huella de un escalón. $y_c/h = 1.64$.

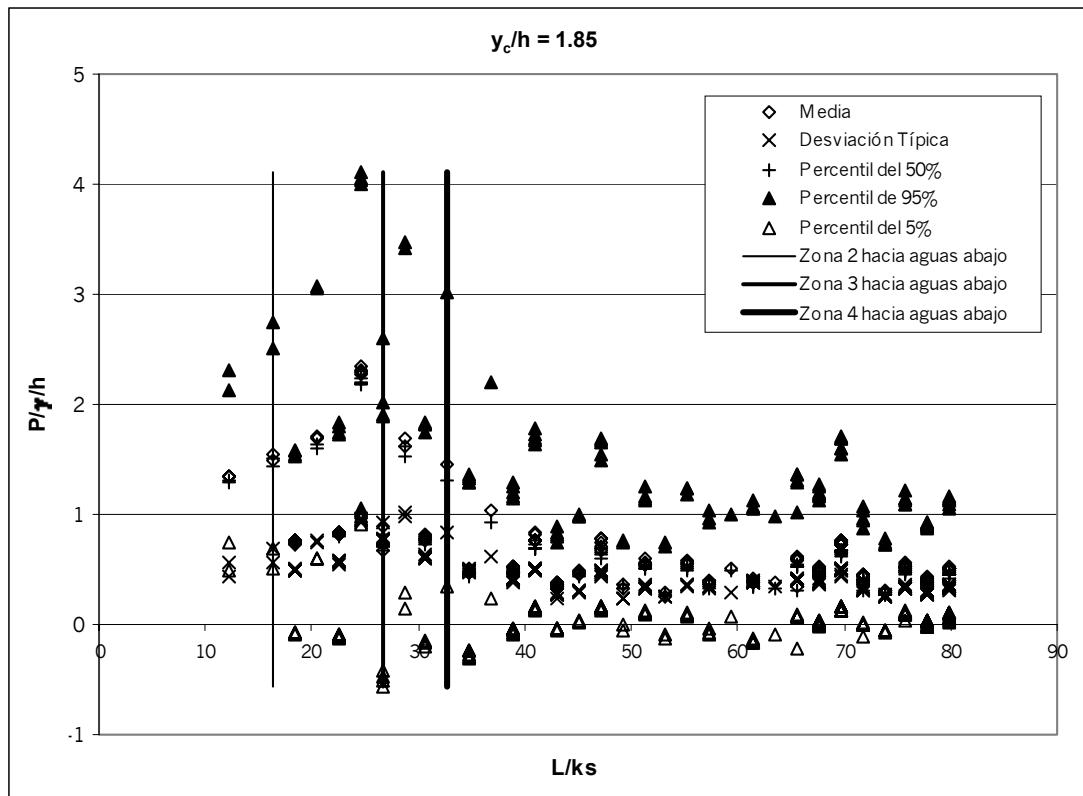


Figura 4.11. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la huella de un escalón. $y_c/h = 1.85$.

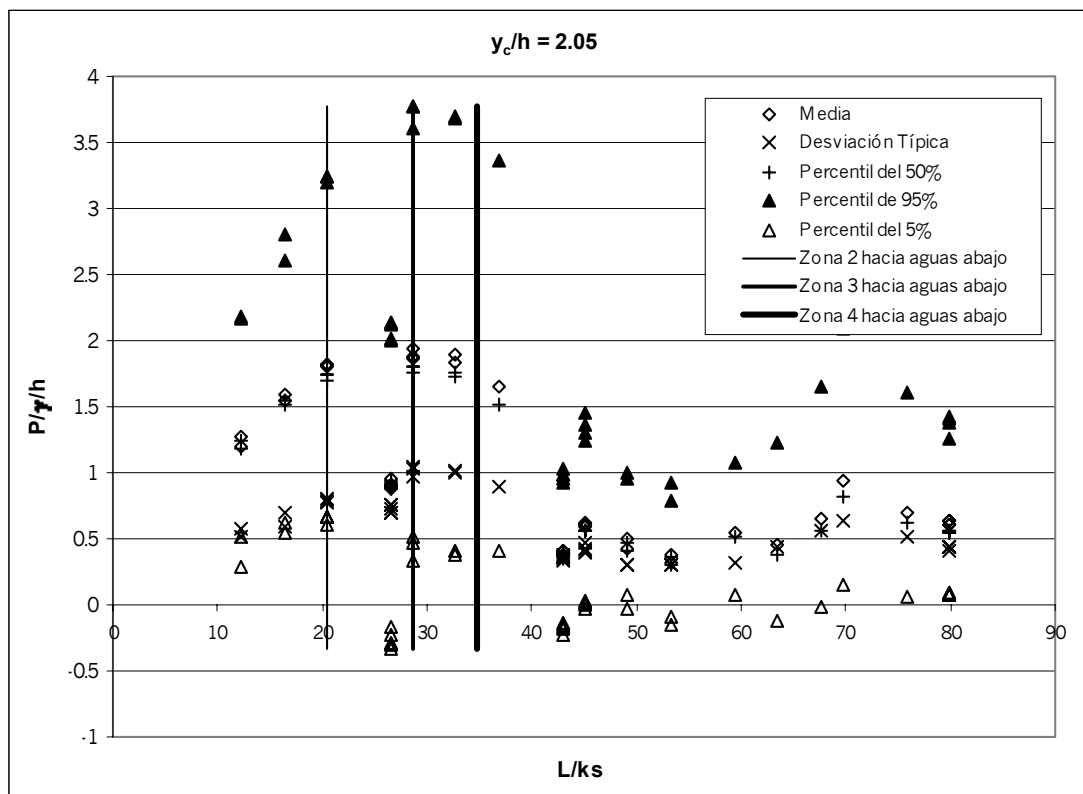


Figura 4.12. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la huella de un escalón. $y_c/h = 2.05$.

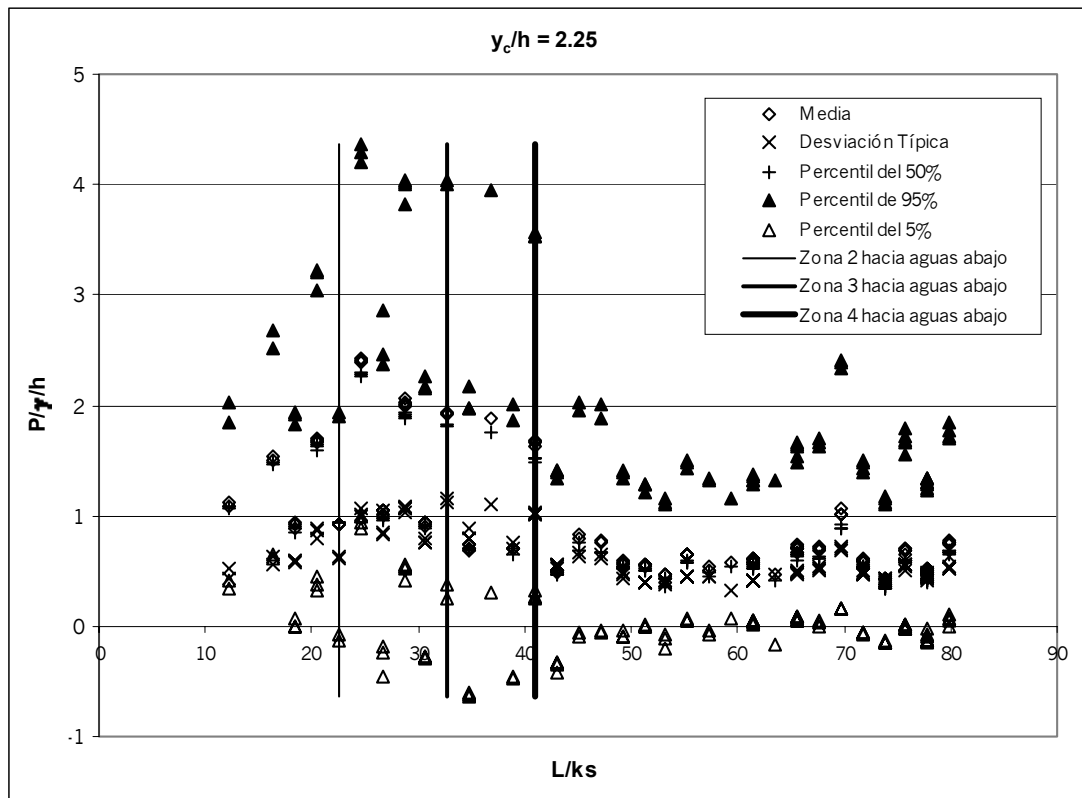


Figura 4.13. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la huella de un escalón. $y_c/h = 2.25$.

Se distinguen dos zonas diferenciadas por la magnitud de la presión y delimitadas por la sección en la que puede considerarse la completa aireación del flujo (*Zona 4*). Aguas arriba de dicha sección los valores de la presión tienden a ir aumentando hasta la sección en la que la incorporación de aire al flujo ha cubierto todo el ancho de la rápida (*Zona 3*) –desde el umbral hasta la vertical intermedia de los gráficos anteriores–. A partir de esa sección a medida que la concentración de aire va aumentando en el flujo, y por tanto su densidad tiende a ir disminuyendo hasta un valor de equilibrio, la presión tiende a reducirse. Una vez el flujo se encuentra completamente aireado (*Zona 4*) la característica más destacable que puede observarse de todos los gráficos anteriores es el comportamiento ondulatorio estacionario de la presión para todos los caudales ensayados, siendo más acusado a medida que estos aumentan.

Las máximas sollicitaciones sobre el aliviadero se observan para el máximo caudal ensayado, tal y como cabría esperar. Más concretamente, se aprecia como el máximo se alcanza en la *Zona 2* con valores de la presión máxima del orden de 4.2, mientras que en la *Zona 4* caen hasta aproximadamente 2.5. Muy próximo a la *Zona 2* se detectan los valores mínimo de las presiones rondando los -0.5 , subiendo hasta -0.25 en la *Zona 4*. El comportamiento es muy similar en cuanto las presiones medias que muestran valores próximos a 2.5 en la *Zona 2* bajando a 0.5 en la *Zona 4*.

Así, puede concluirse que en un aliviadero escalonado los tramos donde son más extremas las presiones ejercidas por el flujo, corresponden a la *Zona 2* y *Zona 3*, regiones en las que se establece la entrada de aire en el flujo. Esta es una región variable con el caudal, tanto en su posición como en su longitud, tal y como se ha destacado en el apartado 3.2.2. Es interesante, por tanto, prever donde se encontrará dicha zona y su longitud en función del caudal.

Como se ha visto, en la región de flujo plenamente desarrollado (*Zona 4*), las presiones tienden a ser menores –en valor absoluto– tanto en lo que se refiere a las presiones máximas como a las mínimas, y hay que destacar la existencia de ligeras presiones negativas. Ello hace aconsejable estudiar con detalle la distribución de las presiones sobre los peldaños a fin de acotar, sobre todo, las presiones negativas en este tipo de estructuras.

3.2.3.1. Análisis del posible establecimiento del flujo uniforme

En los gráficos de la Figura 4.14 y Figura 4.15 se ha ampliado, respectivamente, el comportamiento de la presión media y de la desviación típica en la zona de flujo completamente desarrollado. En estos gráficos puede observarse el comportamiento ondulante aproximadamente estacionario que se ha descrito anteriormente y con clara coincidencia de fase (coincidencia de máximos y mínimos al considerar diferentes caudales).

Obsérvese como en el comportamiento de las presiones medias los picos tienden a valores tanto mayores cuanto mayor sea el caudal circulante mientras que los valles de la presión media son siempre mayores que $p/\gamma h = 0.25$. En ningún caso aparecen presiones medias negativas, como efecto de la importante aireación del flujo en esta zona. Nótese que con el menor caudal ensayado $y_c/h = 0.891$, que se encontraba muy cercano al umbral de cambio de flujo (ver apartado 3.2.1), el carácter ondulante es mucho menos acusado. Ello parece lógico ya que en el flujo escalón a escalón existe un idéntico comportamiento hidráulico en los diferentes peldaños.

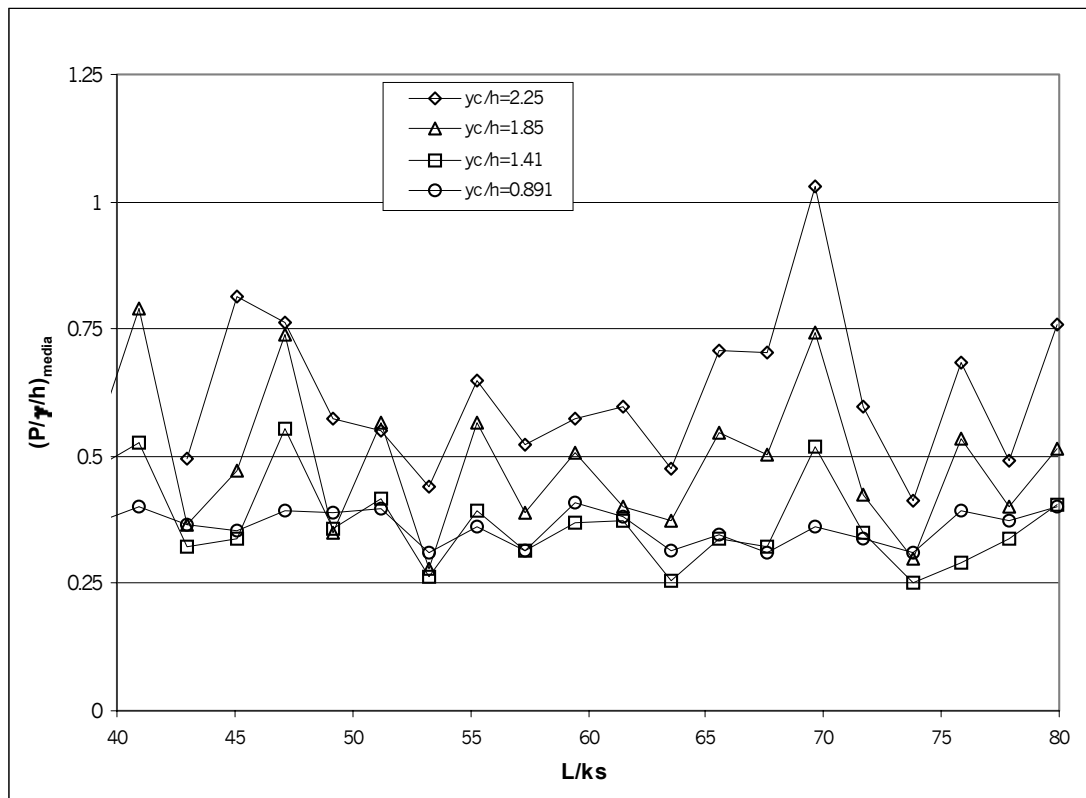


Figura 4.14. Comportamiento de los valores medios, en la zona de flujo completamente desarrollado en los puntos medios de los peldaños.

Por otro lado el comportamiento ondulante sigue apreciándose en la desviación típica de los registros a lo largo del aliviadero. En este caso las diversas estimaciones realizadas se separan más claramente según los diversos caudales ensayados, de manera que como era lógico esperar se muestra una mayor variabilidad en las presiones sobre el centro de simetría de las huellas cuanto mayor es el caudal circulante. En el caso de la desviación típica registrada en los ensayos con el menor de los caudales $y_c/h = 0.891$, el comportamiento ondulante se amortigua considerablemente si se compara con el observado para los caudales mayores.

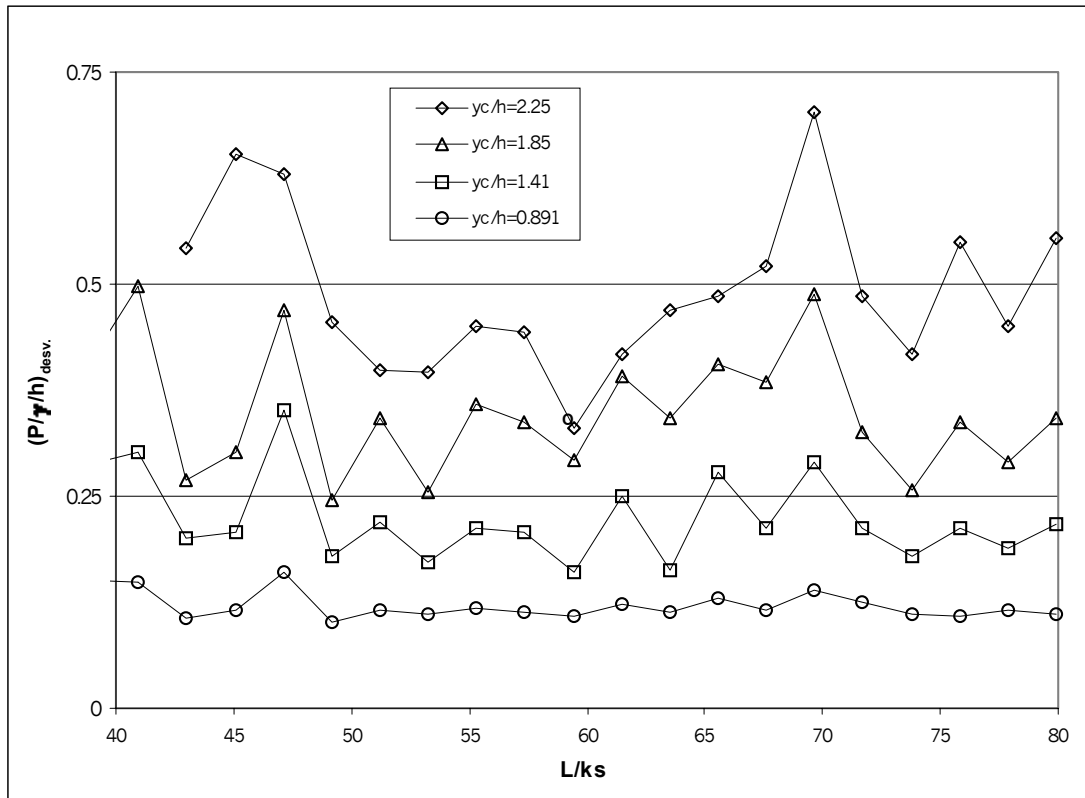


Figura 4.15. Comportamiento de la desviación típica, en la zona de flujo completamente desarrollado en los puntos medios de los peldaños.

3.2.4. Evolución de la presión sobre las huellas. Cresta del aliviadero funcionando en carga.

En la Tabla 4.1 se han mostrado los escalones y caudales ensayados en esta experiencia. Para su desarrollo se construyó en madera una plancha de un metro de longitud, como se muestra en la Figura 4.16, que cubriera todo el ancho de la rápida. Se añadieron cuatro brazos metálicos que mediante unas escuadras metálicas que se atornillaban al cajero de la estructura permitieron modificar la abertura del conducto cerrado que se formaba. Ello era importante para evitar que en el canal de aproximación se levantara excesivamente la lámina de agua y pudiera provocar el rebose del mismo. Así se entiende que la limitación de esta experiencia se presentó en dicho canal de aproximación, que antes del desarrollo de estas pruebas fue recrecido, hasta el máximo razonable que permitía la instalación, para conseguir disponer de algo más de capacidad.

La plancha se colocaba paralela a la zona de pendiente uniforme, tal y como puede observarse en la Figura 4.17, para facilitar la consecución del flujo uniforme aguas abajo de la misma.

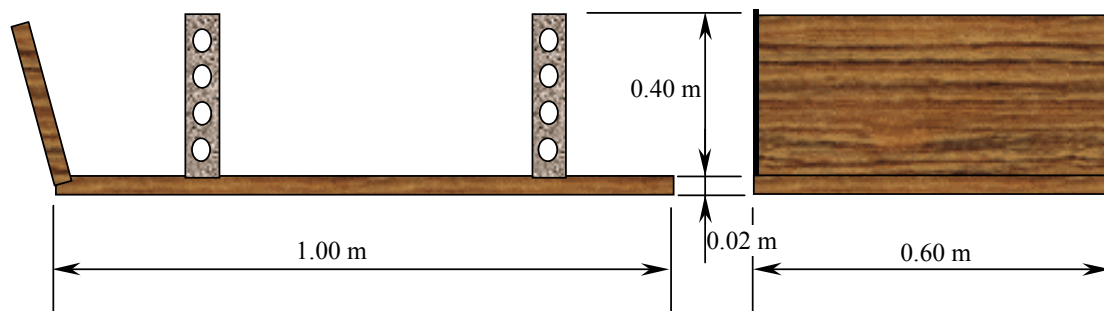


Figura 4.16. Esquema del elemento que se utilizó para cubrir el umbral del aliviadero, a fin de conseguir una entrada en carga de la rápida.

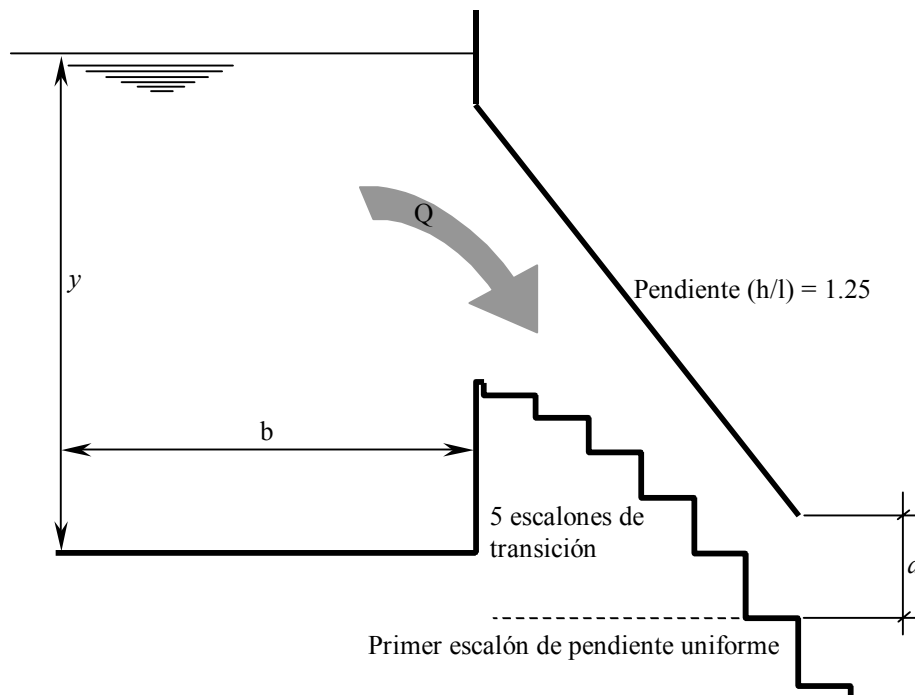


Figura 4.17. Esquema de la ubicación en el modelo del elemento para conseguir la entrada en carga a la rápida. Los calados en la aproximación al aliviadero se midieron a una distancia b del umbral. La variable a corresponde a la distancia vertical sobre el primer escalón de altura uniforme a la que se encuentra la plancha.

Tabla 4.5. Caracterización geométrica, para los distintos caudales ensayados, del elemento para conseguir la entrada en carga a la rápida esquematizado en la Figura 4.17. Comparación del flujo de llegada con la situación en la que el umbral se encuentra en lámina libre.

Q (l/s)	y_c/h	b (m)	a (m)	y (umbral en carga) (m)	y (umbral en lámina libre) (m)
200	2.25	1.40	0.140	0.684	0.554
150	1.85	1.60	0.100	0.695	0.510
100	1.41	1.60	0.075	0.566	0.459

En la Tabla 4.5 se ha caracterizado la colocación y características en cabecera del flujo que se conseguía en cada caso ensayado. Es de interés mencionar que la abertura a de la plancha sobre la rápida, se estableció en cada caso de manera que la sobreelevación que produjera aguas arriba en el canal de aproximación no provocara el desbordamiento del mismo. Se apreciará como la colocación del citado elemento permitió que el flujo partiera de cabecera con una mayor carga a fin de conseguir ganar algo de velocidad para favorecer la formación de un flujo completamente desarrollado algo más aguas arriba de lo que se conseguiría en condiciones naturales. Este efecto queda reflejado en los gráficos de la Figura 4.18 a la Figura 4.21, en el que se observa como evolucionan las presiones a lo largo del aliviadero para el máximo caudal ensayado ($y_c/h = 2.25$). Se aprecia en tal situación como al cambiar la condición de contorno en la entrada de la rápida el comportamiento de las presiones no cambia substancialmente en cuanto a su forma global. Si bien al entrar el flujo a la rápida con una velocidad algo mayor se observa un impacto más grande (mayores presiones) en los escalones anteriores a la sección en la que se establece el flujo completamente aireado. Aguas abajo de dicha sección el comportamiento de las presiones bajo ambas condiciones es muy parecido en cuanto a su aspecto ondulante, siendo distinto en cuanto a su magnitud debido seguramente a las distintas condiciones de contorno que dirigen ambos ensayos.

La Zona 4 se establece más aguas arriba, lo que es lógico puesto que el dispositivo de entrada en carga hace que se establezca antes el flujo completamente desarrollado, y por tanto la aireación completa.

En los gráficos de la Figura 4.22 y la Figura 4.23 se presenta la misma comparación para dos caudales inferiores ($y_c/h = 1.41$ e $y_c/h = 1.85$). A la vista de lo expuesto anteriormente se tomó en estos dos casos

únicamente cuatro puntos de control aguas abajo del escalón $L/k_s = 65$. Es interesante destacar como el comportamiento ondulante se mantiene y que los registros para ambas condiciones de flujo tienden a ser tanto más parecidos, en las secciones ensayadas, cuanto menor es el caudal circulante.

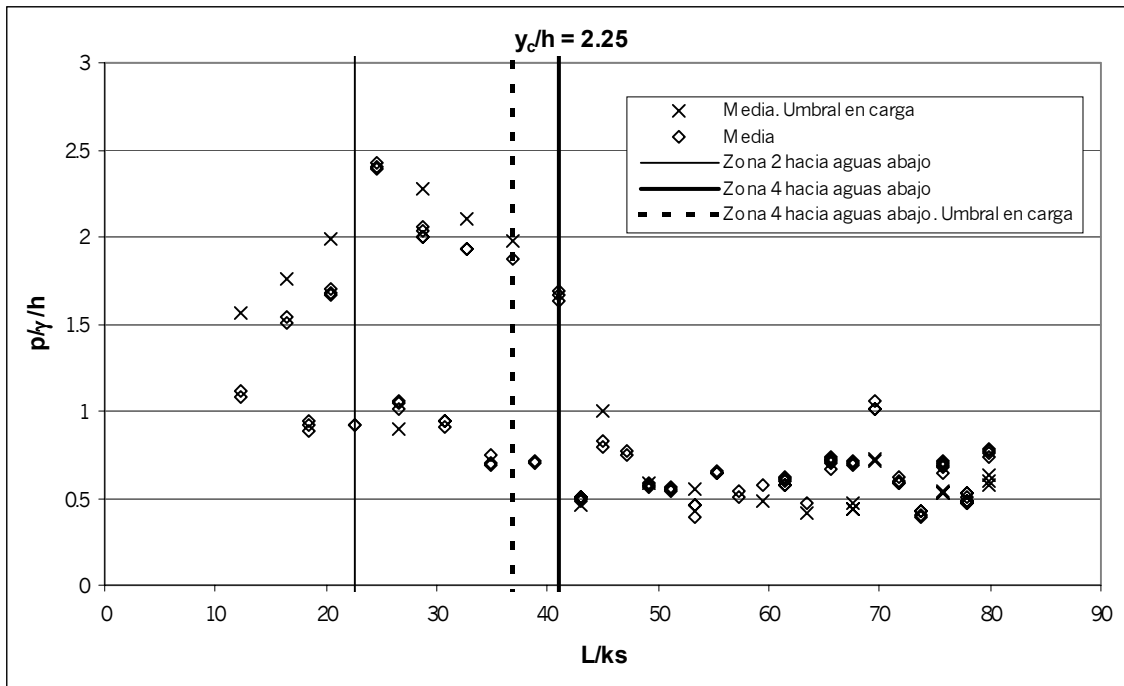


Figura 4.18. Comparación de la presión media obtenida en los ensayos llevados a cabo bajo condiciones de umbral en lámina libre y umbral en carga. Caudal $y_c/h = 2.25$.

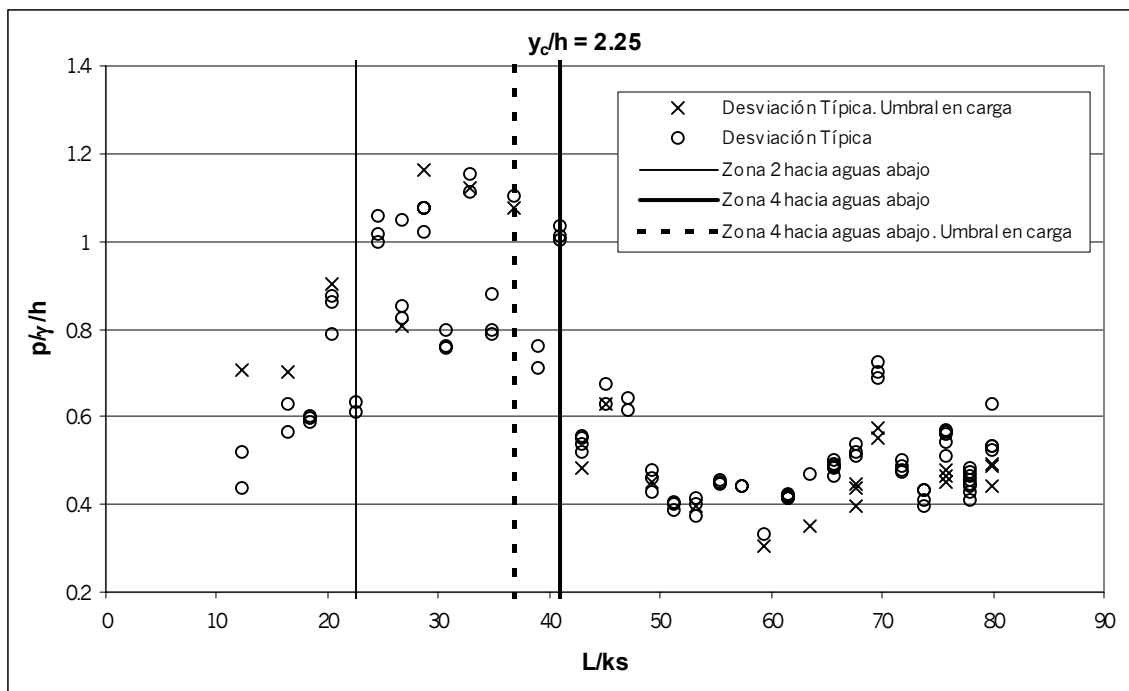


Figura 4.19. Comparación de la desviación típica obtenida en los ensayos llevados a cabo bajo condiciones de umbral en lámina libre y umbral en carga. Caudal $y_c/h = 2.25$.

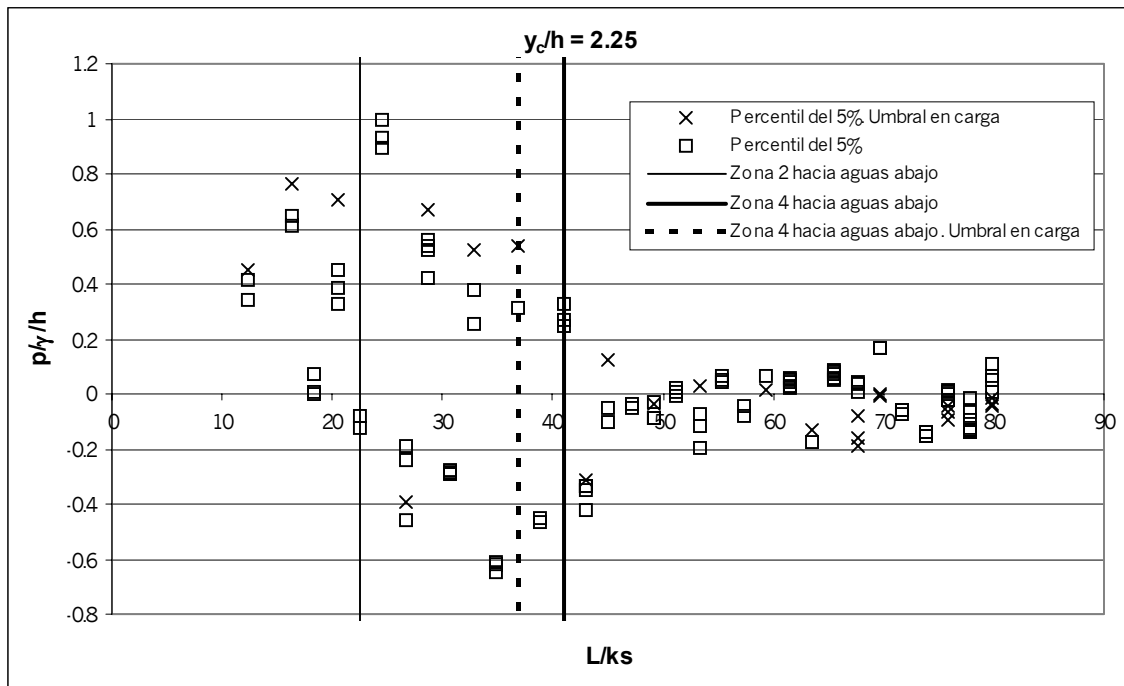


Figura 4.20. Comparación del percentil del 95% obtenido en los ensayos llevados a cabo bajo condiciones de umbral en lámina libre y umbral en carga. Caudal $y_c/h = 2.25$.

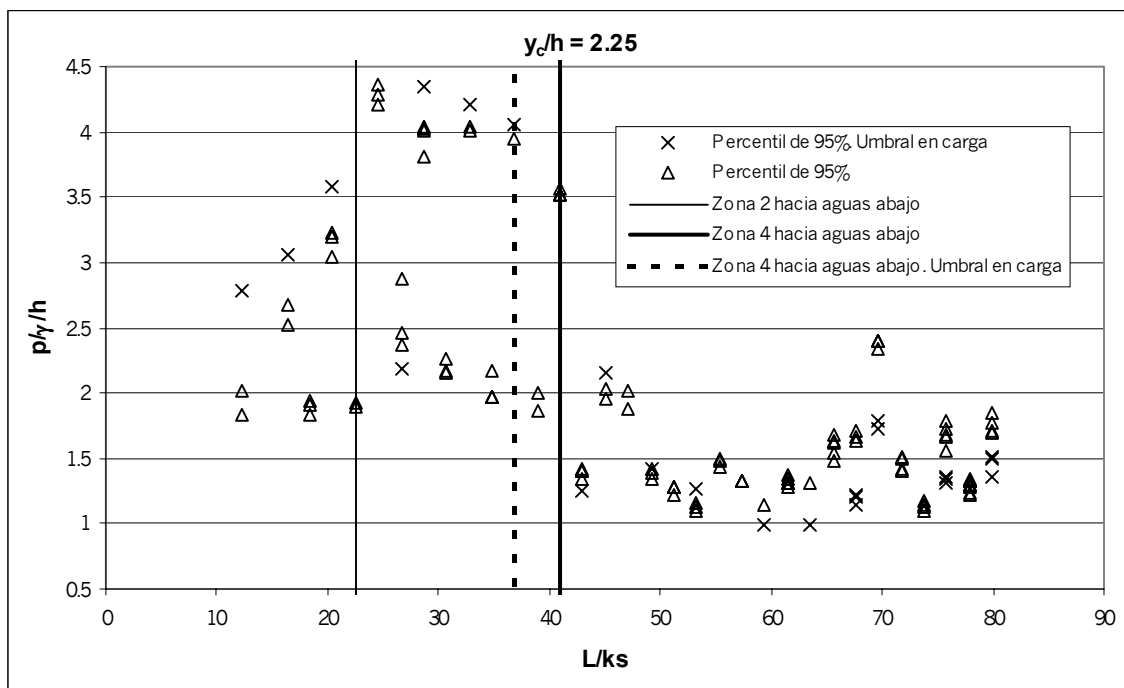


Figura 4.21. Comparación del percentil del 5% obtenido en los ensayos llevados a cabo bajo condiciones de umbral en lámina libre y umbral en carga. Caudal $y_c/h = 2.25$.

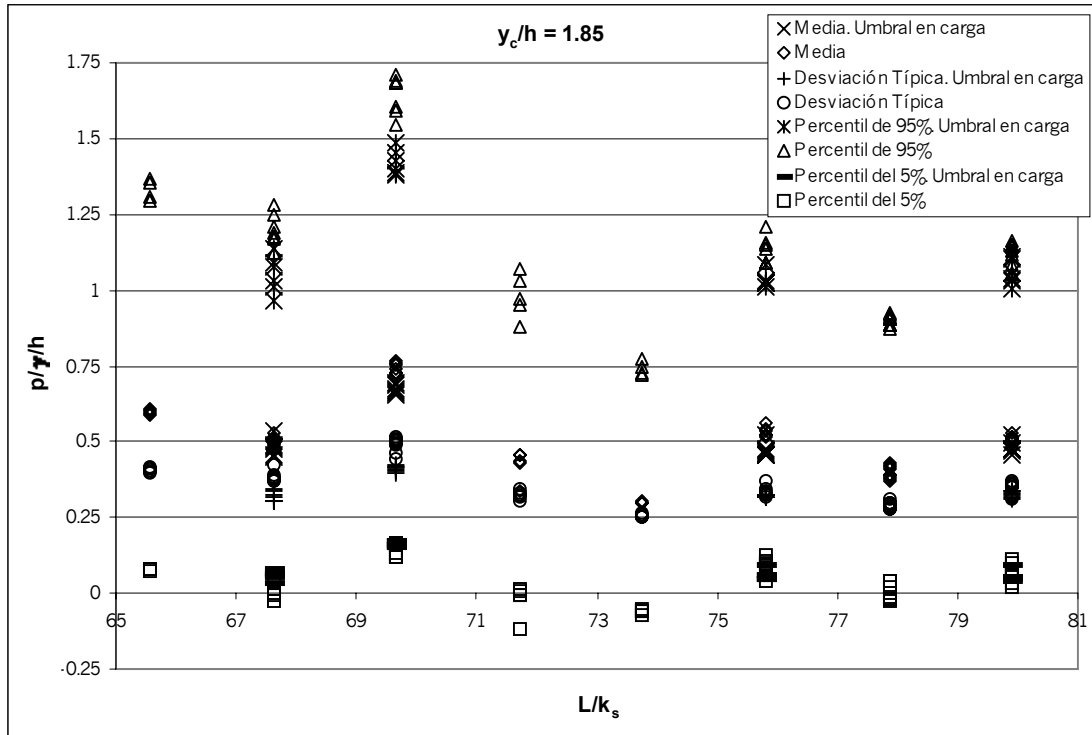


Figura 4.22. Comparación de los ensayos llevados a cabo bajo condiciones de umbral en lámina libre y umbral en carga. Caudal $y_c/h = 1.85$.

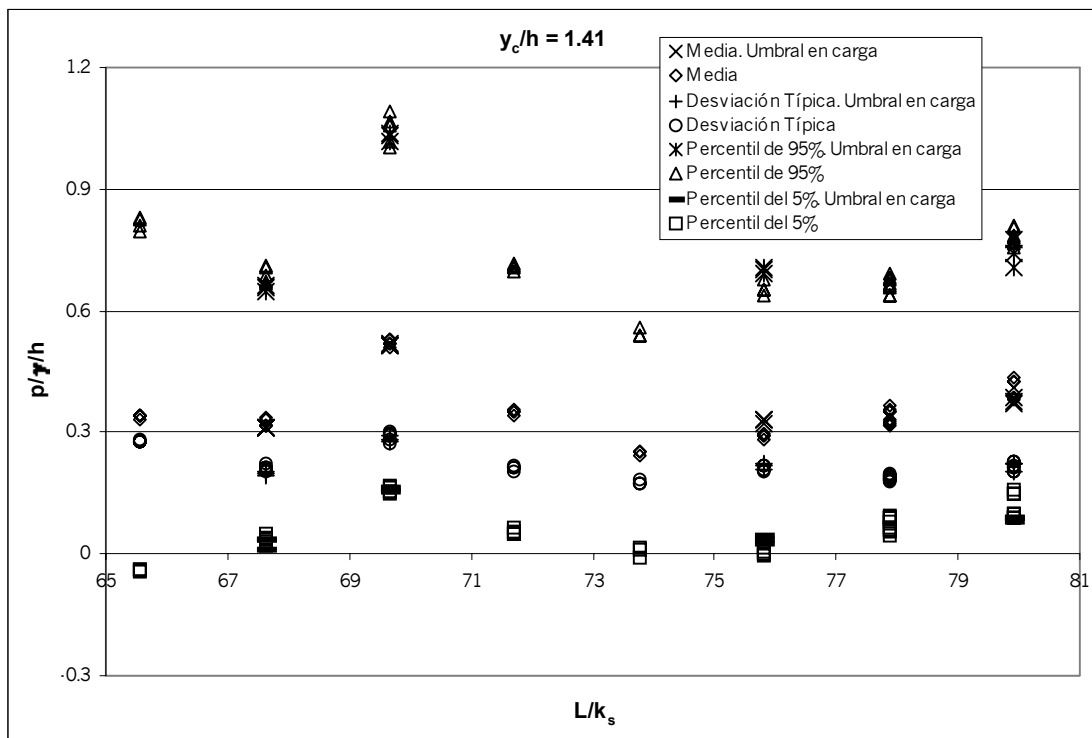


Figura 4.23. Comparación de los ensayos llevados a cabo bajo condiciones de umbral en lámina libre y umbral en carga. Caudal $y_c/h = 1.41$.

3.2.5. Evolución de las presiones sobre las contrahuellas

Midiendo las presiones sobre el centro de simetría de las contrahuellas se intuye el mismo comportamiento ondulante estacionario que anteriormente se ha descrito. En este caso se observarán valores medios y mínimos más pequeños que los estimados sobre el centro de simetría de las huellas. Indudablemente ello es debido a que en este caso se presenta una cierta tendencia a la separación de flujo respecto del contorno contrariamente a lo que sucedía en las huellas, tal y como se verá en el apartado 4.

En la Figura 4.24 a la Figura 4.30 se presentan los resultados obtenidos. Igualmente a lo que sucedía en las huellas se observa un comportamiento distinto según se analice una sección arriba o abajo de la sección de inicio de aireación completa.

Análogamente a los comentarios realizados en el apartado 3.2.3 acerca de la evolución de la presión sobre las huellas, en las contrahuellas las solicitaciones extremas (máxima y mínima presión) se producen sobre el tramo de aliviadero en la que el flujo se encuentra parcialmente aireado (*Zona 2* y *Zona 3*).

En este caso han llegado a medirse valores de $p/\gamma h$ desde 1 (percentil del 95%) hasta -1.5 (percentil del 5%). Sobre la zona de flujo completamente aireado (*Zona 4*) las presiones caen hasta 0.5 y -0.25 respectivamente.

Parece interesante destacar que sobre las contrahuellas existe una mayor tendencia a mostrar presiones negativas que en caso de las huellas. Por ello se subraya el interés en conocer como afecta a la distribución de la presión los fenómenos de separación del contorno de los vórtices atrapados bajo el flujo rasante principal.

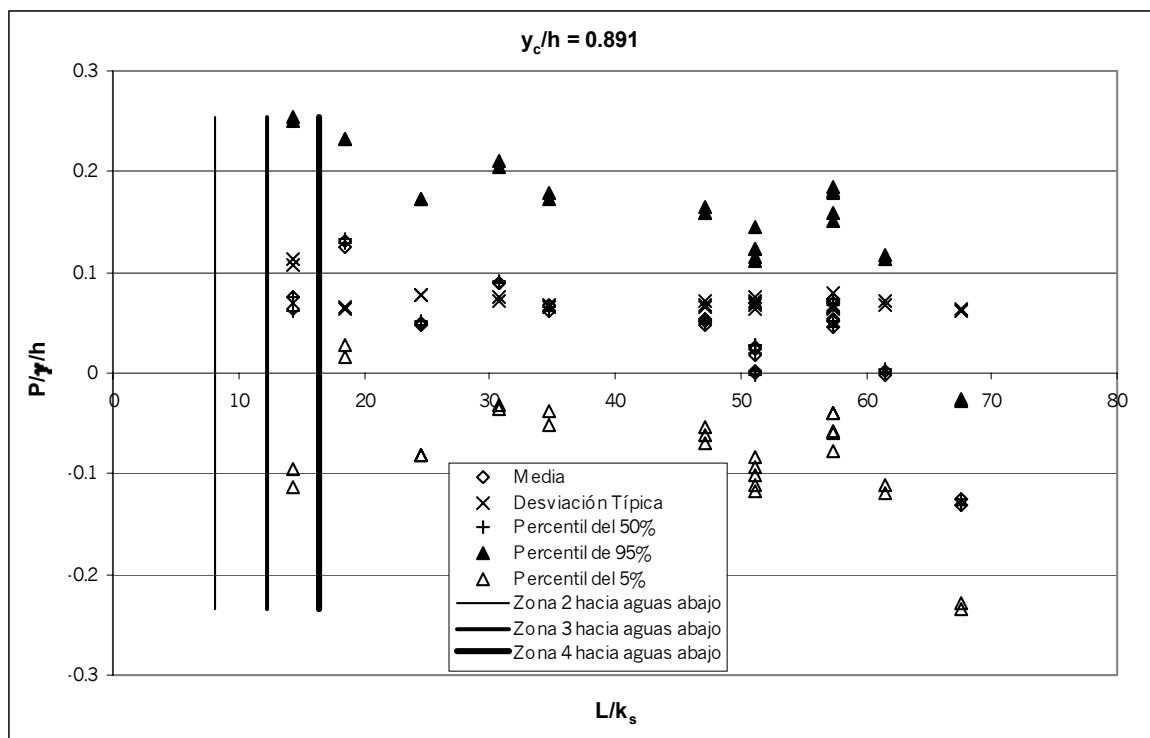


Figura 4.24. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la contrahuella de un escalón. $y_c/h = 0.891$.

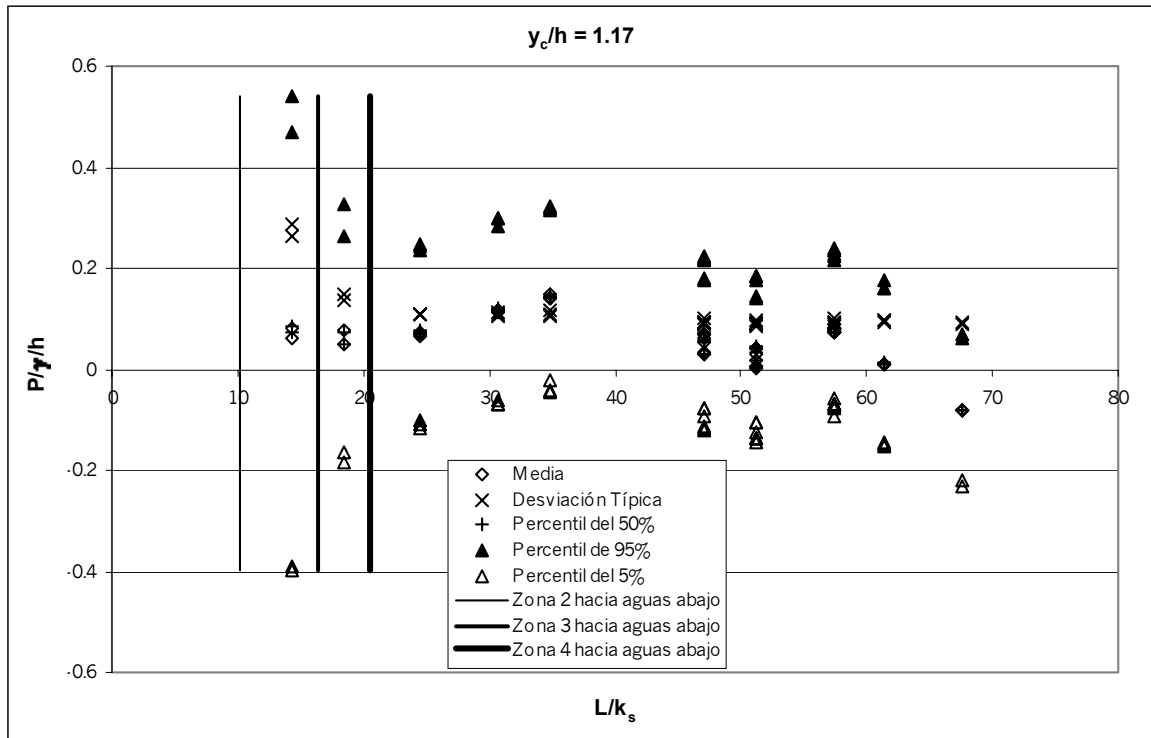


Figura 4.25. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la contrahuella de un escalón. $y_c/h = 1.17$.

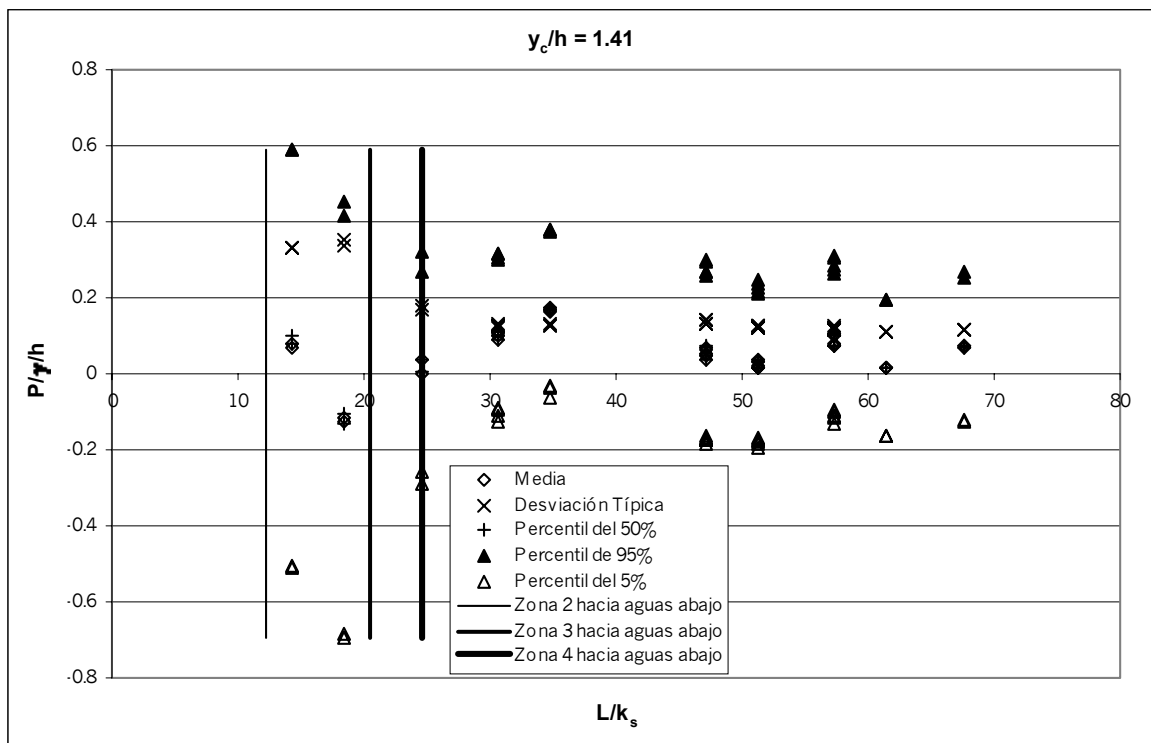


Figura 4.26. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la contrahuella de un escalón. $y_c/h = 1.41$.

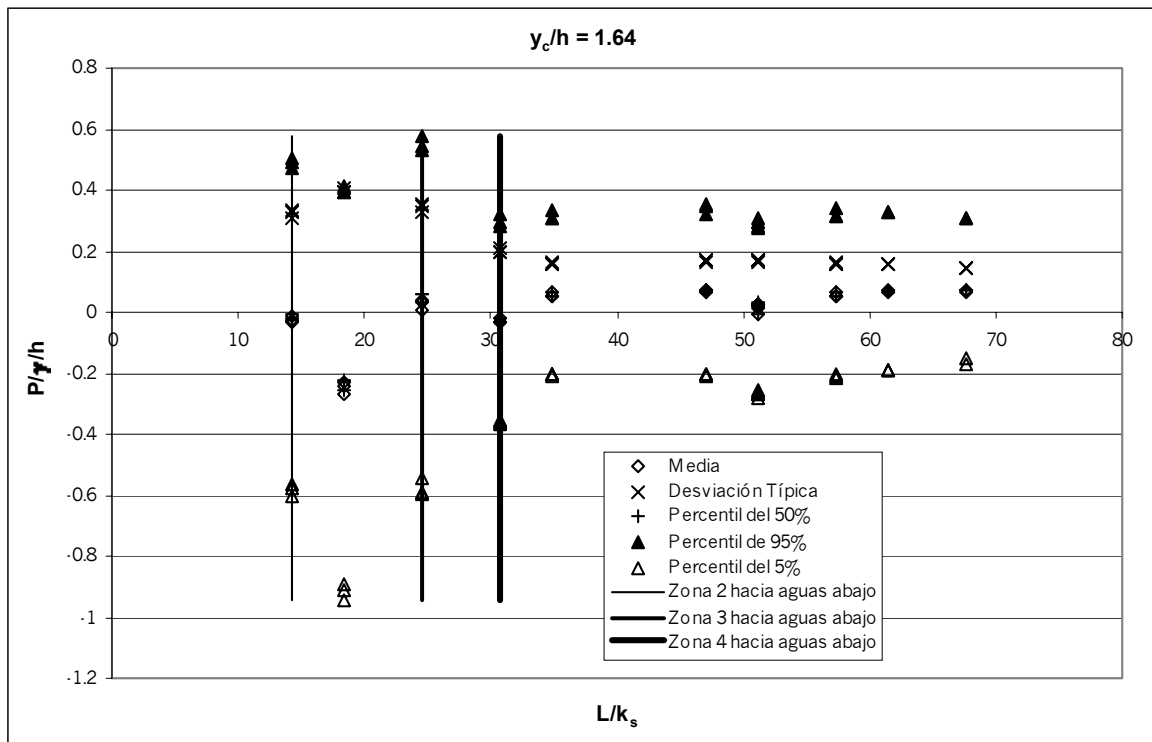


Figura 4.27. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la contrahuella de un escalón. $y_c/h = 1.64$

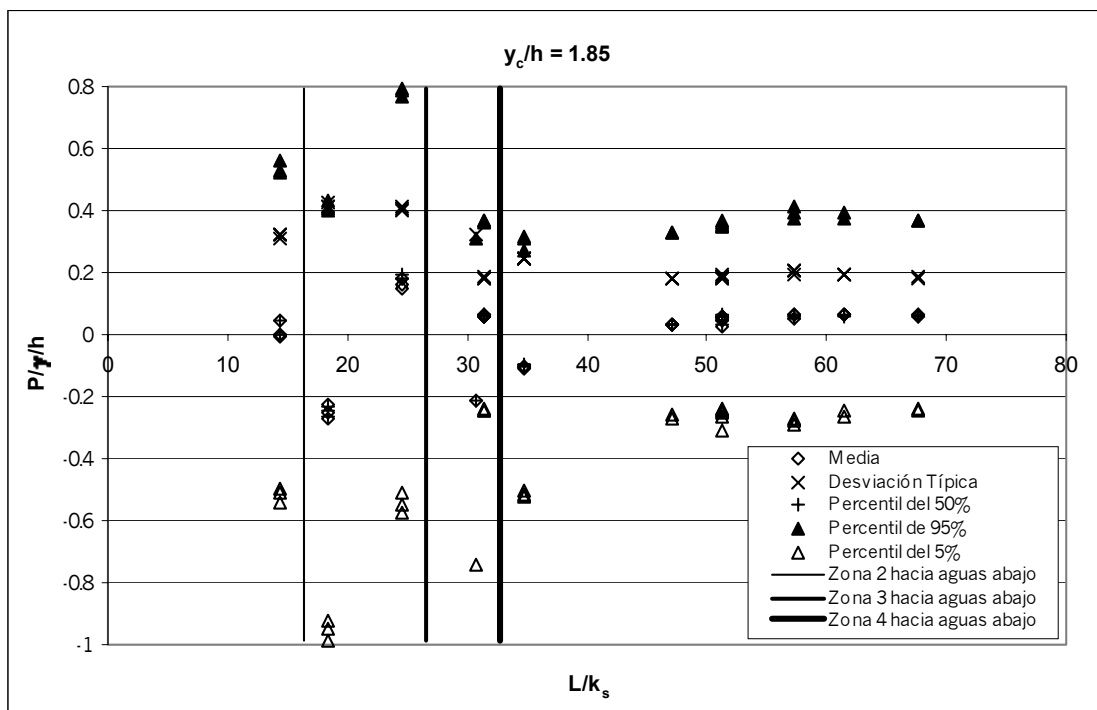


Figura 4.28. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la contrahuella de un escalón. $y_c/h = 1.85$.

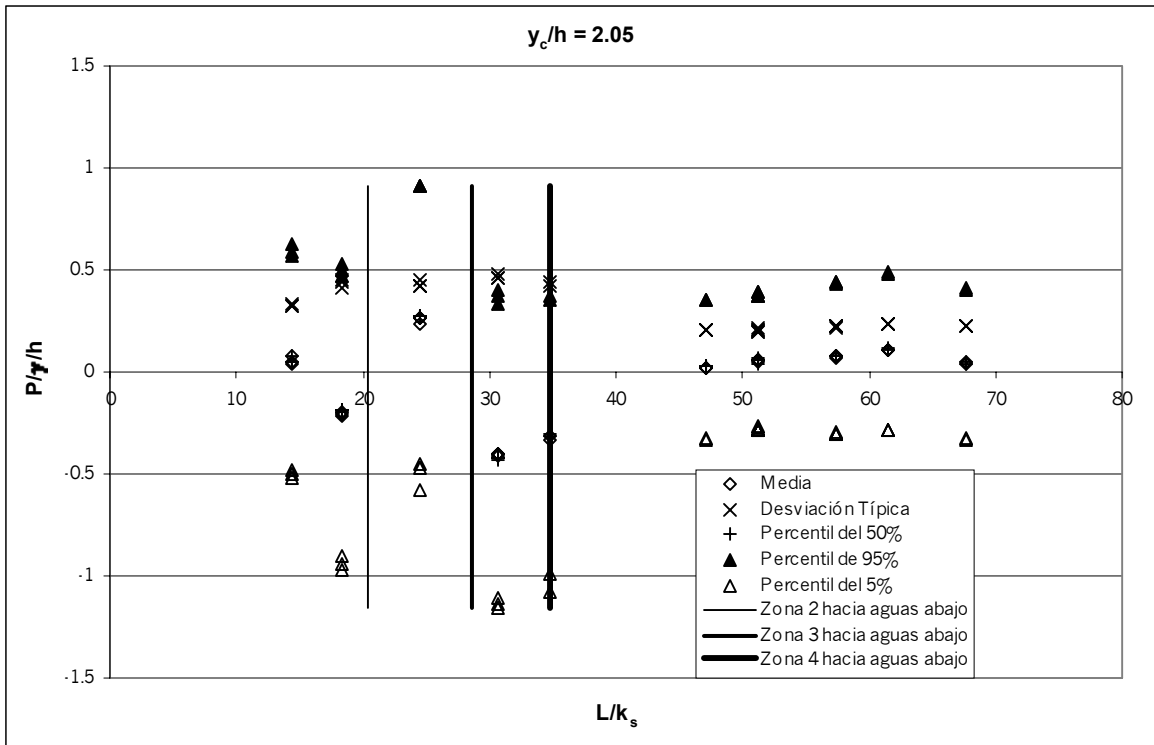


Figura 4.29. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la contrahuella de un escalón. $y_c/h = 2.05$.

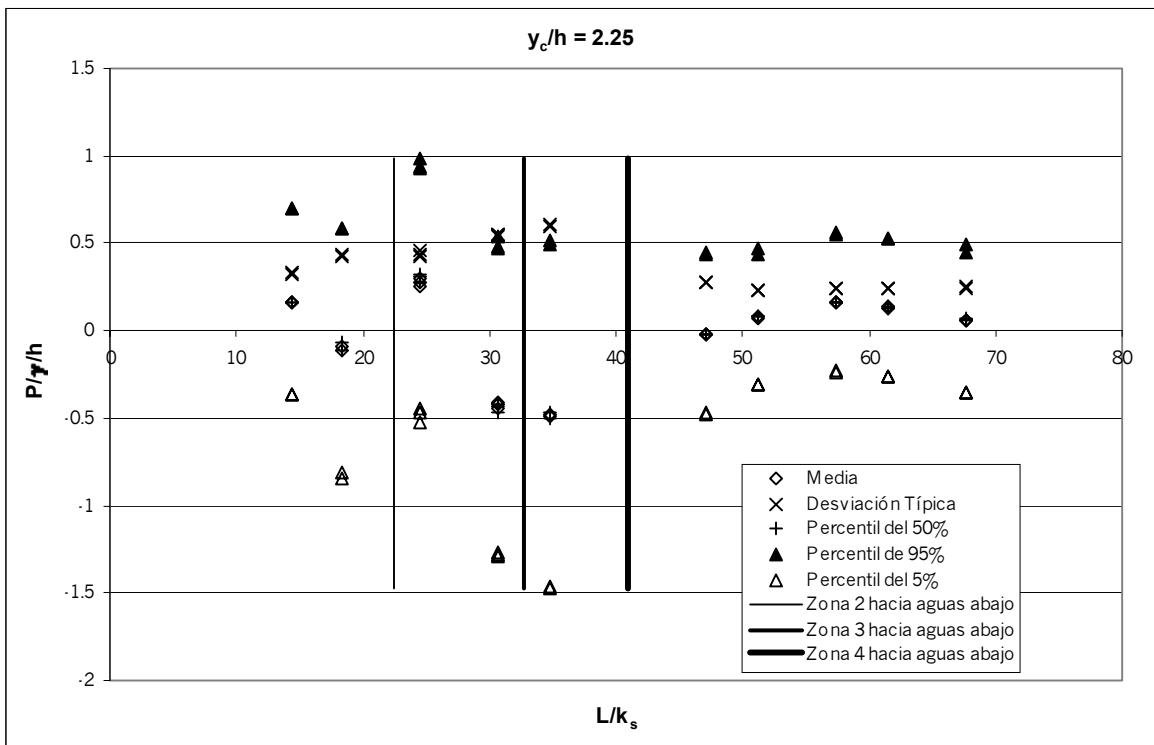


Figura 4.30. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Punto de medida en el centro de simetría de la contrahuella de un escalón. $y_c/h = 2.25$.

4. Distribución de la presión sobre los escalones

4.1. Objetivos y metodología de trabajo

Se han medido los perfiles de las presiones sobre la huella y contrahuella de dos peldaños distintos, para todo el rango de caudales tanto primarios como secundarios (ver apartado 3.1 de este capítulo). En este caso el objetivo fijado fue el de caracterizar las solicitaciones normales que el flujo ejerce sobre los peldaños, así como, analizar donde se producen dichas solicitaciones. Las medidas se han realizado sobre las huellas de los escalones 11° y 14° , así como sobre las contrahuellas de los peldaños 12° y 15° , contados siempre desde aguas abajo. Se eligieron dichos peldaños como representativos de un máximo y un mínimo, respectivamente, de la onda estacionaria de las presiones registradas, sobre el centro de simetría de un peldaño, a lo largo de la rápida.

Se supone que esta zona del aliviadero donde se encuentran los citados escalones, está situada fuera de la influencia de las condiciones de entrada y por tanto existe un flujo uniforme u ondulante estacionario.

Debido al tamaño de los peldaños ($h = 0.10 \text{ m}$, $l = 0.08 \text{ m}$) y los tubos a los cuales se conectaron los sensores ($\phi = 0.006 \text{ m}$), la ubicación de los puntos de medida para la obtención de un perfil de presiones se realizó tal y como se esquematiza en la Figura 4.31, tanto sobre la huella como sobre la contrahuella del escalón.

Se admite que en la zona de ubicación de los sensores, el flujo es bidimensional (tal y como se ha justificado en el apartado 5 del capítulo 3) de esta manera se podrá analizar la distribución espacial de las presiones a lo largo del eje ee' (Figura 4.31).

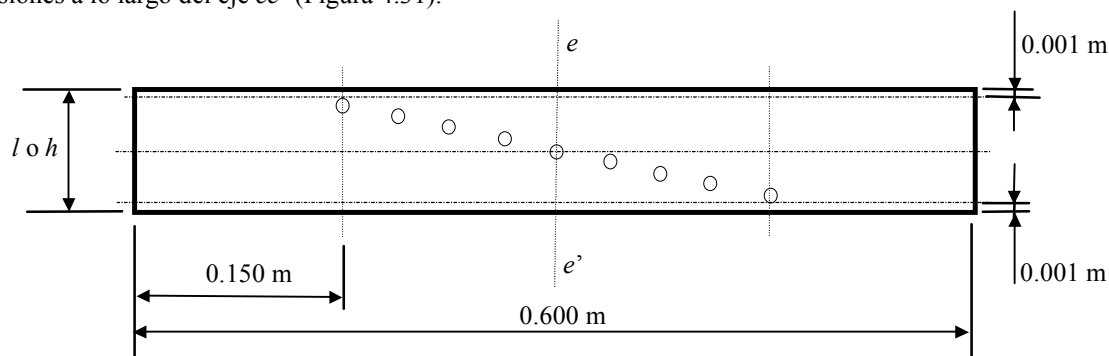


Figura 4.31. Ubicación de los puntos de medida de los perfiles de presiones.

4.2. Resultados

4.2.1. Distribución de presiones sobre la huella

Frizell et al. (1991), Elviro et al. (1992), y Tozzi (1992) describieron el perfil de las presiones dinámicas sobre un escalón. En las tres referencias se presentan estimaciones de la distribución de presiones obtenidas, no obstante en las dos primeras los resultados no son directamente comparables con los aquí presentados debido a que la geometría es diferente: talud más tendido en el caso de Frizell (1991) y existencia de un biselado en la arista de los peldaños en el caso de Elviro et al. (1992). En el apartado 7, se discuten los resultados obtenidos por los diversos autores comparándose con los obtenidos en esta tesis. Con todo ello, en los tres trabajos anteriores, se distinguen dos regiones diferentes sobre la huella del escalón:

- Extremo aguas abajo de la huella del escalón: el flujo impacta sobre él, produciéndose allí una sobrecarga adicional.
- Aguas arriba de la mitad del escalón el flujo tiende a separarse del contorno pudiendo llegar a medirse, allí, presiones negativas.

De acuerdo con Mateos et al. (1992), las máximas fluctuaciones de presión serán inferiores en prototipo que en modelo debido a fenómenos de escala relacionados con la aireación del flujo, puesto que en prototipo serán de esperar mayores concentraciones de aire que las existentes en modelo reducido, lo cual redundará en menores fluctuaciones de la presión.

Tal como ya ha sido citado, las medidas se han llevado a cabo sobre las huellas de dos escalones ($L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$) en la zona en la que el flujo puede considerarse fuera de la influencia del vertido, como representativos, respectivamente, de un máximo y un mínimo de la onda estacionaria de las presiones registradas, sobre el centro de simetría de un peldaño, a lo largo de la rápida (apartado 3.2.3 de este capítulo).

En los gráficos de la Figura 4.32 a la Figura 4.39 se resumen los resultados obtenidos, mostrándose los valores medios, desviación típica, percentil del 5% y percentil del 95%. En ellos puede observarse como en cada punto de medida se presentan al menos dos registros que fueron tomados a fin de corroborar la repetibilidad del fenómeno. Cualquier tratamiento posterior de estos resultados se llevará a cabo a partir de los valores medios de los distintos registros obtenidos en cada punto de medida. De dichos gráficos pueden destacarse los siguientes aspectos:

- Pueden observarse las dos regiones citadas anteriormente, sobre la huella de un peldaño. A su vez ello está en correspondencia con el patrón de flujo obtenido en el Anejo 1.
- Los perfiles de los cuatro estadísticos representados, parecen mostrar un ligero desplazamiento de las curvas de presión hacia aguas abajo al disminuir el caudal.
- No parece que existan diferencias significativas entre los perfiles de $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, contra lo que en principio cabría esperar. A pesar de ello una inspección detallada de los resultados permite afirmar que, en la zona de la huella delimitada entre $0.2 < y/l \leq 0.5$, las presiones medidas son algo mayores en el peldaño $L/k_s = 69.66$ como corresponde al máximo de la onda estacionaria estimada sobre los centros de simetría de las huellas. Las presiones medidas en esta región estarían gobernadas principalmente por el vórtice encerrado entre el flujo rasante y la huella, así, la zona de huella más directamente afectada por el vórtice es la que presenta una evolución de presiones a lo largo del vertedero de carácter ondulante estacionario. De aquí se podría inferir que los vórtices no son idénticos en todos los peldaños sino que sus características deben presentar también una cierta ciclicidad. En cambio aguas abajo de esta zona, en la región más cercana a la arista exterior ($0 < y/l \leq 0.2$), la presión estará muy condicionada por el impacto del chorro rasante. Estos diferentes patrones de gobierno de las presiones sobre la huella del escalón pueden apreciarse en el gráfico de la Figura 4.40 en el que se muestra el cociente de las presiones medias obtenidas sobre la huella de los escalones $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, y análogamente con las desviaciones típicas de dichos registros en la Figura 4.41. Obsérvese como en la región más cercana a la contrahuella, entre $0.7 \leq y/l \leq 1.0$, el cociente de las medias muestra valores algo inferiores a 1.0, concretamente alrededor de 0.85 para los mayores caudales. En esa misma zona el cociente de las desviaciones típicas se encuentra en el entorno de 1.0. Si se analiza en cambio la zona central del peldaño, entre $0.2 \leq y/l \leq 0.7$, se apreciarán valores significativamente distintos de 1.0 tanto para el cociente de las presiones medias como para el de las desviaciones típicas. Se observa un comportamiento distinto entre $0.2 \leq y/l \leq 0.5$ y $0.5 \leq y/l \leq 0.7$ apareciendo valores superiores a 1.0 en el primero e inferiores a 1.0 en el segundo, ordenados aproximadamente en función del caudal circulante. Finalmente en la zona de impacto del flujo rasante, entre $0.0 \leq y/l \leq 0.2$, nótese como el cociente de las presiones medias se encuentra siempre alrededor de 1.0 mientras que el de las desviaciones típicas tiende a 1.0 cuanto más cerca de la arista exterior se encuentra el punto de medida.
- La mínima presión media (Figura 4.32 y Figura 4.33) se registró en todos los casos en la zona comprendida entre $0.6 \leq y/l \leq 0.7$, siendo positiva para todos los caudales ensayados, mientras que la máxima presión media se registró, como se esperaba, sistemáticamente en el punto más cercano a la arista externa $y/l = 0.062$, mostrándose una clara tendencia a seguir aumentando hasta $y/l = 0$.
- Las desviaciones típicas obtenidas (Figura 4.34 y Figura 4.35) puede observarse que son ciertamente elevadas, del mismo orden que el valor medio a lo largo de toda la huella, apreciándose que tiende a estabilizarse a un valor más o menos constante entre $0.6 \leq y/l \leq 1.0$.
- Las mínimas presiones mínimas (Figura 4.38 y Figura 4.39) se producen, en general, en la zona $0.5 \leq y/l \leq 0.7$. En la Figura 4.76 se muestra la estimación de la ubicación (y/l) del punto de mínimo percentil del 5%. Parece intuirse una ligera tendencia a desplazarse la posición de dicho mínimo hacia aguas arriba del escalón al aumentar el caudal. Dicha tendencia es clara en el pel-

daño representativo del máximo de la onda estacionaria ($L/k_s = 69.66$), aunque no lo es tanto para el escalón $L/k_s = 63.51$. La estimación de tales puntos se describe en el apartado 4.2.1.2 del presente capítulo. Por otro lado cabe decir que las presiones mínimas resultaron negativas para $y_c/h \geq 1.41$, aunque en ningún caso los valores obtenidos parecen preocupantes.

- El comportamiento de las mínimas y máximas presiones máximas es idéntico al mostrado por los perfiles de la presión media y su desviación típica. Así los valores mínimos, siempre positivos, se obtienen en la región $0.5 \leq y/l \leq 0.7$, mostrándose una clara tendencia a seguir aumentando hasta $y/l = 0$.

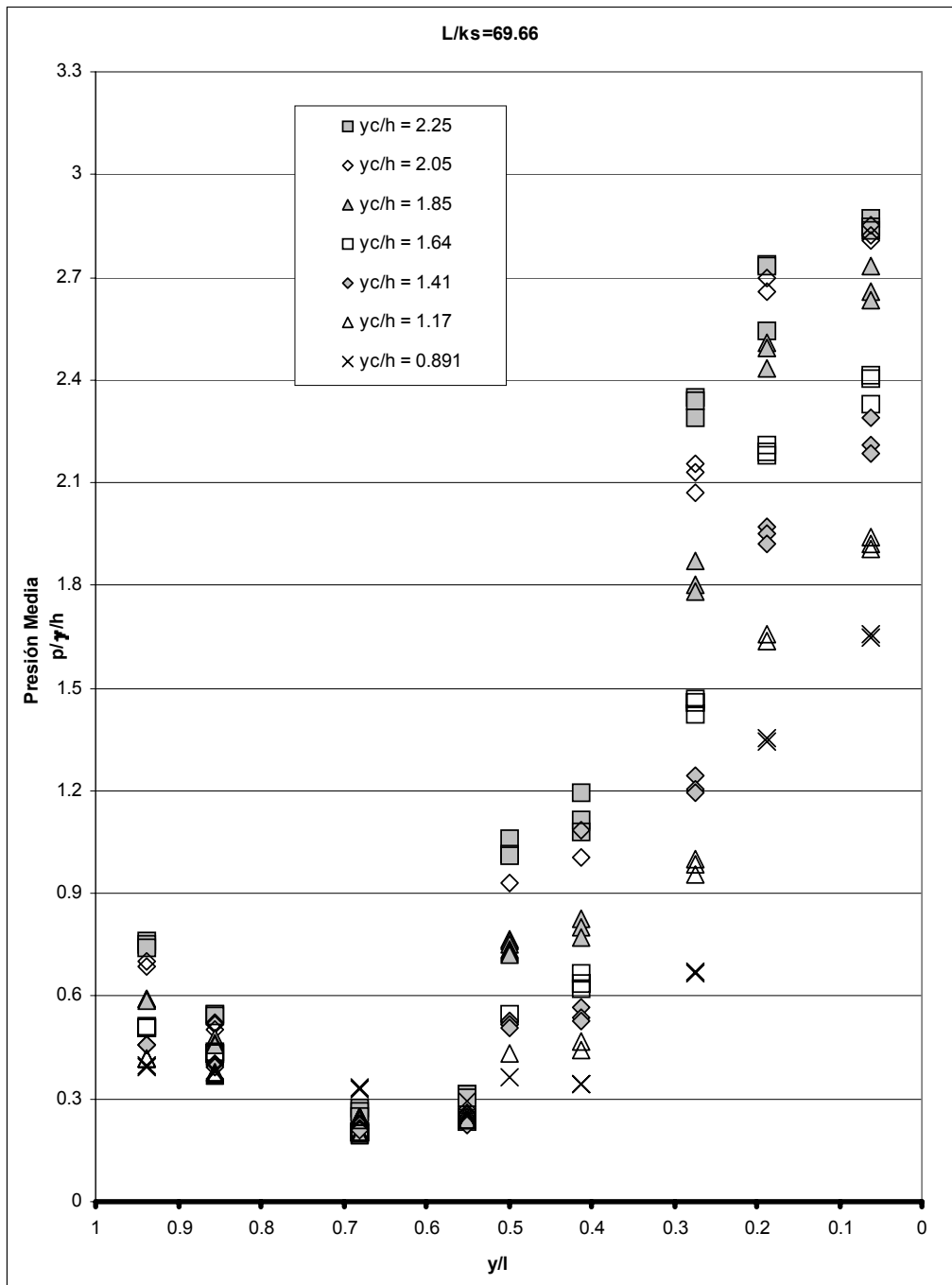


Figura 4.32. Presión media sobre la huella del escalón $L/k_s = 69.66$.

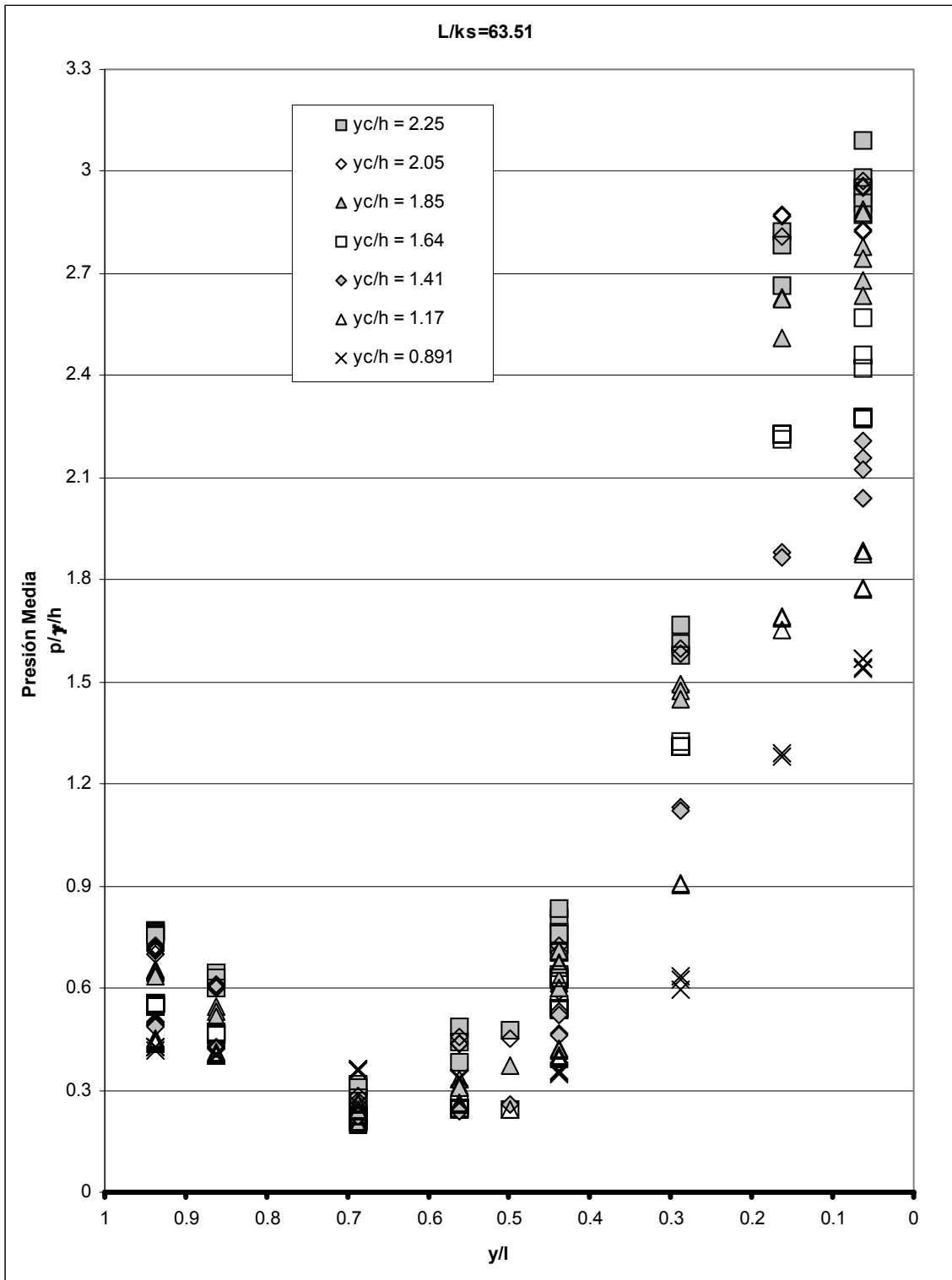


Figura 4.33. Presión media sobre la huella del escalón $L/k_s = 63.51$.

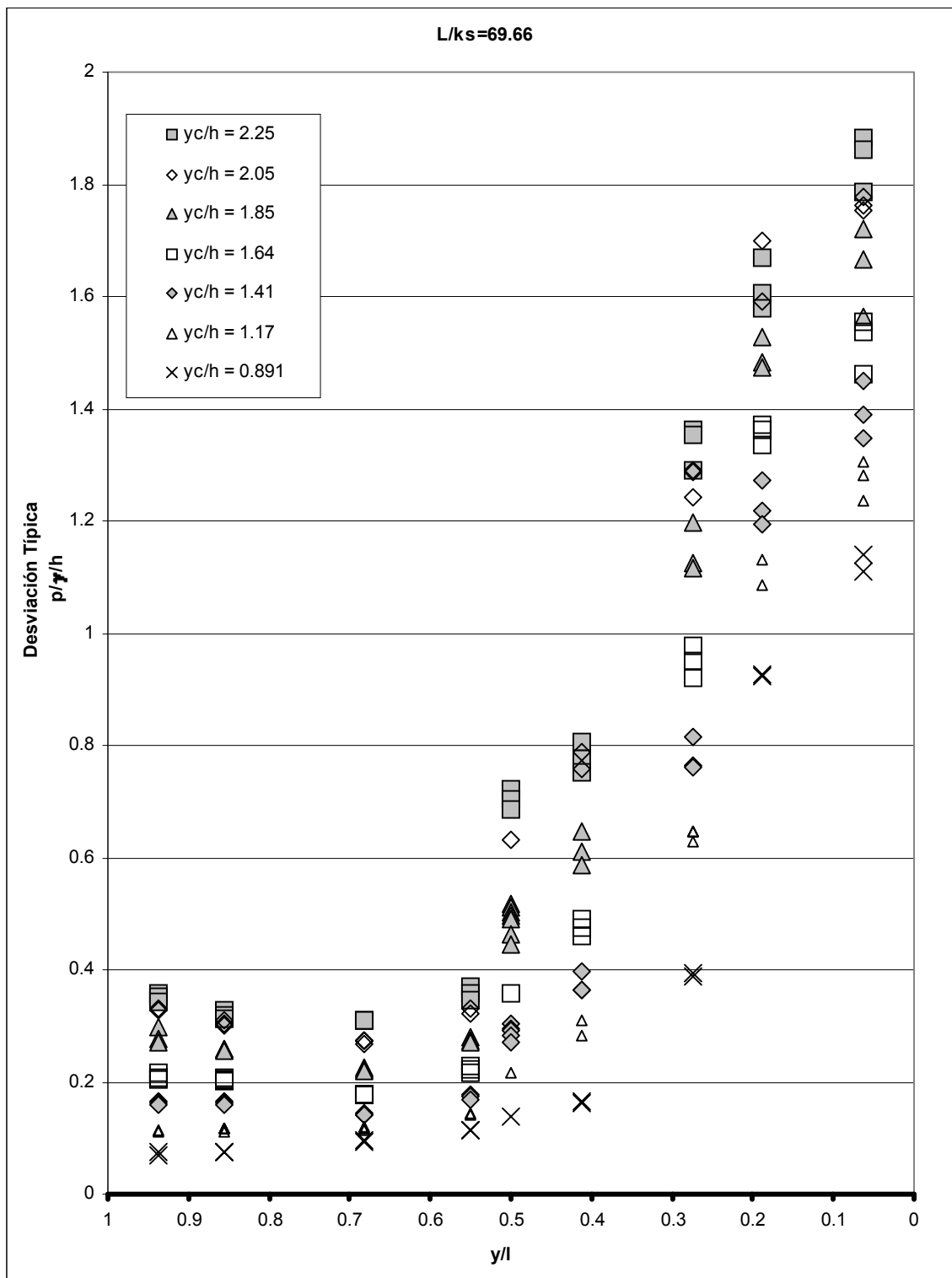


Figura 4.34. Desviación típica sobre la huella del escalón $L/k_s = 69.66$.

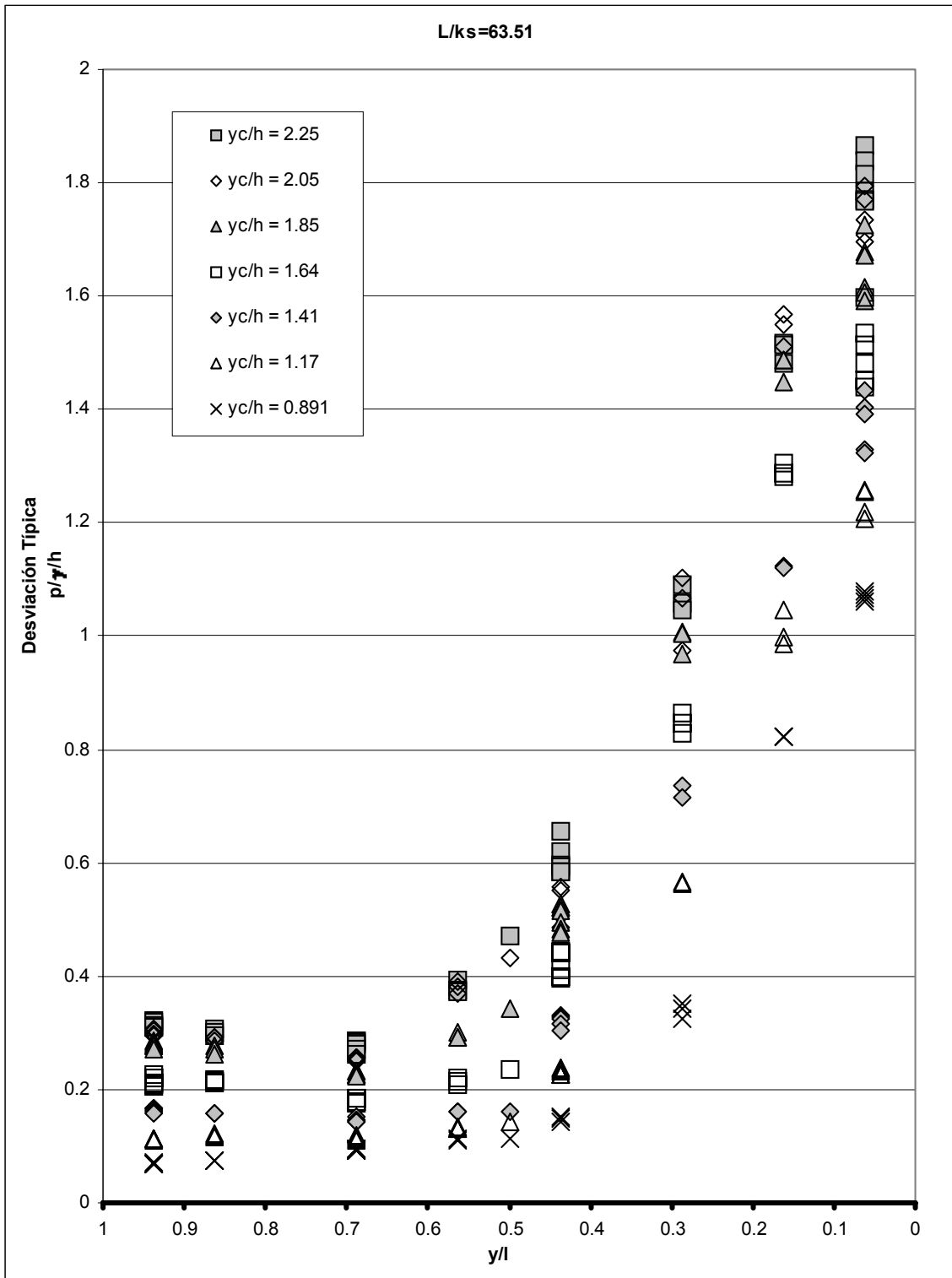


Figura 4.35. Desviación típica sobre la huella del escalón $L/k_s = 63.51$.

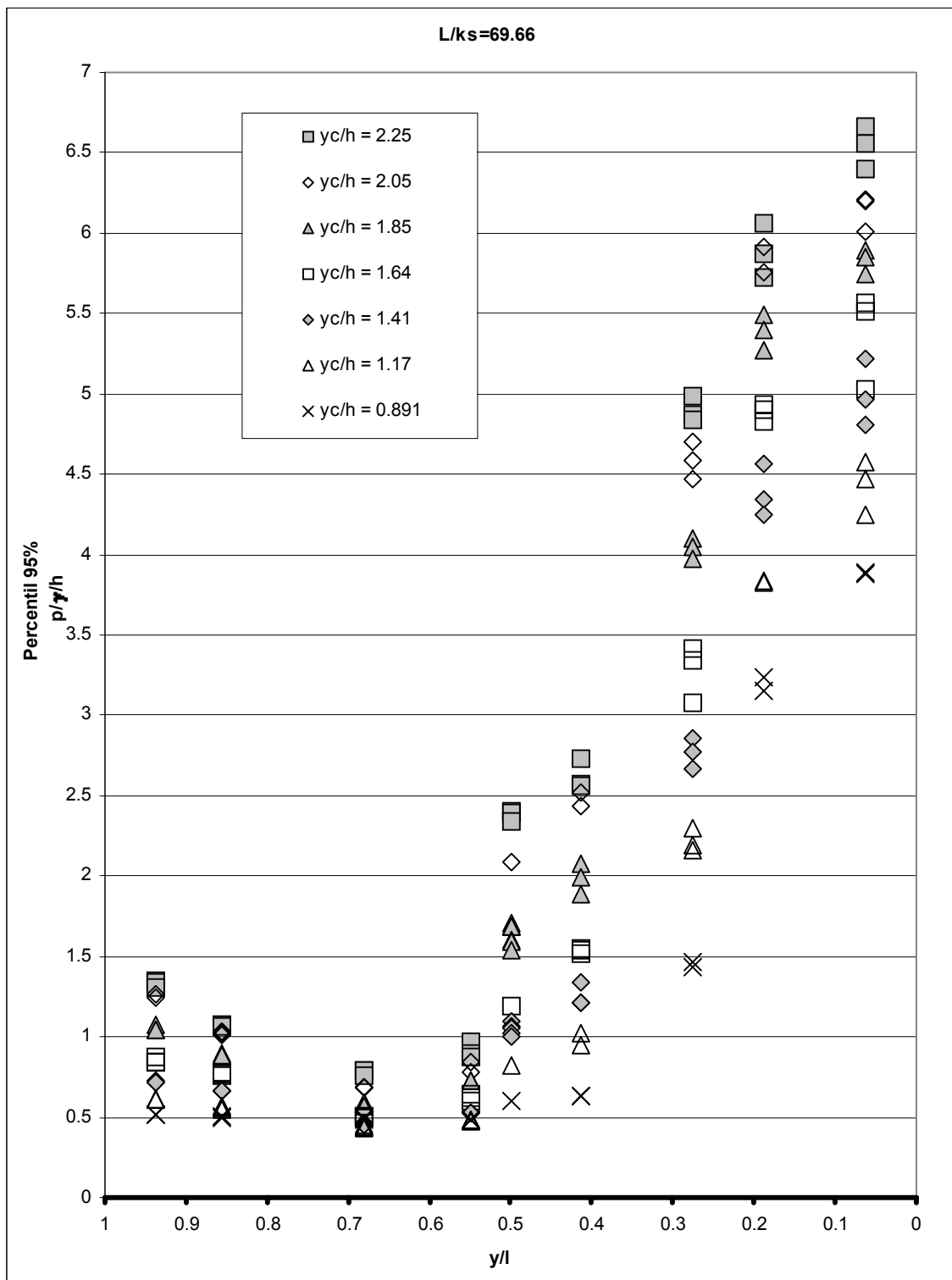


Figura 4.36. Percentil del 95% sobre la huella del escalón $L/k_s = 69.66$.

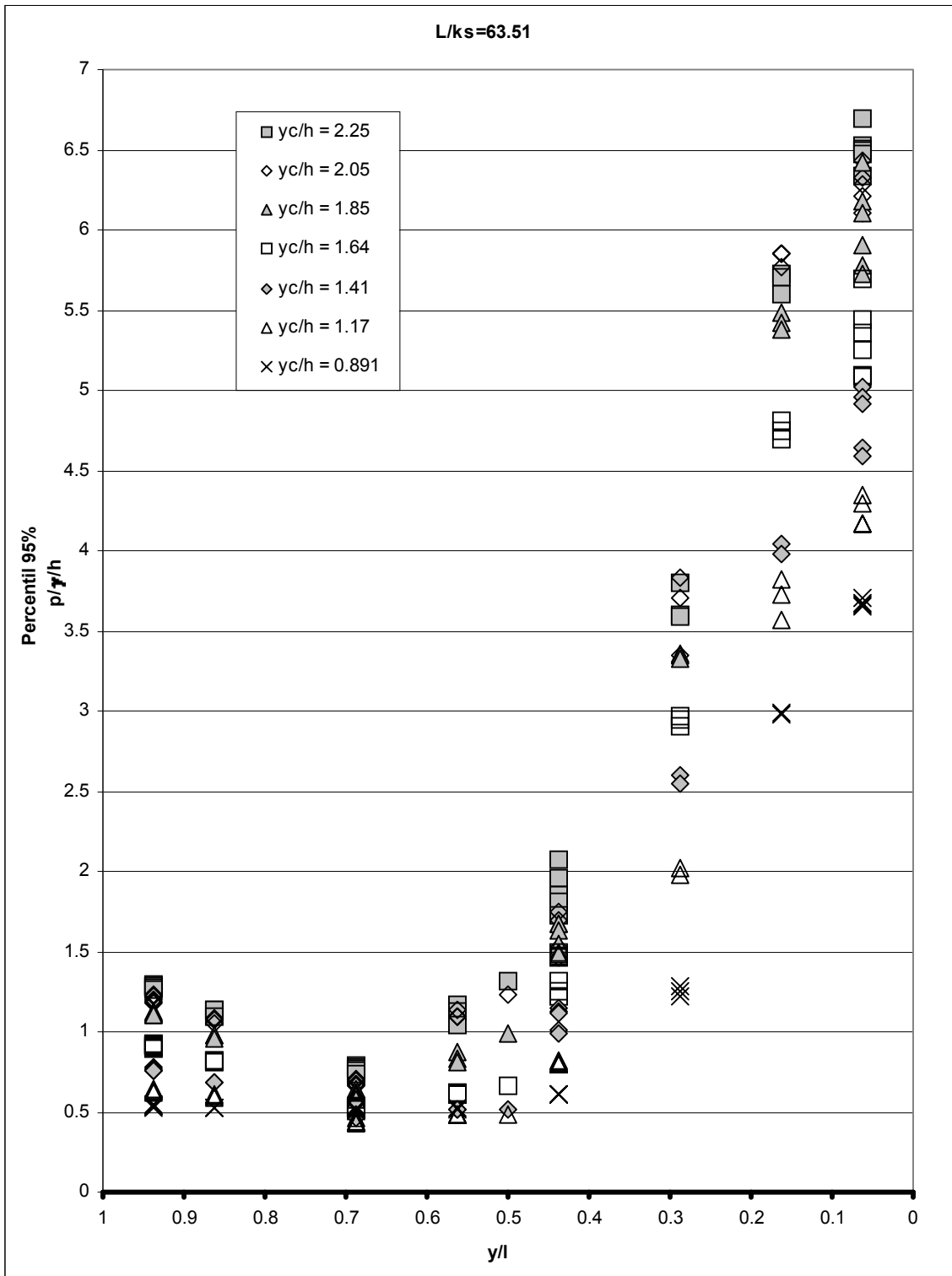


Figura 4.37. Percentil del 95% sobre la huella del escalón $L/k_s = 63.51$.

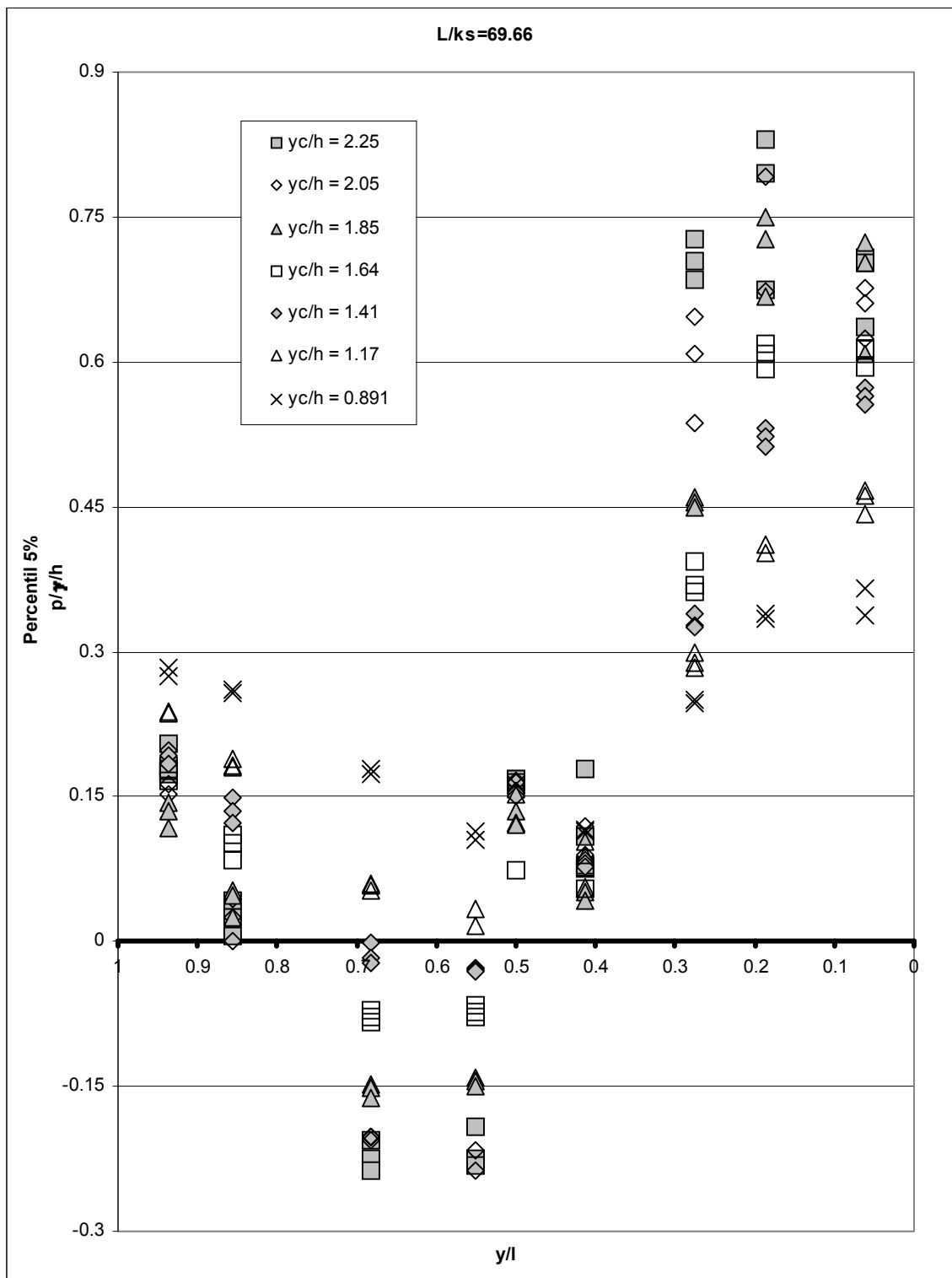


Figura 4.38. Percentil del 5% sobre la huella del escalón $L/k_s = 69.66$.

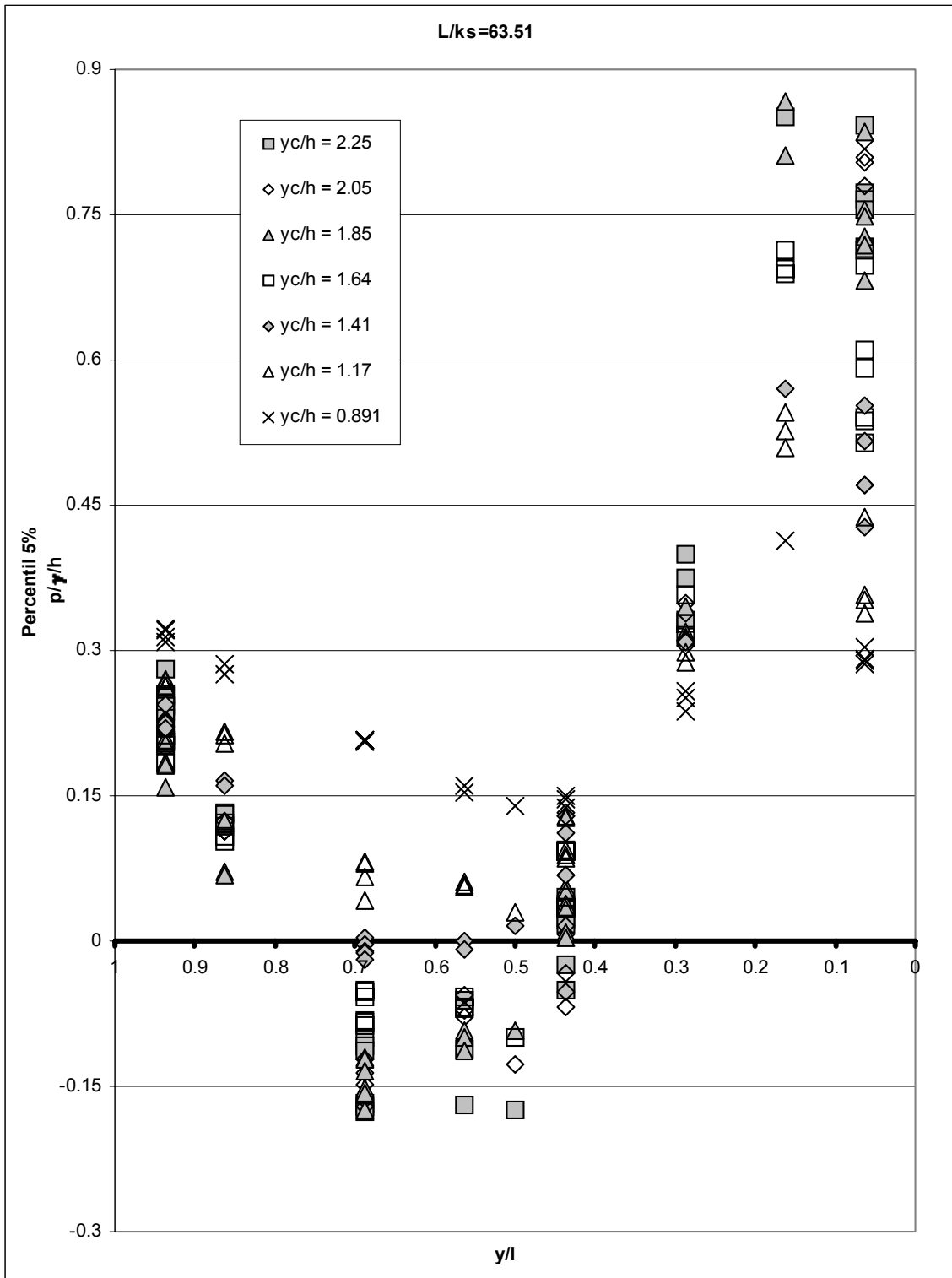


Figura 4.39. Percentil del 5% sobre la huella del escalón $L/k_s = 63.51$.

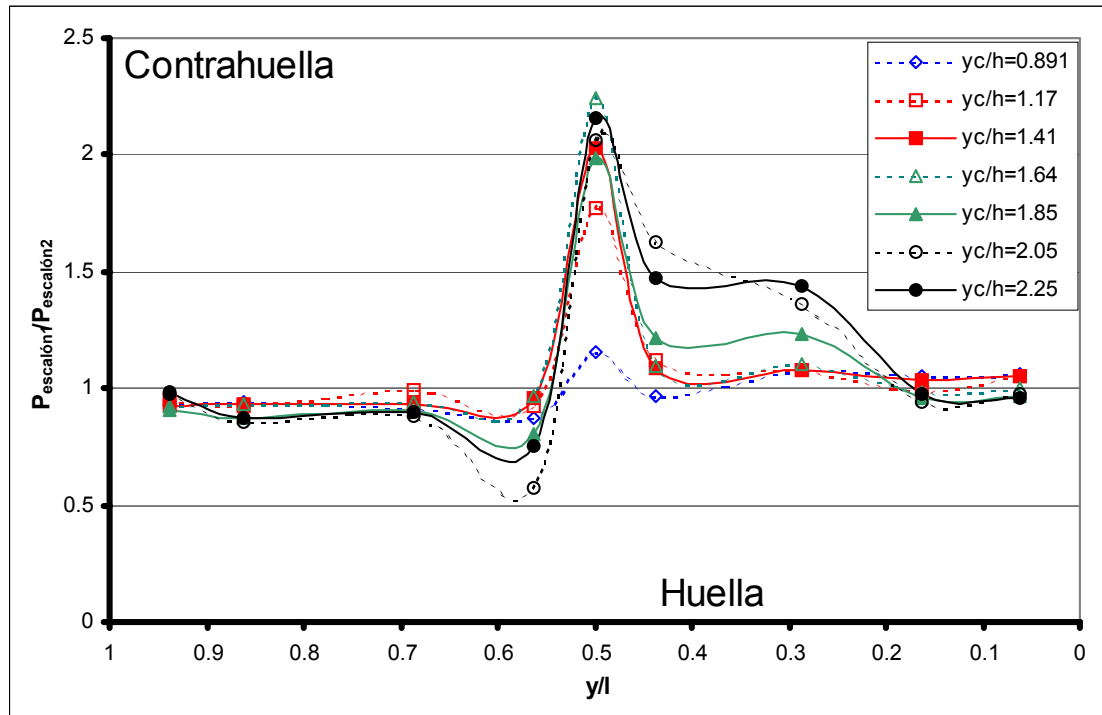


Figura 4.40. Cociente de las presiones medias obtenidas sobre las huellas de los escalones $L/k_s = 69.66$ (escalón 1) y $L/k_s = 63.51$ (escalón 2).

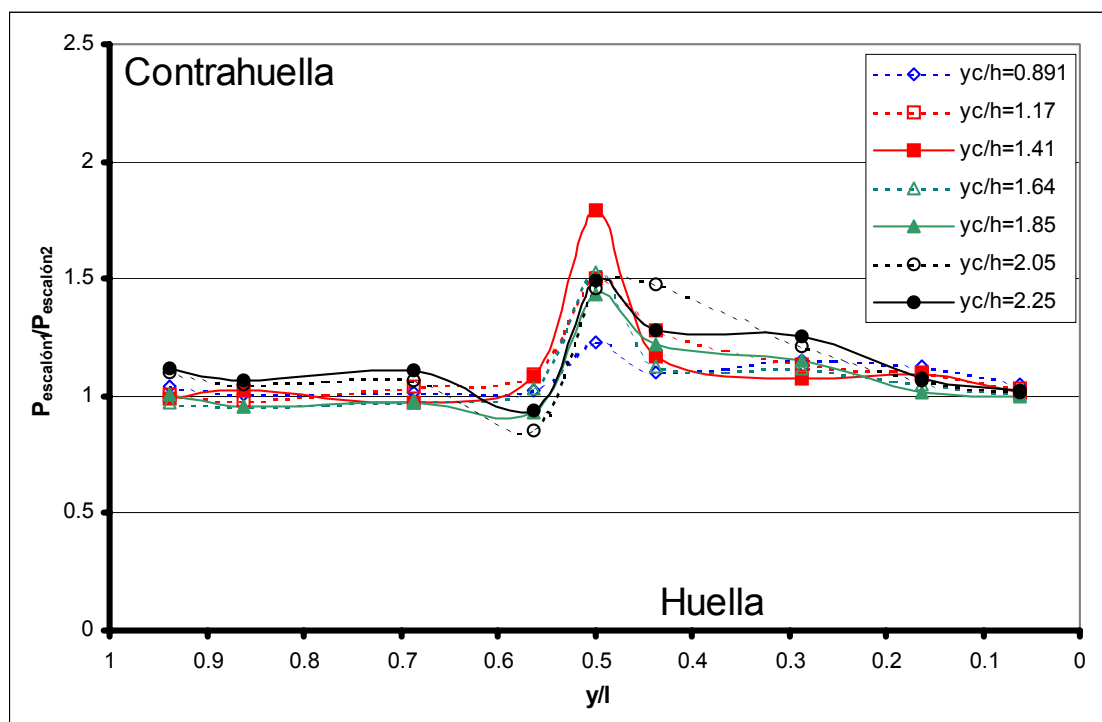


Figura 4.41. Cociente de las desviaciones típicas obtenidas sobre las huellas de los escalones $L/k_s = 69.66$ (escalón 1) y $L/k_s = 63.51$ (escalón 2).

De la Figura 4.42 a la Figura 4.49 se muestra como varían los cuatro estadísticos analizados en función del caudal y para un punto de la huella. Se han ajustado las expresiones que en cada caso mejor se adaptan a dichos puntos, cuyas ecuaciones se resumen de la Tabla 4.6 a la Tabla 4.8. Básicamente se han encontrado expresiones lineales, consiguiendo correlaciones, en la mayoría de los casos, superiores al 90%. A pesar de ello, unos pocos ajustes mostraron un mejor comportamiento a partir de una expresión parabólica, esencialmente los correspondientes a los puntos que presentan valores mínimos de cada estadístico. Del análisis de los ajustes presentados en las citadas figuras puede observarse que:

- En un punto cualquiera de la huella, tanto la presión media, como la desviación típica o el percentil del 95% tienden a aumentar al aumentar el caudal y además, lo hacen con pendientes tanto mayores cuanto más alejado se encuentre del punto en el que se dé el mínimo del estadístico. Por otro lado, el percentil del 5% exhibe un comportamiento sensiblemente distinto a los otros tres estadísticos analizados. Su comportamiento está bien diferenciado entre el extremo aguas abajo y el resto de la huella: mientras que en la región aguas abajo delimitada por $0 < y/l < 0.3$ dicho estadístico aumenta al aumentar el caudal, entre $0.3 < y/l < 1$ tiende a disminuir al aumentar el caudal.
- Nótese que para cualquiera de los estadísticos analizados sus valores mínimos se encuentran aguas arriba de la mitad de las huellas estudiadas, $0.5 < y/l < 0.7$; mientras los respectivos valores máximos se dan en los alrededores de la arista exterior.
- El caso de la presión media, desviación típica y percentil del 95%, observando los gráficos de la Figura 4.42 a la Figura 4.47 puede notarse que en todos ellos, para cada caudal puede aceptarse que los puntos de abscisas $y/l = 0.681$ (para $L/k_s = 69.66$) e $y/l = 0.687$ (en $L/k_s = 63.51$) presentan un valor mínimo (o muy próximo) del estadístico. De igual modo puede considerarse que en la abscisa $y/l = 0.062$ (en ambos peldaños) se da el valor máximo (o muy próximo) del estadístico.
- El percentil del 5% muestra un comportamiento sensiblemente distinto: el máximo puede aceptarse que será cercano al registrado en $y/l = 0.062$ cuando $0.9 < y_c/h < 1.5$ y en $y/l = 0.187$ cuando $1.5 < y_c/h < 2.3$ (para el peldaño $L/k_s = 69.66$) e $y/l = 0.162$ (para el escalón $L/k_s = 63.51$), aunque en este caso con valores muy similares a los obtenidos sobre $y/l = 0.062$. Por su lado, para la estimación del mínimo del percentil del 5%, al analizar con detenimiento las rectas ajustadas a cada caso en los gráficos correspondientes (Figura 4.48 y Figura 4.49) se aprecia que éste se daría en $y/l = 0.550$ cuando $0.9 < y_c/h < 1.95$ y en $y/l = 0.681$ cuando $1.95 < y_c/h < 2.3$ (para el peldaño $L/k_s = 69.66$), así como en $y/l = 0.562$ cuando $0.9 < y_c/h < 1.75$ y en $y/l = 0.687$ cuando $1.75 < y_c/h < 2.3$ (para el peldaño $L/k_s = 63.51$). No obstante lo anteriormente expuesto, de los gráficos de la Figura 4.48 y la Figura 4.49, se desprende con bastante rigor, que puede considerarse que para cualquier caudal el mínimo del percentil del 5% se sitúa en $y/l = 0.681$ (para $L/k_s = 69.66$) e $y/l = 0.687$ (para $L/k_s = 63.51$).
- De lo expuesto en los dos puntos anteriores se deduce que para cualquier caudal, y a efectos prácticos, el máximo de cualquiera de los estadísticos considerados se presenta en $y/l = 0.062$ (prácticamente junto al extremo aguas abajo de la huella) y el mínimo en $y/l = 0.681$ (para $L/k_s = 69.66$) e $y/l = 0.687$ (para $L/k_s = 63.51$).

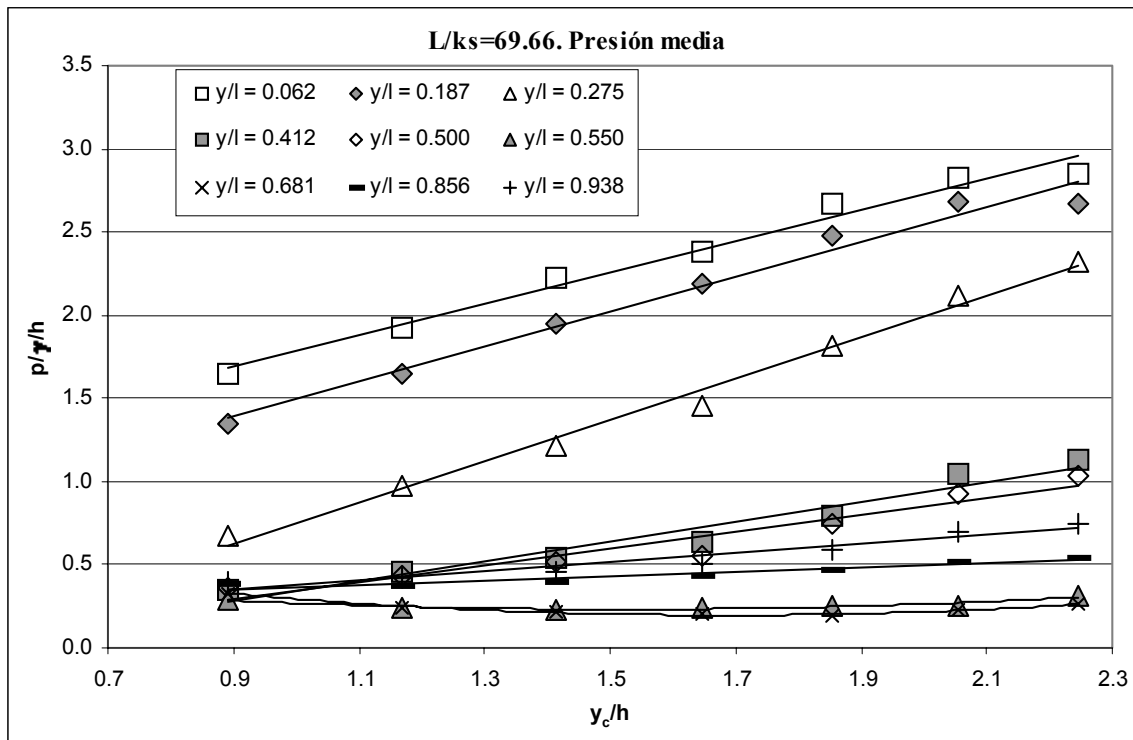


Figura 4.42. Variación de la presión media en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 69.66$.

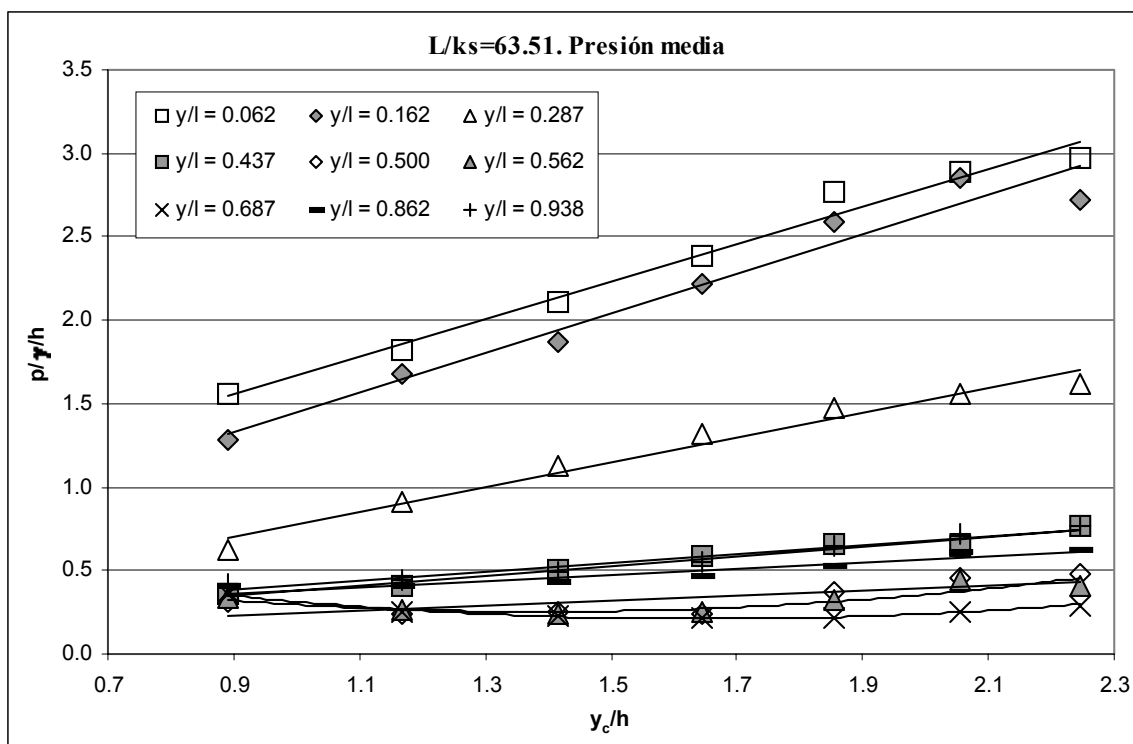


Figura 4.43. Variación de la presión media en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 63.51$.

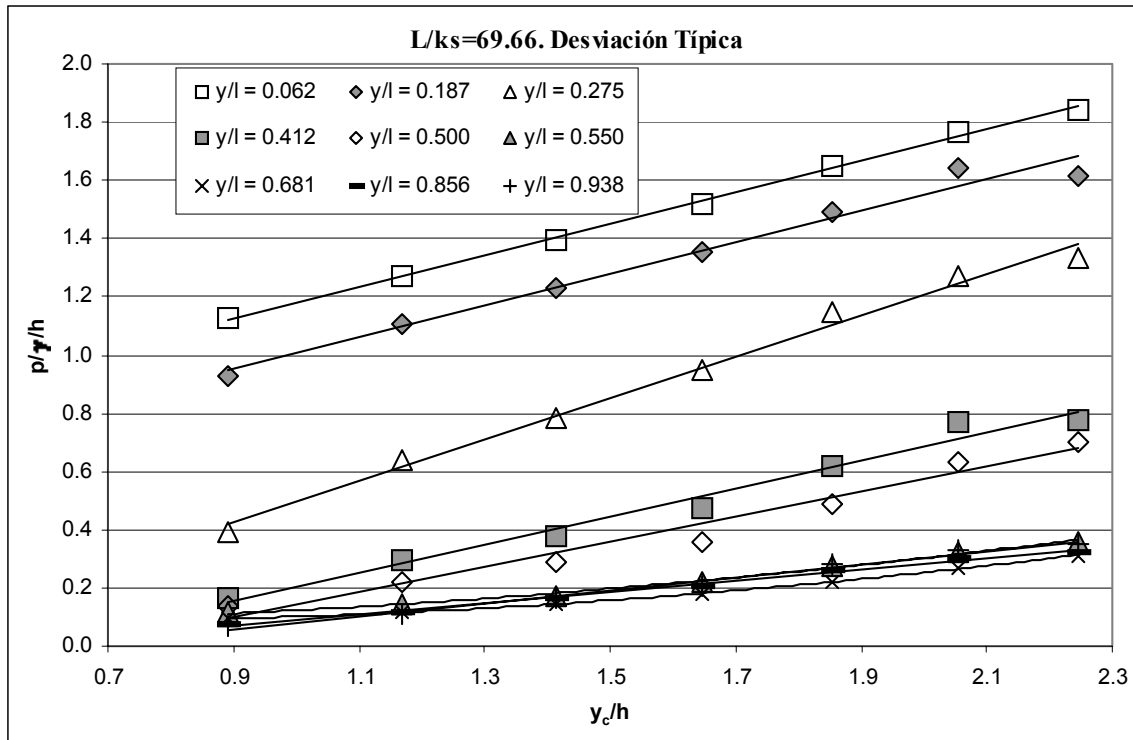


Figura 4.44. Variación de la desviación típica en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 69.66$.

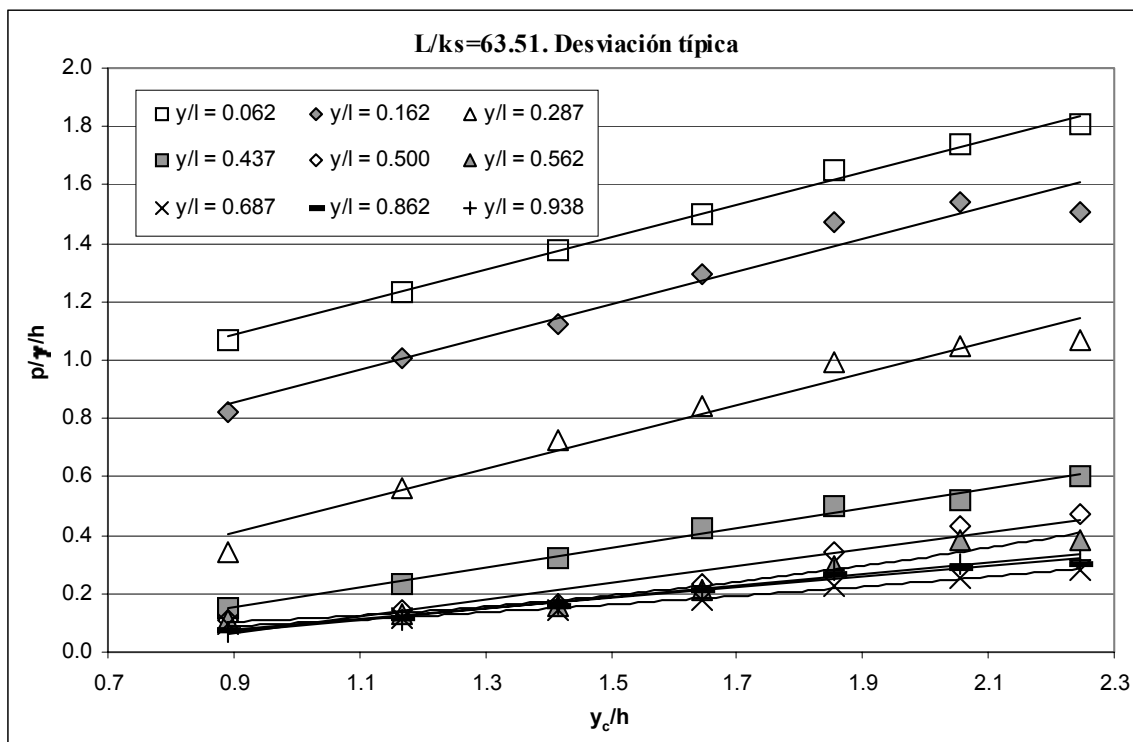


Figura 4.45. Variación de la desviación típica en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 63.51$.

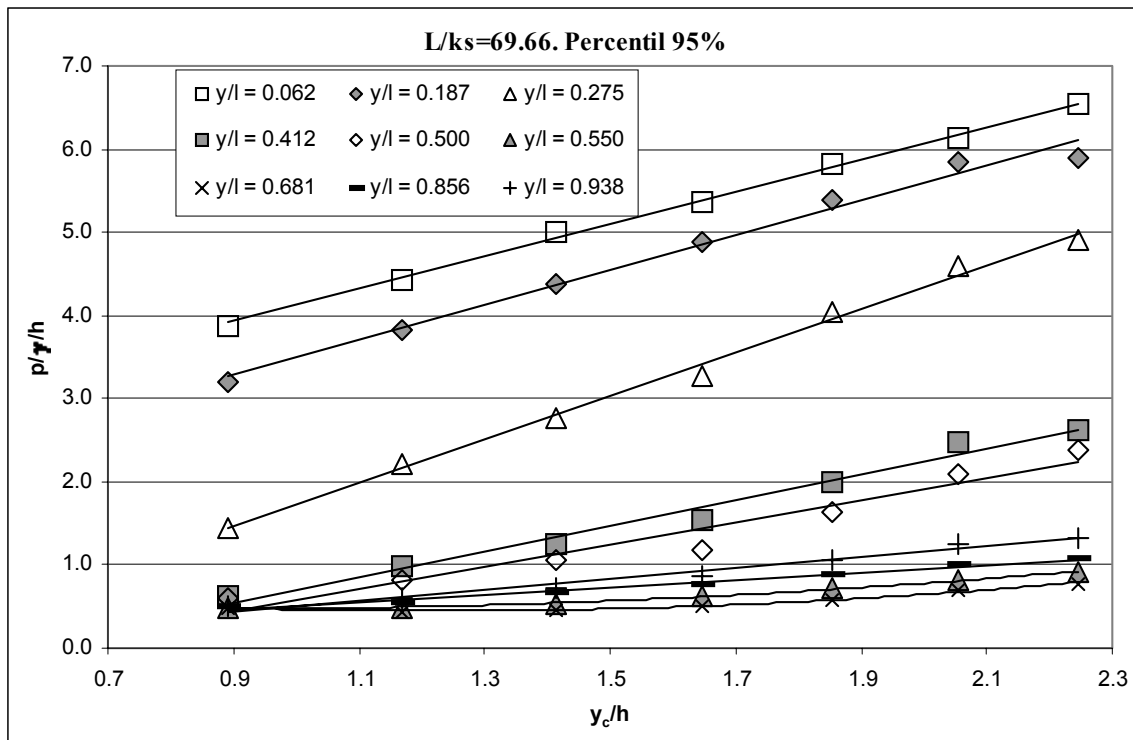


Figura 4.46. Variación del percentil del 95% en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 69.66$.

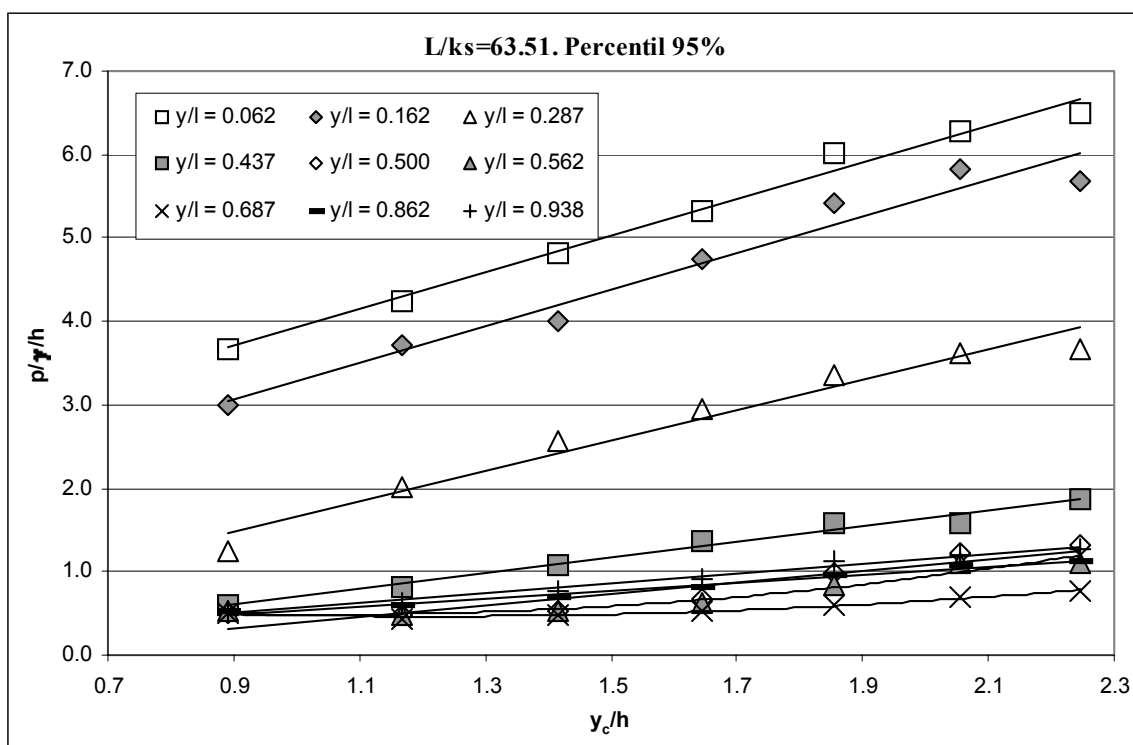


Figura 4.47. Variación del percentil del 95% en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 63.51$.

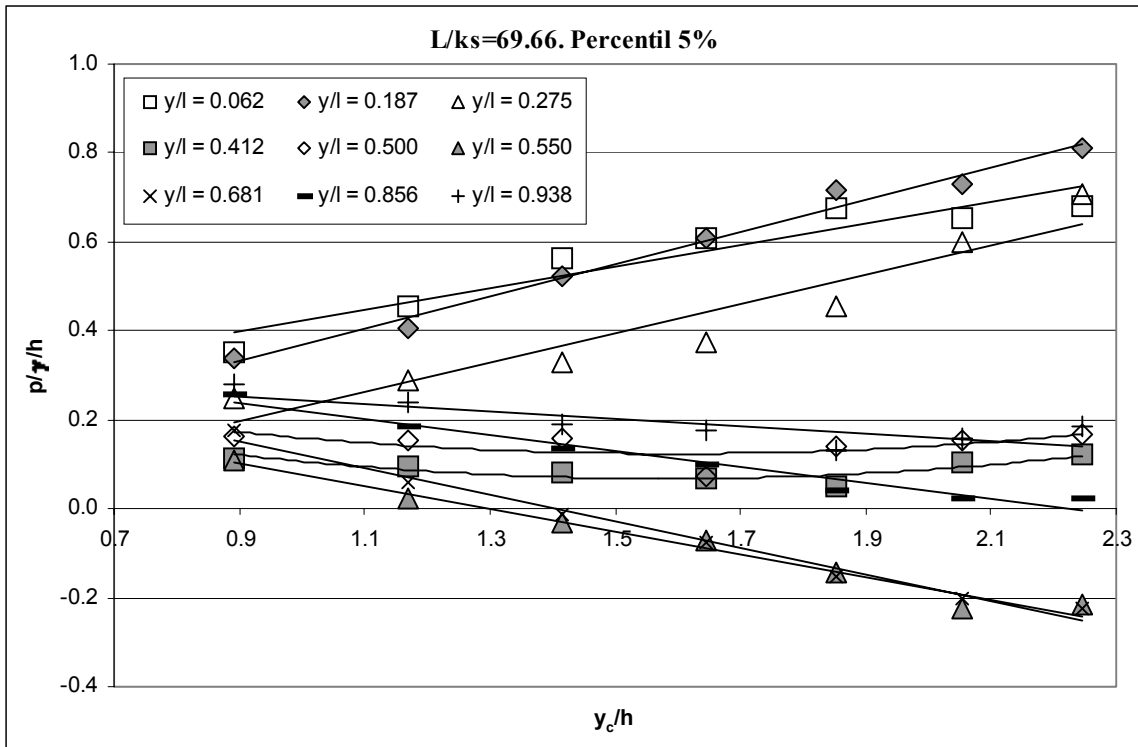


Figura 4.48. Variación del percentil del 5% en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 69.66$.

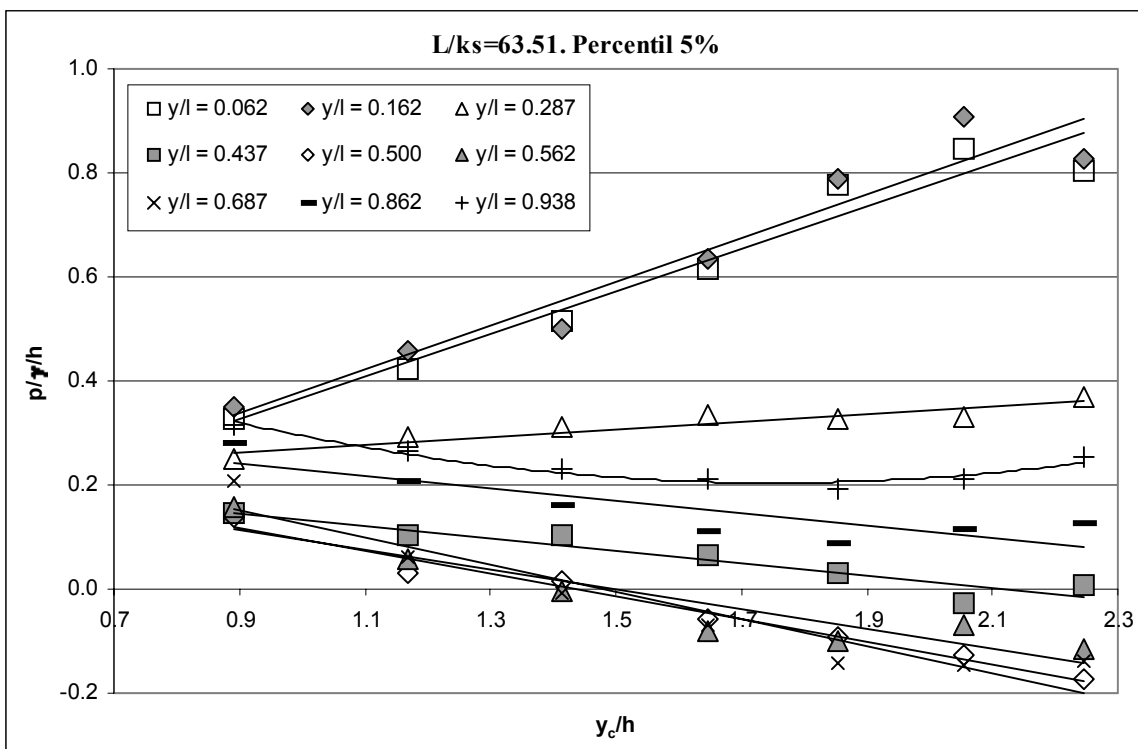


Figura 4.49. Variación del percentil del 5% en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 63.51$.

<i>Tabla 4.6. Ecuaciones ajustadas para la presión media en los dos escalones ensayados.</i>				
<i>Punto de medida (y/l)</i>	<i>Ecuación ajustada</i>	<i>Correlación (r)</i>	<i>Escalón (L/k_s)</i>	<i>Figura de referencia</i>
0.062	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.938 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.853$ (4.11)	0.990	69.66	Figura 4.42
0.187	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.05 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.447$ (4.12)	0.990		
0.275	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.24 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.494$ (4.13)	0.995		
0.412	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.596 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.252$ (4.14)	0.977		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.506 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.162$ (4.15)	0.962		
0.550	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.138 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.418 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.550$ (4.16)	0.941		
0.681	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.208 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.701 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.787$ (4.17)	0.995		
0.856	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.132 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.232$ (4.18)	0.955		
0.938	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.274 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.103$ (4.19)	0.966		
0.062	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.13 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.542$ (4.20)	0.990		
0.162	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.18 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.270$ (4.21)	0.979		
0.287	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.746 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.029$ (4.22)	0.987		
0.437	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.297 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.082$ (4.23)	0.984		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.155 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.087$ (4.24)	0.763		
0.562	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.275 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.763 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.784$ (4.25)	0.894		
0.687	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.246 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.810 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.878$ (4.26)	0.981		
0.862	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.183 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.200$ (4.27)	0.949		
0.938	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.269 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.143$ (4.28)	0.979		

<i>Tabla 4.7. Ecuaciones ajustadas para la desviación típica en los dos escalones ensayados.</i>				
<i>Punto de medida (y/l)</i>	<i>Ecuación ajustada</i>	<i>Correlación (r)</i>	<i>Escalón (L/k_s)</i>	<i>Figura de referencia</i>
0.062	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.540 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.641$ (4.29)	0.999	69.66	Figura 4.44
0.187	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.548 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.457$ (4.30)	0.989		
0.275	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.712 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.216$ (4.31)	0.996		
0.412	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.482 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.280$ (4.32)	0.989		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.430 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.289$ (4.33)	0.983		
0.550	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.189 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.073$ (4.34)	0.989		
0.681	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.097 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.161 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.185$ (4.35)	0.994		
0.856	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.193 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.105$ (4.36)	0.996		
0.938	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.221 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.139$ (4.37)	0.993		
0.062	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.559 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.582$ (4.38)	0.998		
0.162	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.557 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.355$ (4.39)	0.976		
0.287	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.550 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.088$ (4.40)	0.981		
0.437	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.341 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.156$ (4.41)	0.995		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.287 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.191$ (4.42)	0.965		
0.562	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.226 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.125$ (4.43)	0.966		
0.687	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.048 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.020 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.089$ (4.44)	0.993		
0.862	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.182 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.089$ (4.45)	0.989		
0.938	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.196 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.108$ (4.46)	0.991		

Tabla 4.8. Ecuaciones ajustadas para el percentil del 95% en los dos escalones ensayados.

Punto de medida (y/l)	Ecuación ajustada	Correlación (r)	Escalón (L/k_s)	Figura de referencia
0.062	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.95 \cdot \frac{y_c}{h} + 2.17$ (4.47)	0.999	69.66	Figura 4.46
0.187	$\frac{p}{\gamma}/h = 2.09 \cdot \frac{y_c}{h} + 1.40$ (4.48)	0.993		
0.275	$\frac{p}{\gamma}/h = 2.61 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.878$ (4.49)	0.998		
0.412	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.53 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.829$ (4.50)	0.990		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.33 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.750$ (4.51)	0.974		
0.550	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.336 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.111$ (4.52)	0.960		
0.681	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.328 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.802 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.938$ (4.53)	0.998		
0.856	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.452 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.056$ (4.54)	0.989		
0.938	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.642 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.128$ (4.55)	0.984		
0.062	$\frac{p}{\gamma}/h = 2.20 \cdot \frac{y_c}{h} + 1.73$ (4.56)	0.994		
0.162	$\frac{p}{\gamma}/h = 2.20 \cdot \frac{y_c}{h} + 1.08$ (4.57)	0.980		
0.287	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.81 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.150$ (4.58)	0.982		
0.437	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.938 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.238$ (4.59)	0.990		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.682 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.285$ (4.60)	0.926		
0.562	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.521 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.097$ (4.61)	0.907		
0.687	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.293 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.708 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.893$ (4.62)	0.988		
0.862	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.478 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.057$ (4.63)	0.988		
0.938	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.590 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.029$ (4.64)	0.992		

<i>Tabla 4.9. Ecuaciones ajustadas para el percentil del 5% en los dos escalones ensayados.</i>				
<i>Punto de medida (y/l)</i>	<i>Ecuación ajustada</i>	<i>Correlación (r)</i>	<i>Escalón (L/k_s)</i>	<i>Figura de referencia</i>
0.062	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.244 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.178$ (4.65)	0.949	69.66	Figura 4.48
0.187	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.342 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.033$ (4.66)	0.987		
0.275	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.329 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.101$ (4.67)	0.950		
0.412	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.116 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.365 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.356$ (4.68)	0.857		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.101 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.321 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.379$ (4.69)	0.606		
0.550	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.254 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.331$ (4.70)	0.988		
0.681	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.298 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.417$ (4.71)	0.992		
0.856	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.181 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.401$ (4.72)	0.979		
0.938	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.082 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.327$ (4.73)	0.806		
0.062	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.408 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.041$ (4.74)	0.975	63.51	Figura 4.49
0.162	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.418 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.036$ (4.75)	0.964		
0.287	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.073 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.198$ (4.76)	0.940		
0.437	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.120 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.254$ (4.77)	0.952		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.219 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.314$ (4.78)	0.988		
0.562	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.190 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.283$ (4.79)	0.929		
0.687	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.256 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.381$ (4.80)	0.955		
0.862	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.119 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.348$ (4.81)	0.855		
0.938	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.159 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.556 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.692$ (4.82)	0.977		

4.2.1.1. Primera propuesta de modelación de los perfiles de presión sobre la huella

Se han ajustado expresiones a fin de describir analíticamente el comportamiento de la presión en función de la posición en la huella. Para ello se estandarizaron los resultados de la manera que se indica en la expresión (4.83). De esta forma se consigue una variable positiva, entre 0 y 1. Posteriormente esta variable fue ajustada según la función exponencial (4.84).

$$[P_{estadístico}]_{normalizado} = \frac{P_{estadístico} - (P_{estadístico})_{min}}{(P_{estadístico})_{max} - (P_{estadístico})_{min}} \quad (4.83)$$

$$[P_{estadístico}]_{normalizado} = e^{-k \cdot \left(\frac{y}{l} + c\right)^\alpha} \quad (4.84)$$

donde k , c y α son constantes a ajustar en cada caso, y $(P_{estadístico})_{max}$ y $(P_{estadístico})_{min}$ son el máximo y mínimo registrados del estadístico que se esté analizando para un caudal y posición sobre la huella determinados. De este modo se obtienen los gráficos de la Figura 4.50 a la Figura 4.55.

El motivo de utilizar esta expresión estriba en el hecho que, a la vista de los resultados obtenidos en cuanto a la media, desviación típica y percentil del 95% (Figura 4.32 a Figura 4.37), el perfil resultante entre $0.7 < y/l < 0$ se asemeja a una curva exponencial similar a las propuestas por Puertas (1994) al analizar el campo de presiones provocado por el impacto de un chorro de agua incidente de manera perpendicular a una superficie plana. La tendencia de obtener mayores valores cuanto más cerca de la arista externa del escalón ($y/l = 0$) hizo pensar en fijar el parámetro $c = 0$, con lo que los valores de k y α podían obtenerse sin mayor dificultad mediante un algoritmo de mínimos cuadrados. Es importante mencionar que el rango de validez de tales expresiones es $0.7 < y/l < 0$. Se ha escogido este rango para poder analizar la zona de la huella donde se producen las máximas presiones medias y las máximas presiones máximas, ya que los valores mínimos de ambos estadísticos carecen de interés gracias a que en ningún punto registrado sobre la huella se obtuvieron presiones medias ni, evidentemente, máximas negativas.

Mención aparte merece el comportamiento del percentil del 5% (Figura 4.56 y Figura 4.57)). En esta ocasión su comportamiento se aleja de la forma exponencial citada en el párrafo anterior, tal y como puede apreciarse en los resultados mostrados en la Figura 4.38 y Figura 4.39. Además en este caso es de claro interés modelar con mayor precisión el mínimo relativo que muestra su distribución en la huella. Al objeto de encontrar la posición de dicho mínimo, se propone ajustar una expresión polinómica de segundo grado dada por la ecuación:

$$[P_{percentil5\%}]_{normalizado} = a \cdot \left(\frac{y}{l}\right)^2 + b \cdot \frac{y}{l} + c \quad (4.85)$$

donde a , b y c son constantes a ajustar por mínimos cuadrados.

Nótese como con las ecuaciones (4.84) y (4.85) se propone una misma expresión para todos los caudales, introduciendo la influencia de éstos en las variables $(P_{estadístico})_{max}$ y $(P_{estadístico})_{min}$. Cabe indicar que, tal y como ya ha sido comentado, el comportamiento de la distribución de las presiones mínimas en función del caudal sufre un ligero desplazamiento de su valor mínimo hacia aguas arriba al aumentar el caudal. No obstante la expresión (4.85) no contempla esta particularidad, lo que puede ser tomado como un aspecto débil de esta formulación.

En los gráficos de la Figura 4.50 a la Figura 4.57 se presentan los ajustes que se obtendrían para cada uno de los caudales ensayados, considerando la estandarización de los diferentes estadísticos (realizada a partir de los valores extremos $(P_{estadístico})_{max}$ y $(P_{estadístico})_{min}$ calculados de los propios registros experimentales). Estas curvas pueden compararse con la correspondiente a un único ajuste obtenido para todos los caudales tomados conjuntamente. Se aprecia como los ajustes particularizados a cada caudal se agrupan claramente alrededor del global salvo el caso del menor de los caudales $y_c/h = 0.891$ (en trazo continuo), que tiende a presentar un patrón de comportamiento distinto de los demás. Al tratarse de un caudal relativamente cercano al umbral de paso de régimen escalón a escalón a flujo rasante¹, puede pensarse que el flujo rasante no ha terminado de establecerse por completo. Por este motivo los resultados obtenidos para este caudal fueron eliminados en la obtención de los distintos ajustes. Así, los resultados aquí presentados se refieren a un intervalo de caudales situado inmediatamente por encima del caudal que provoca el flujo rasante.

¹ $0.77 < y_c/h < 0.83$, umbral que se estableció de manera visual (ver apartado 3.2.1 del presente capítulo).

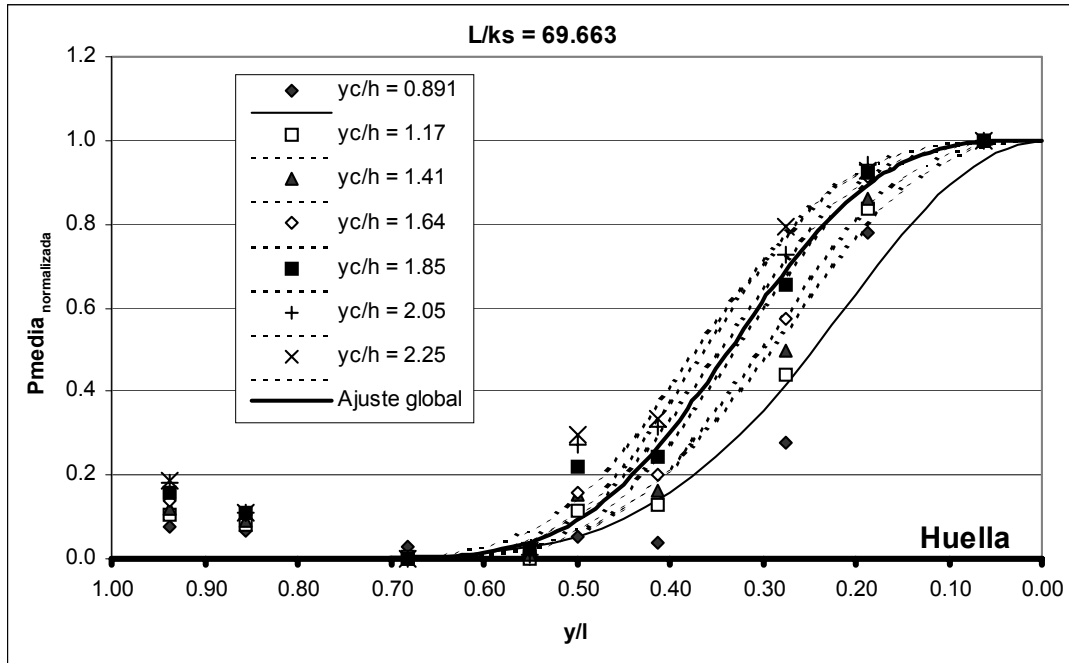


Figura 4.50. Presión media estandarizada. Escalón $L/k_s = 69.66$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con el ajuste global realizado con los registros estandarizados de todos los caudales conjuntamente (trazo continuo grueso). La curva de ajuste global tiene validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$; para su obtención no se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$ (trazo continuo fino).

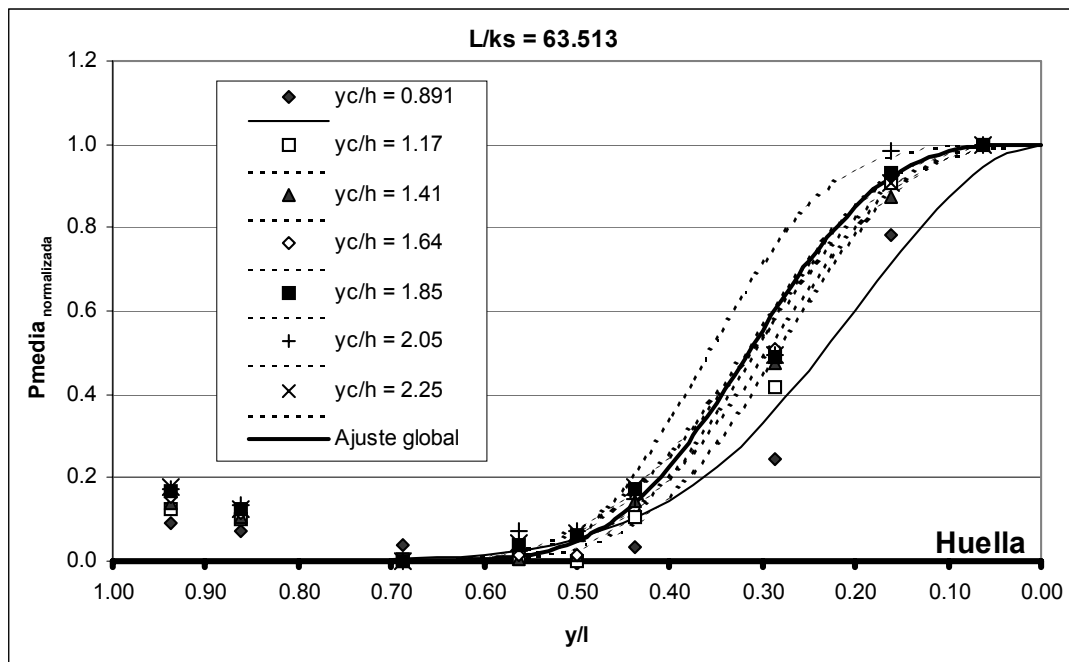


Figura 4.51. Presión media estandarizada. Escalón $L/k_s = 63.51$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con el ajuste global realizado con los registros estandarizados de todos los caudales conjuntamente (trazo continuo grueso). La curva de ajuste global tiene validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$; para su obtención no se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$ (trazo continuo fino).

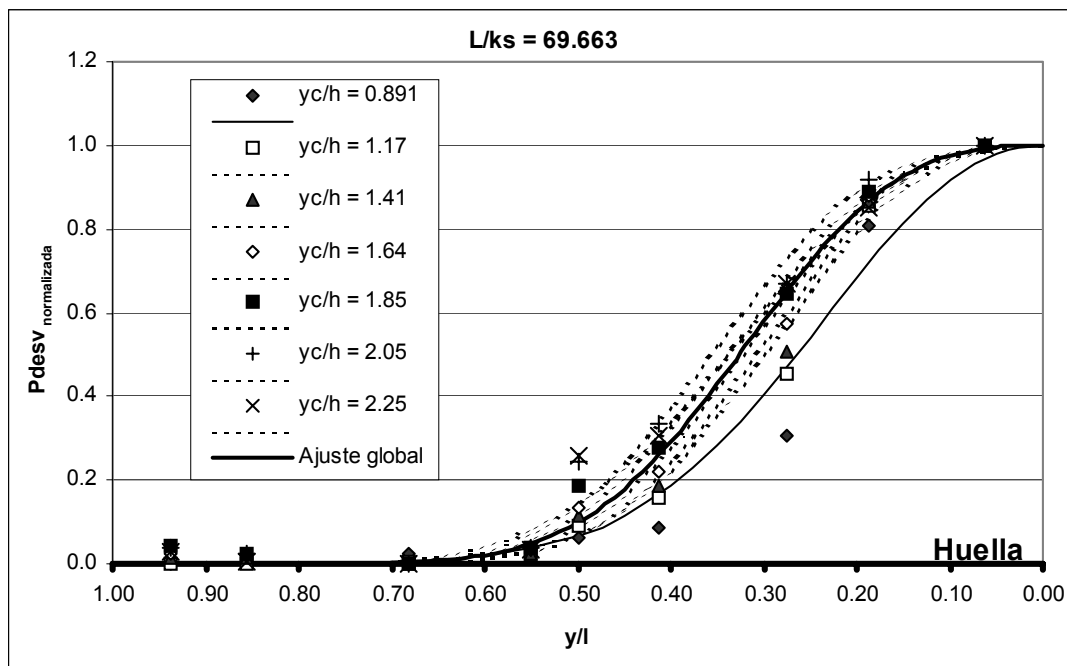


Figura 4.52. Desviación típica estandarizada. Escalón $L/k_s = 69.66$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con el ajuste global realizado con los registros estandarizados de todos los caudales conjuntamente (trazo continuo grueso). La curva de ajuste global tiene validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$; para su obtención no se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$ (trazo continuo fino).

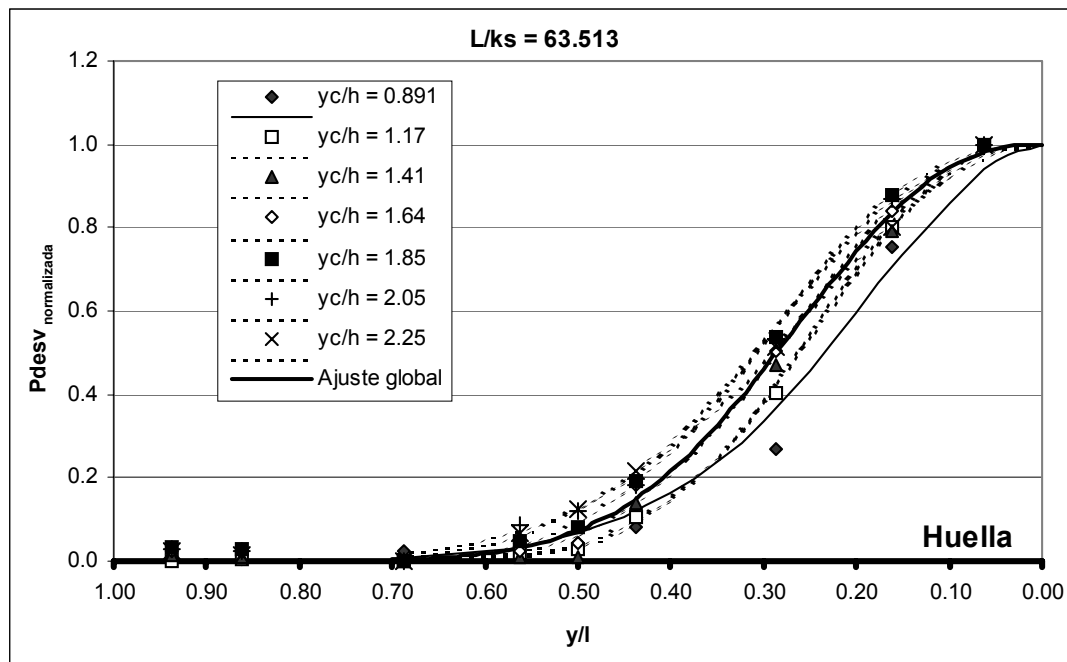


Figura 4.53. Desviación típica estandarizada. Escalón $L/k_s = 63.51$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con el ajuste global realizado con los registros estandarizados de todos los caudales conjuntamente (trazo continuo grueso). La curva de ajuste global tiene validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$; para su obtención no se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$ (trazo continuo fino).

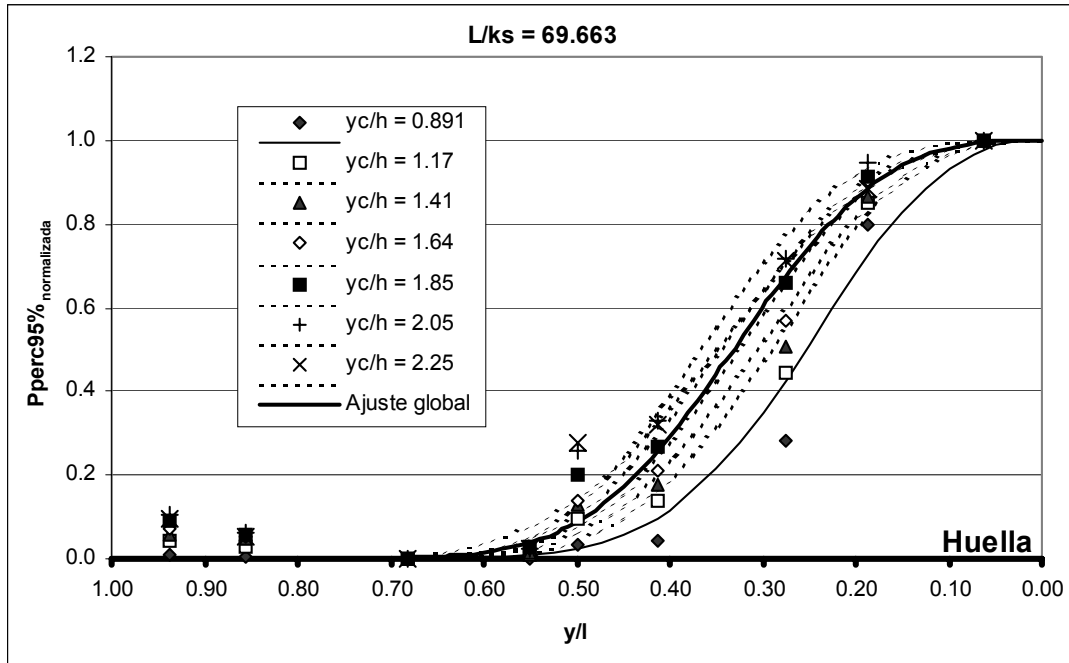


Figura 4.54. Percentil del 95% estandarizada. Escalón $L/k_s = 69.66$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con el ajuste global realizado con los registros estandarizados de todos los caudales conjuntamente (trazo continuo grueso). La curva de ajuste global tiene validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$; para su obtención no se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$ (trazo continuo fino).

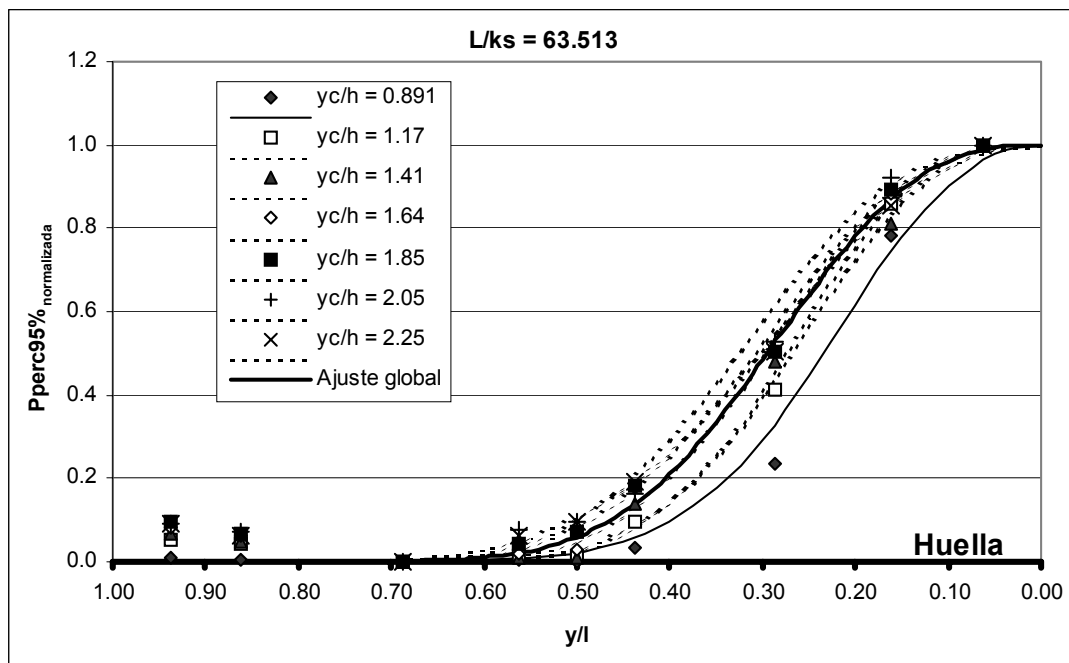


Figura 4.55. Percentil del 95% estandarizada. Escalón $L/k_s = 63.51$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con el ajuste global realizado con los registros estandarizados de todos los caudales conjuntamente (trazo continuo grueso). La curva de ajuste global tiene validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$; para su obtención no se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$ (trazo continuo fino).

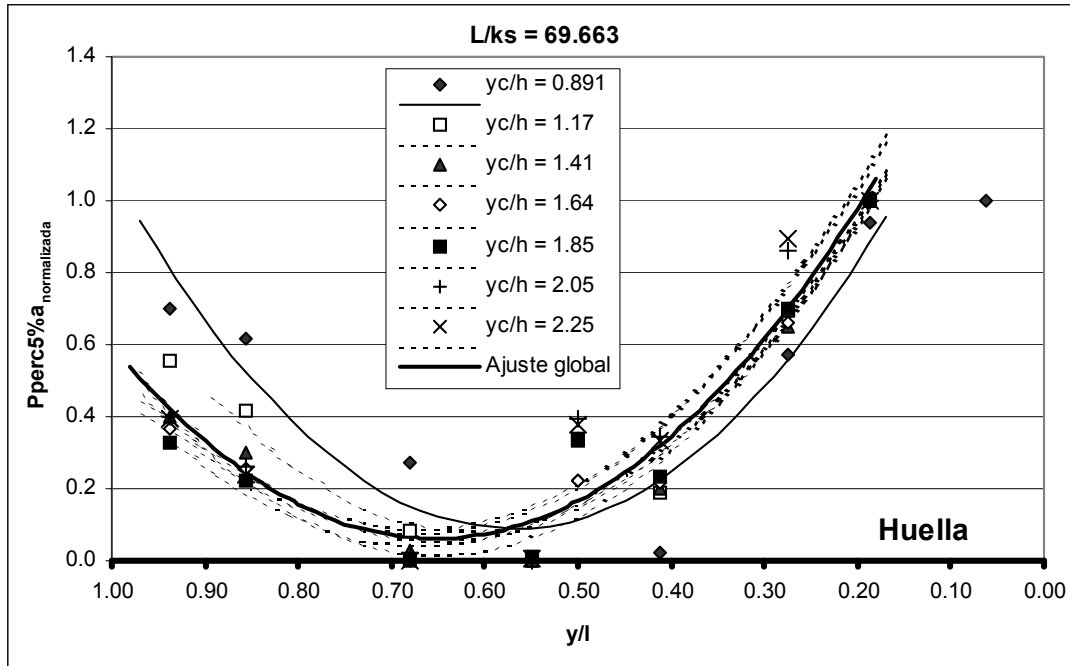


Figura 4.56. Percentil del 5% estandarizada. Escalón $L/k_s = 69.66$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con el ajuste global realizado con los registros estandarizados de todos los caudales conjuntamente (trazo continuo grueso). La curva de ajuste global tiene validez en $0.16 < y/l < 1$, $1.1 < y_c/h < 2.3$; para su obtención no se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$ (trazo continuo fino).

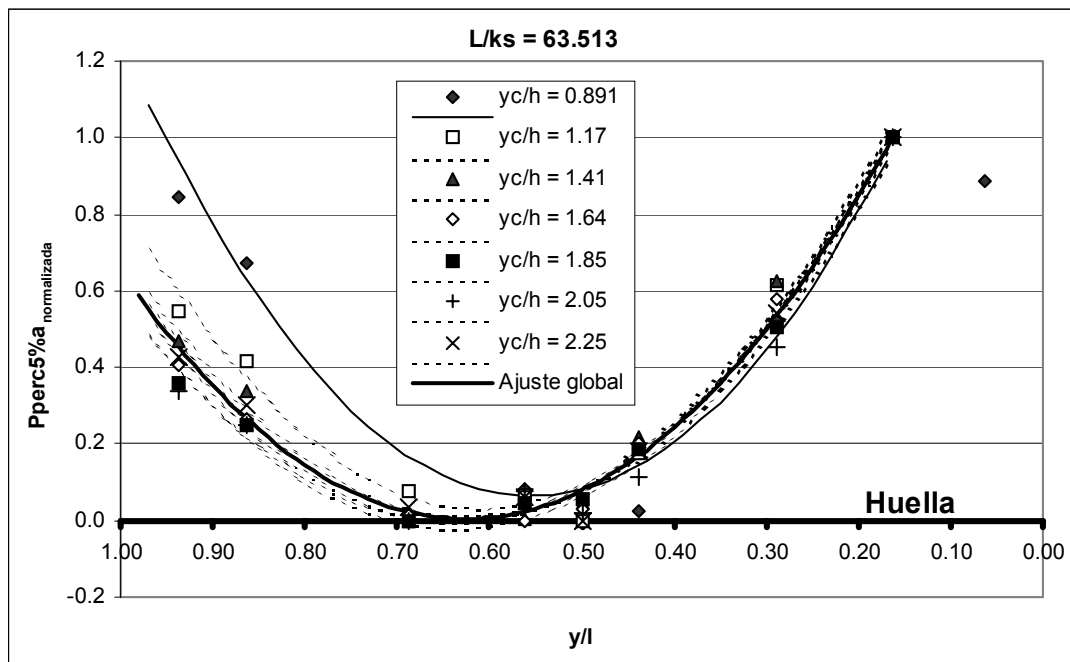


Figura 4.57. Percentil del 5% estandarizada. Escalón $L/k_s = 63.51$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con el ajuste global realizado con los registros estandarizados de todos los caudales conjuntamente. La curva de ajuste global tiene validez en $0.16 < y/l < 1$, $1.1 < y_c/h < 2.3$; para su obtención no se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

En la Tabla 4.10 se muestran los valores obtenidos en los ajustes de la expresión (4.84) a la distribución sobre la huella de la presión media, la desviación típica y el percentil del 95%, para cada uno de los escalones ensayados ($L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$). Por lo que respecta al percentil del 5% de la presión, los coeficientes que ajustan la ecuación (4.85), para cada escalón, se indican en la Tabla 4.11. De la ecuación (4.85) se obtiene que el mínimo del percentil del 5% se da para la abscisa $y/l = -(b/2a)$. Teniendo en cuenta la propia Tabla 4.11, dicha abscisa es $y/l = 0.64$ para $L/k_s = 69.66$ e $y/l = 0.63$ para $L/k_s = 63.51$. Por tanto es en el entorno de este punto donde existirá un mayor riesgo de cavitación.

Tabla 4.10. Valores de k y α –ecuación (4.84)– ajustados para la distribución sobre la huella de la presión media, desviación típica y percentil de 95% en los dos escalones ensayados $L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$. Rango de validez $0 < y/l < 0.7$ y $1.1 < y_c/h < 2.3$.

Estadístico	$L/k_s = 69.66$			$L/k_s = 63.51$		
	k	α	Correlación (r)	k	α	Correlación (r)
Presión media	20.9	3.12	0.985	27.7	3.19	0.995
Desviación típica	16.6	2.83	0.973	13.5	2.37	0.992
Percentil del 95%	20.1	3.05	0.979	17.9	2.66	0.996

Tabla 4.11. Valores de a , b , y c –ecuación (4.85)– ajustados para la distribución sobre la huella del percentil del 5% de la presión, en los dos escalones ensayados $L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$. Zona de validez sobre la huella $0.16 < y/l < 1$, y $1.1 < y_c/h < 2.3$.

Estadístico	$L/k_s = 69.66$				$L/k_s = 63.51$			
	a	b	c	Correlación (r)	a	b	c	Correlación (r)
Percentil del 5%	4.46	-5.82	1.96	0.953	4.65	-5.83	1.83	0.987

En la siguiente Figura 4.58 se muestran los cocientes entre las presiones medias sobre las huellas del escalón $L/k_s = 69.66$ y del $L/k_s = 63.51$, así como el de las desviaciones típicas, estimados ambos a partir de los anteriores ajustes (Tabla 4.10). Puede apreciarse que, si bien los patrones ajustados modelan correctamente la zona circundante al impacto del flujo rasante ($y/l < 0.2$), éstos tienden a atenuar dicho cociente en la zona dominada por el vórtice atrapado en la celda bajo el flujo rasante ($0.2 < y/l < 0.7$). Si se comparan los valores graficados en la Figura 4.50, Figura 4.51, Figura 4.52 y Figura 4.53, alrededor del punto $y/l = 0.5$ se distingue en el peldaño $L/k_s = 69.66$ (representativo del pico de la onda de presión a lo largo del aliviadero) una mayor variabilidad de la presión registrada en función del caudal y por tanto un peor ajuste del modelo a dichos puntos, mientras que los valores registrados en el mismo punto del peldaño $L/k_s = 63.51$ (representativo del valle de la onda de presión) siguen mejor las tendencias mostradas por el modelo ajustado. Por tanto, las diferencias observadas en la zona alrededor de $y/l = 0.5$, entre los registros de la presión media y desviación típica en el peldaño correspondiente al pico de la onda de presión y los correspondientes modelos ajustados, son los responsables del amortiguamiento del gráfico correspondiente al cociente de los perfiles en ambos escalones.

Ya que este modelo exponencial no ha permitido simular con precisión la zona de singularidad de los registros de presión (alrededor de $y/l = 0.5$) se analizará más adelante (apartado 4.2.1.2) una segunda propuesta de modelación que permita representar con mayor fidelidad dicha zona.

Si bien los ajustes de la Tabla 4.10 y la Tabla 4.11 se han establecido a partir de los estadísticos normalizados mediante los valores máximos y mínimos registrados experimentalmente, en la práctica estos valores extremos de cada uno de los estadísticos podrán obtenerse de las expresiones mostradas de la Tabla 4.6 a la Tabla 4.9. En la siguiente Tabla 4.12 se resumen las ecuaciones que se obtuvieron para la estimación de los extremos de cada estadístico, a fin de establecer su estandarización.

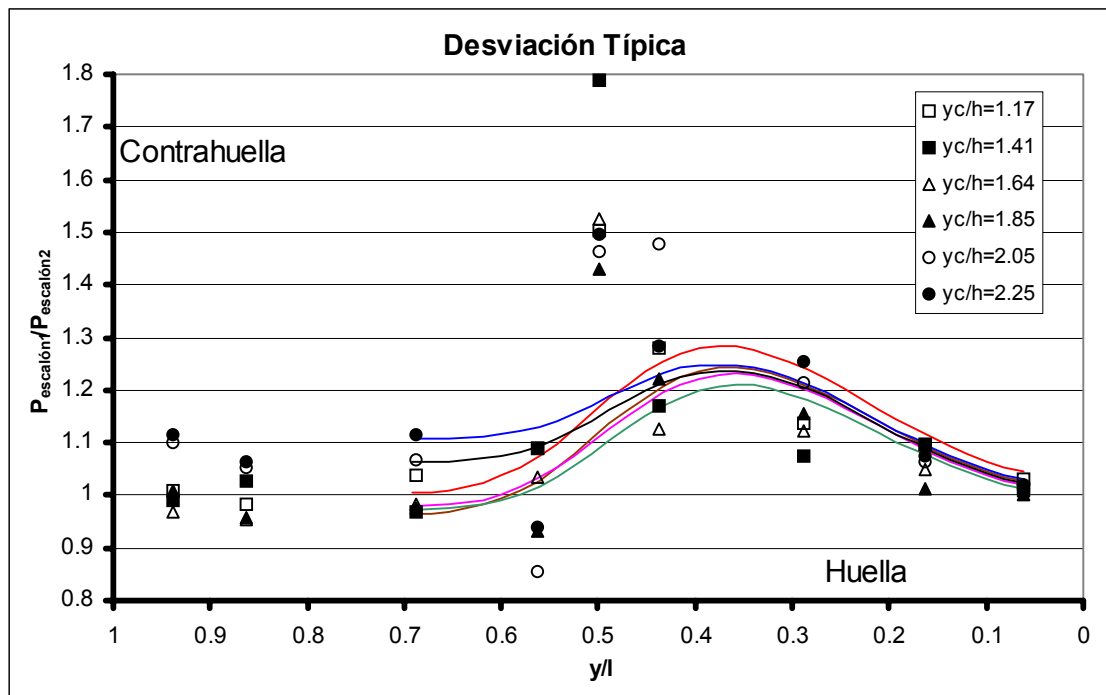
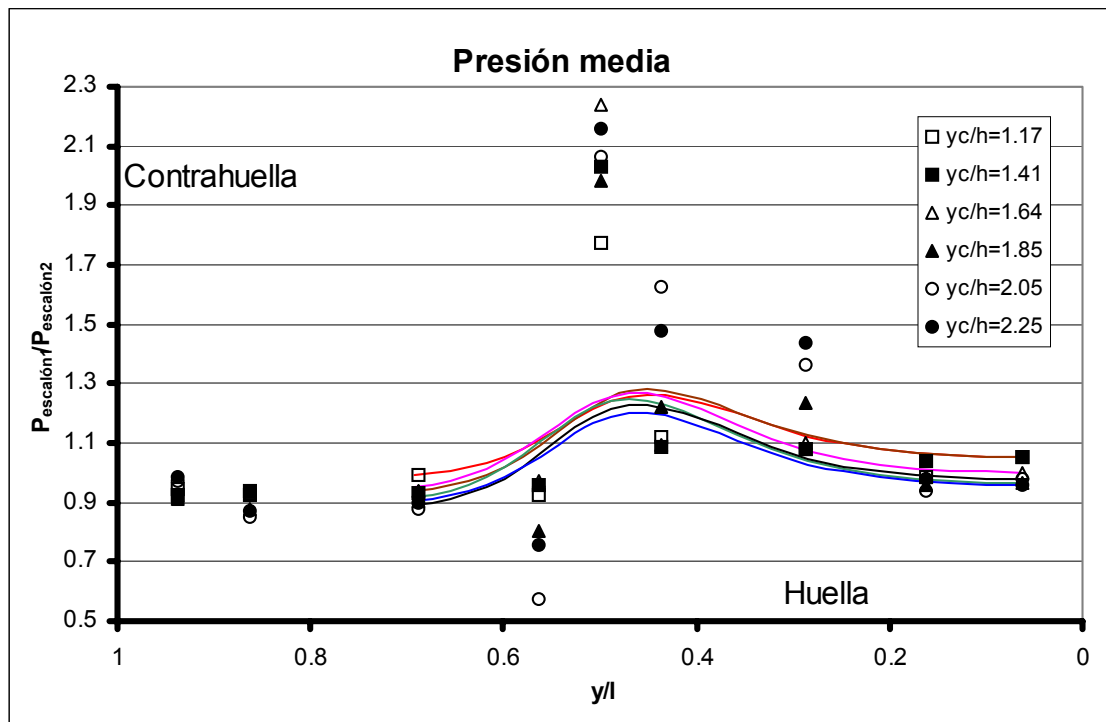


Figura 4.58. Cociente de los perfiles de presión media y de desviación típica, resultantes de los modelos ajustados en cada escalón (escalón 1: $L/k_s = 69.66$, escalón 2: $L/k_s = 63.51$).

Tabla 4.12. Expresiones propuestas para la estimación de las variables de estandarización de las expresiones (4.84) y (4.85).

Variable	Escalón (L/k_s)	Ecuación propuesta	Tabla	Rango de validez
Máxima presión media ($P_{media})_{max}$	69.663	(4.11)	Tabla 4.6	0.89 < y_c/h < 2.25
	63.51	(4.20)		
Mínima presión media ($P_{media})_{min}$	69.66	(4.17)		
	63.51	(4.26)		
Máxima desviación típica ($P_{desv})_{max}$	69.66	(4.29)	Tabla 4.7	
	63.51	(4.38)		
Mínima desviación típica ($P_{desv})_{min}$	69.66	(4.35)		
	63.51	(4.44)		
Máximo percentil del 95% ($P_{perc95%})_{max}$	69.66	(4.47)	Tabla 4.8	
	63.51	(4.56)		
Mínimo percentil del 95% ($P_{perc95%})_{min}$	69.66	(4.53)		
	63.51	(4.62)		
Máximo percentil del 5% ($P_{perc5%})_{max}$	69.66	(4.65)	Tabla 4.9	
	63.51	(4.74)		
Mínimo percentil del 5% ($P_{perc5%})_{min}$	69.66	(4.71)		
	63.51	(4.80)		

4.2.1.1.1. Simplificación del modelo

- Normalización de los estadísticos. Estimación de los extremos

En la página 4-38 se ha descrito con detalle el comportamiento de los diversos estadísticos estimados sobre un punto de la huella en función del caudal. Allí se apreció una clara tendencia lineal de los valores máximos registrados en cada caso, siendo ésta parabólica en el caso de los mínimos (ver tercer y cuarto ítem de dicha página 4-38).

Si se comparan los ajustes correspondientes a los valores extremos de cada estadístico, obtenidos para cada uno de los dos peldaños ensayados, se aprecian escasas diferencias. Ello permitió optar por un ajuste común a ambos escalones. Así se conseguirá una formulación más simple en los modelos de distribución de cada estadístico sobre las huellas, como se expondrá a continuación.

De la Figura 4.59 a la Figura 4.66 se representan las citadas comparaciones. En la Tabla 4.13 se resumen los ajustes correspondientes para la estimación de los valores extremos de cada estadístico, que se proponen. Es interesante notar que la diferencia entre la anterior Tabla 4.12 y la Tabla 4.13 estriba en que mientras en la primera se propone una expresión para el máximo y el mínimo de cada estadístico distinta en función del tipo de escalón que se analice, en la segunda se propone una única expresión para ambos escalones, a la vista de las escasas diferencias que se observan al compararlos (Figura 4.59 a la Figura 4.66).

En la Tabla 3 del apartado 2.2 del Anejo 2, se mostrarán los intervalos de confianza del 95% de cada uno de los coeficientes ajustados en la Tabla 4.13.

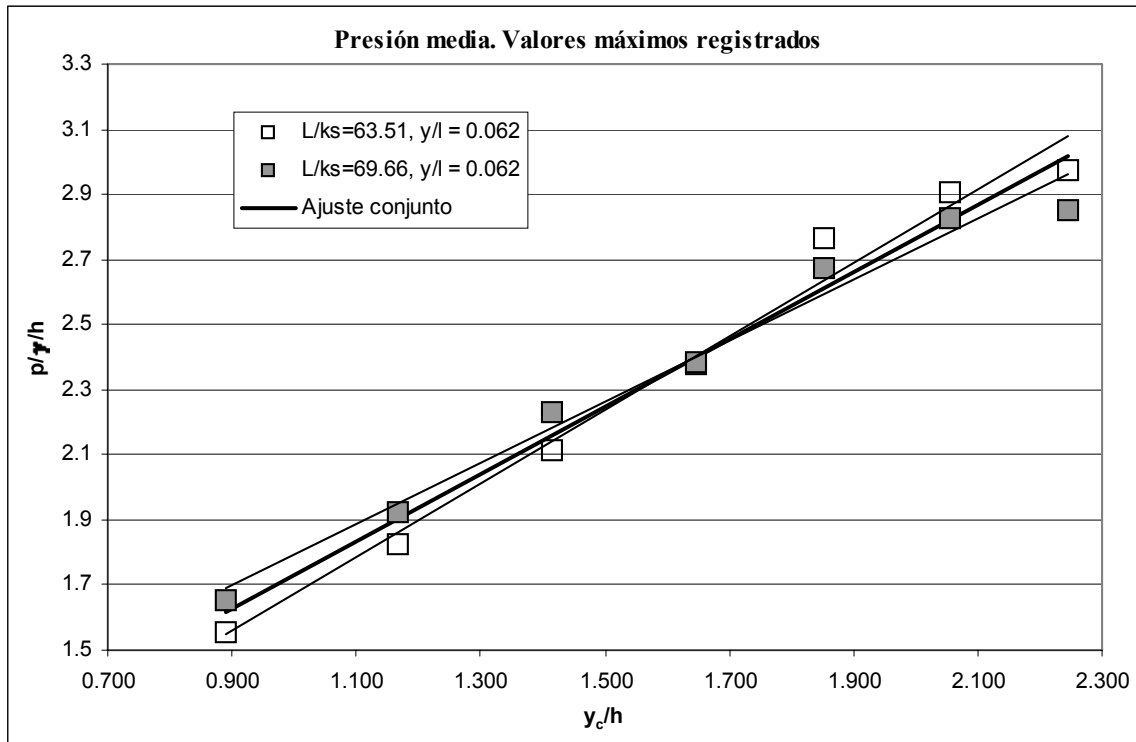


Figura 4.59. Comparación de las máximas presiones medias obtenidas, sobre las huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, en función del caudal circulante.

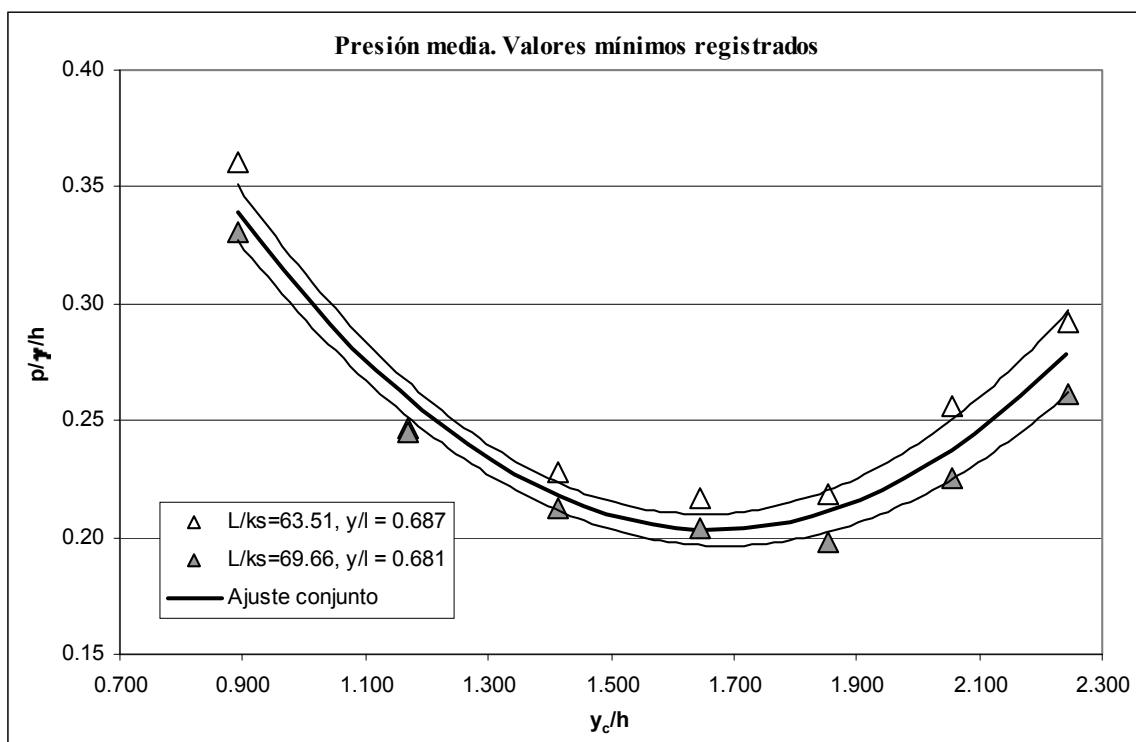


Figura 4.60. Comparación de las mínimas presiones medias obtenidas, sobre las huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, en función del caudal circulante.

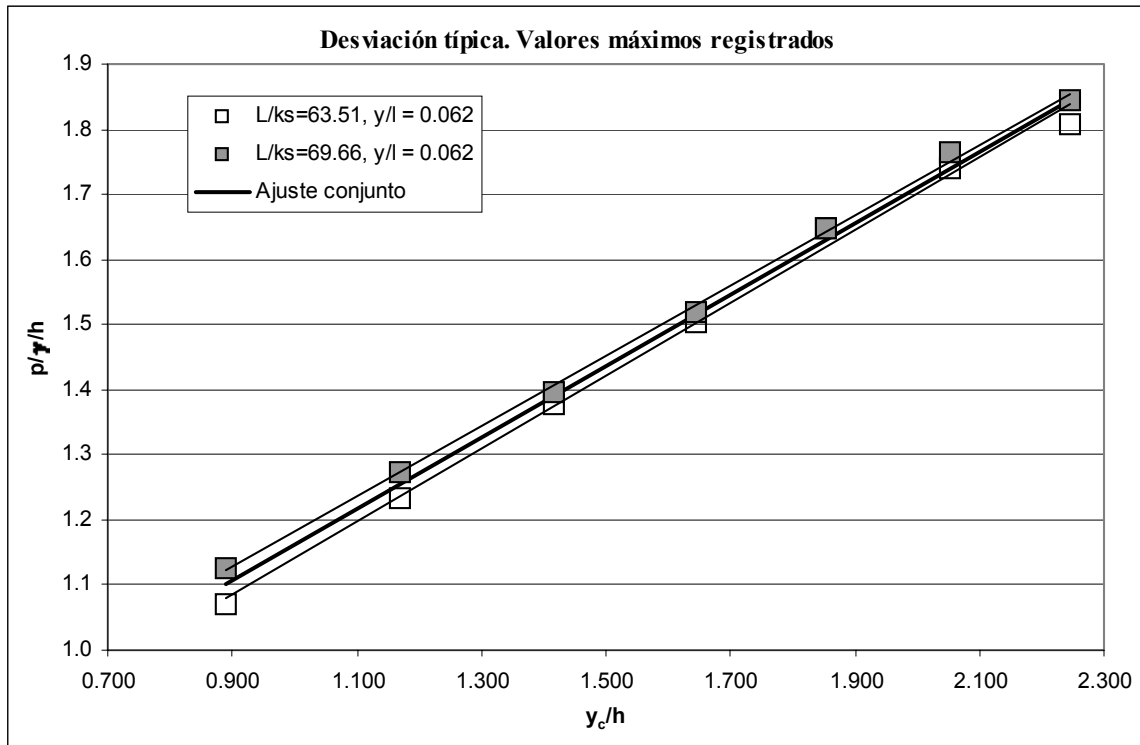


Figura 4.61. Comparación de las máximas desviaciones típicas obtenidas, sobre las huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, en función del caudal circulante.

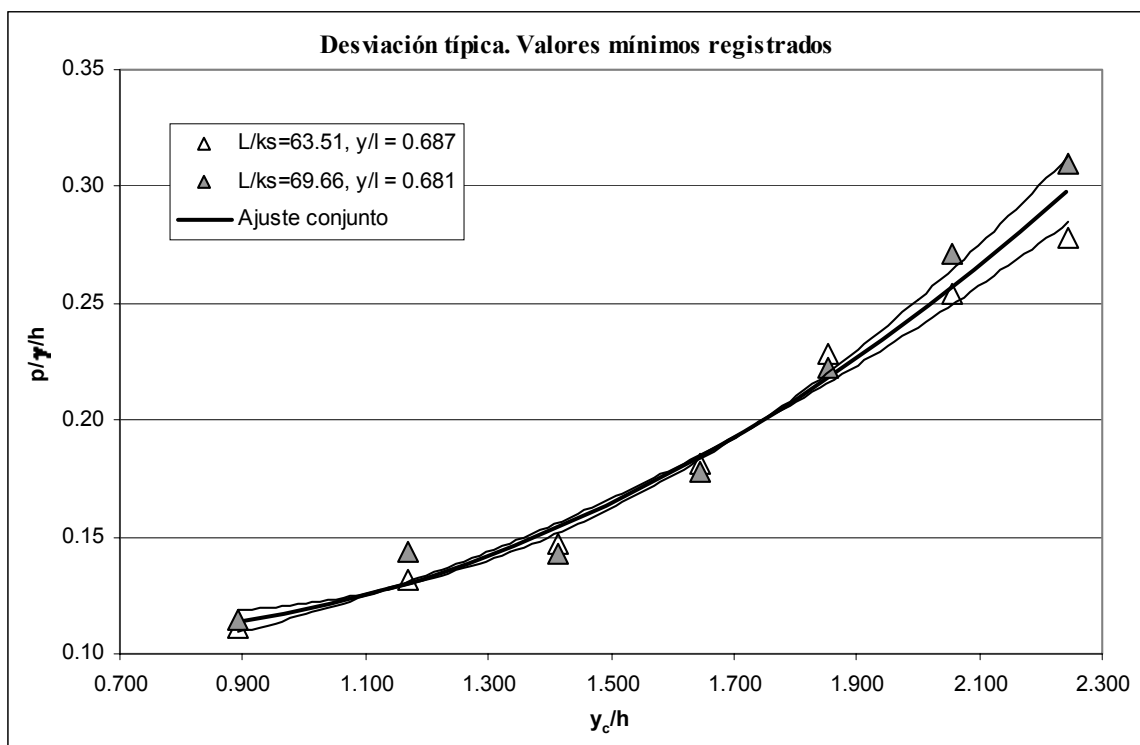


Figura 4.62. Comparación de las mínimas desviaciones típicas obtenidas, sobre las huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, en función del caudal circulante.

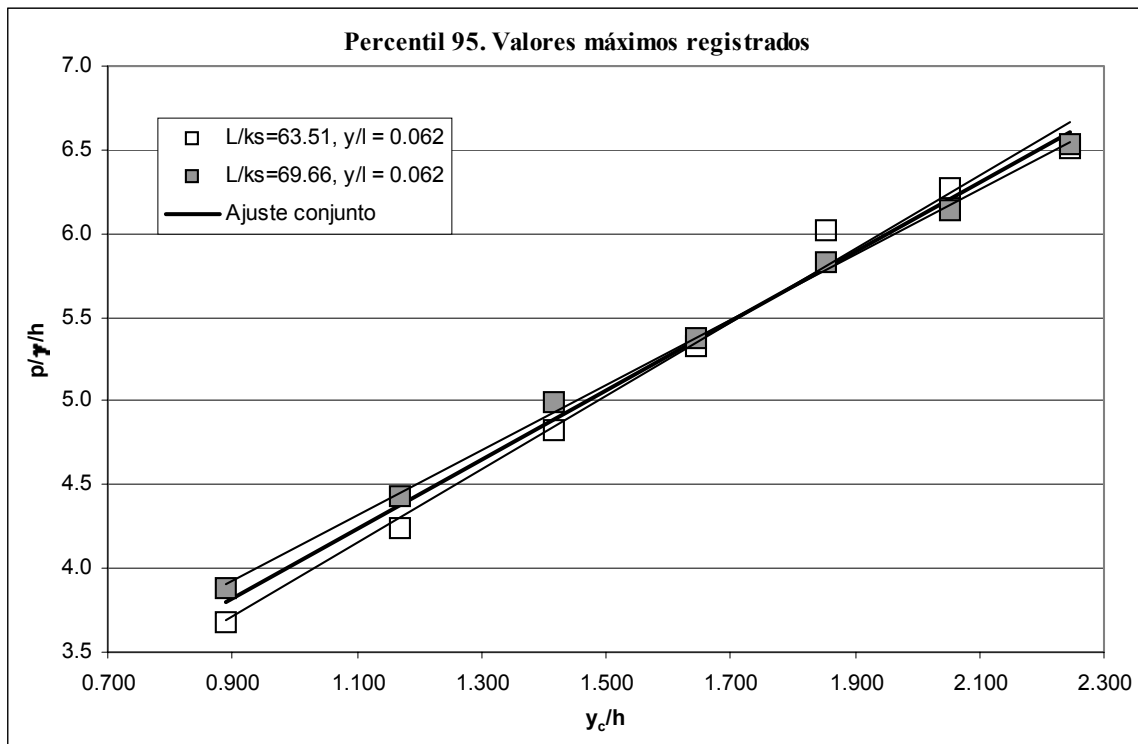


Figura 4.63. Comparación de los máximos percentiles del 95% obtenidos, sobre las huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, en función del caudal circulante.

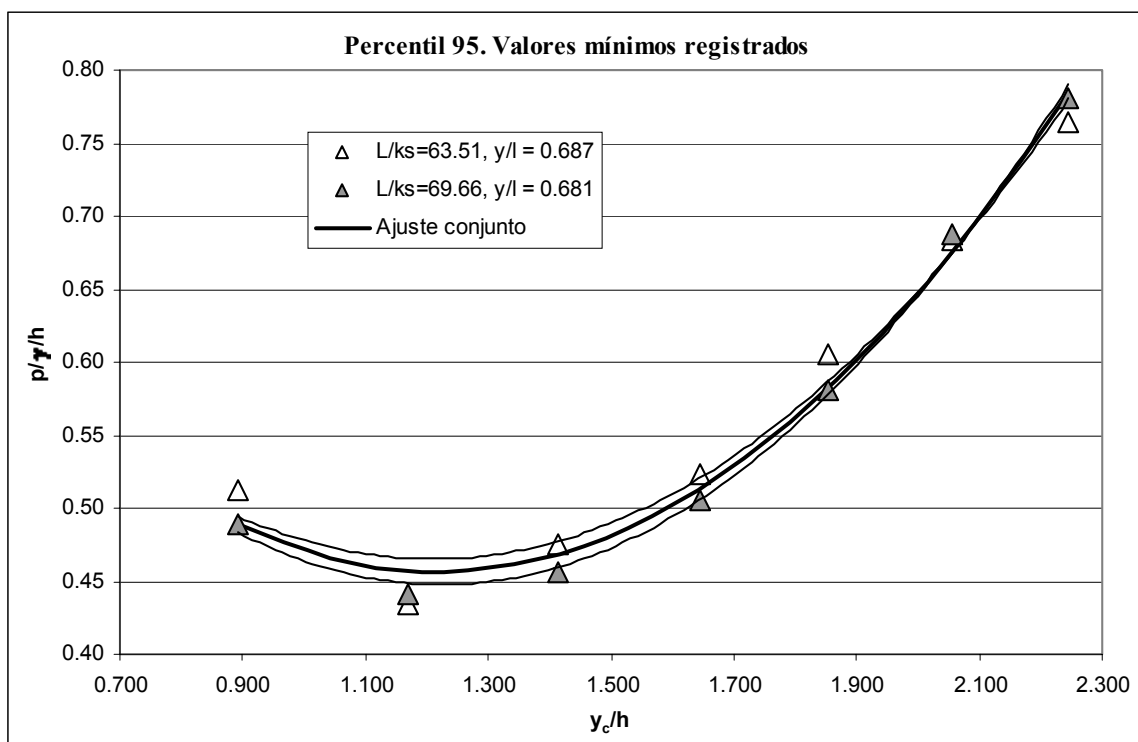


Figura 4.64. Comparación de los mínimos percentiles del 95% obtenidos, sobre las huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, en función del caudal circulante.

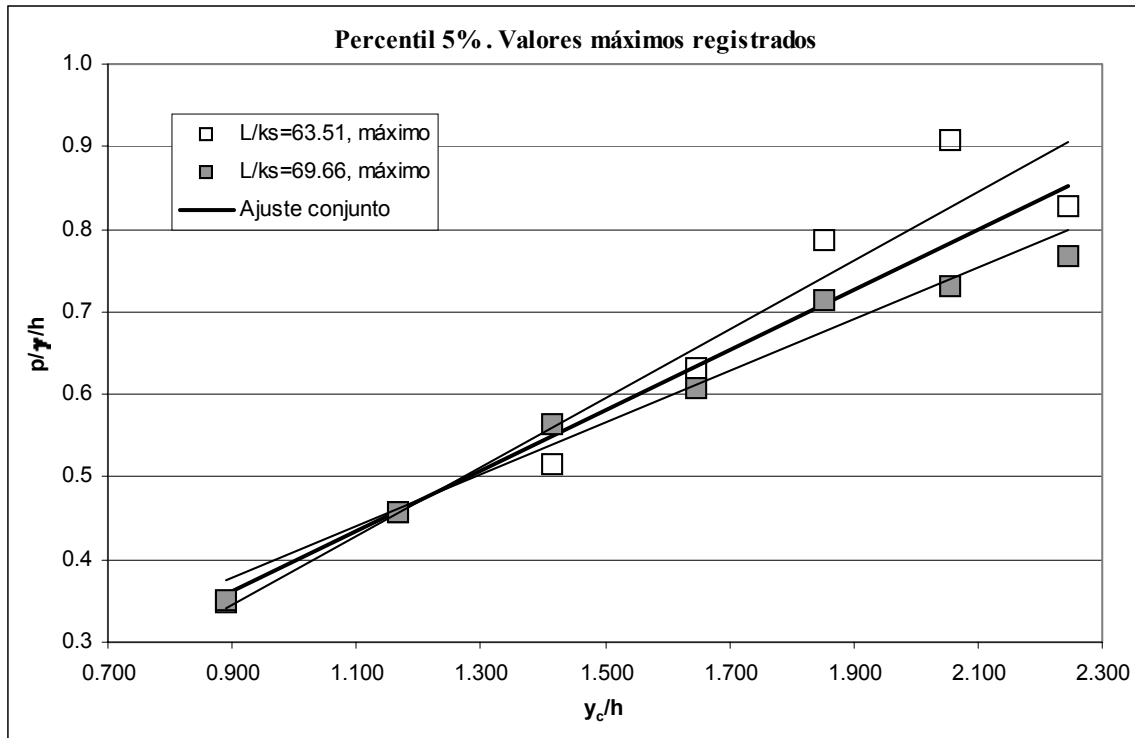


Figura 4.65. Comparación de los máximos percentiles del 5% obtenidos, sobre las huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, en función del caudal circulante.

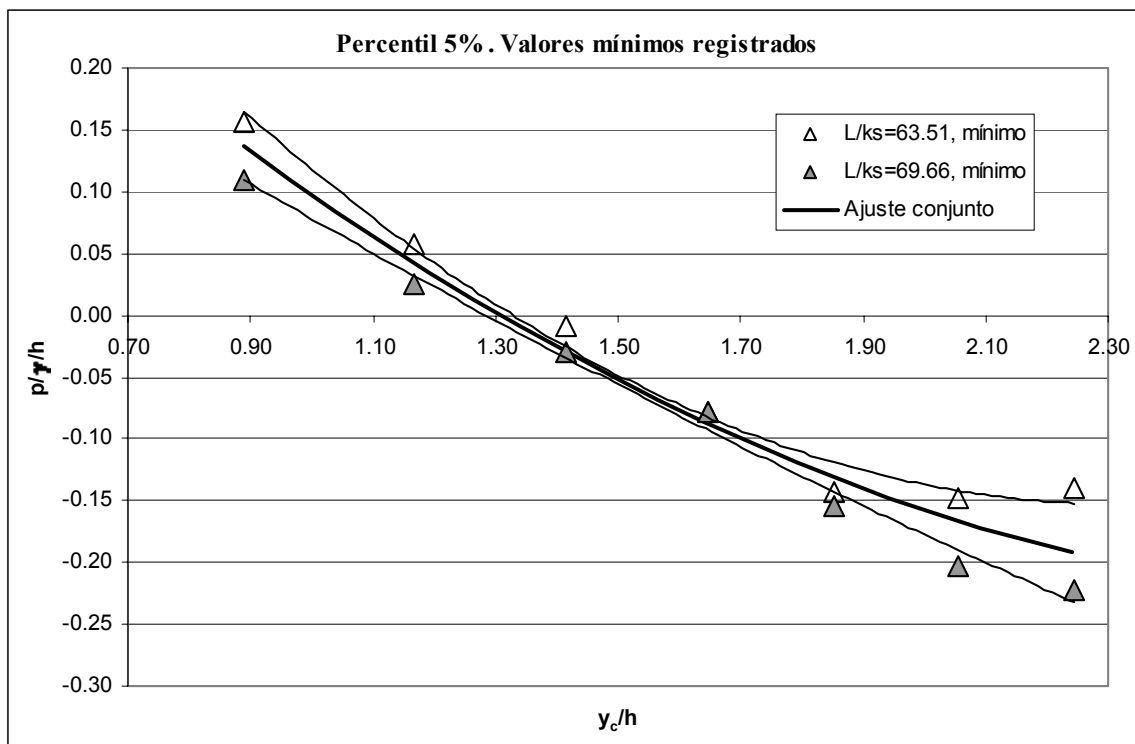


Figura 4.66. Comparación de los mínimos percentiles del 5% obtenidos, sobre las huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, en función del caudal circulante.

Tabla 4.13. Ecuaciones propuestas para la obtención de los valores extremos de los respectivos estadísticos, comunes a ambos escalones ($L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$). Válido para $0.89 < y_c/h < 2.3$.

Estadístico		Ecuación ajustada	Correlación (r)	Figura de referencia
Media	Máximo	$\frac{p}{\gamma}/h = 1.03 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.700$ (4.86)	0.987	Figura 4.59
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.227 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.756 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.832$ (4.87)	0.959	Figura 4.60
Desviación Típica	Máximo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.550 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.611$ (4.88)	0.997	Figura 4.61
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.073 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.091 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.137$ (4.89)	0.988	Figura 4.62
Percentil 95	Máximo	$\frac{p}{\gamma}/h = 2.07 \cdot \frac{y_c}{h} + 1.95$ (4.90)	0.994	Figura 4.63
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.310 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.755 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.916$ (4.91)	0.992	Figura 4.64
Percentil 5	Máximo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.375 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.019$ (4.92)	0.966	Figura 4.65
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.090 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.527 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.534$ (4.93)	0.976	Figura 4.66

▪ Simplificación del modelo. Reducción de los ajustes propuestos

En la Tabla 4.10 y la Tabla 4.11 se recogen los parámetros que permiten obtener la distribución de los valores de los estadísticos sobre la huella, diferenciando ambos escalones ($L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$). Estas leyes se presentan en la Figura 4.67 a la Figura 4.70, donde también se presenta una ley global ajustada conjuntamente para los dos peldaños. En la Tabla 4.14 y la Tabla 4.15, se muestran los coeficientes que constituyen dicho ajuste global a ambos escalones para cada estadístico.

Tabla 4.14. Valores de k y α –ecuación (4.84)– ajustados para la distribución sobre la huella de la presión media, desviación típica y percentil de 95%. Rango de validez $0 < y/l < 0.7$ y $1.1 < y_c/h < 2.3$.

Estadístico	$L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$		
	k	α	Correlación (r)
Presión media	23.6	3.14	0.959
Desviación típica	14.7	2.58	0.969
Percentil del 95%	18.5	2.83	0.964

Tabla 4.15. Valores de a , b , y c –ecuación (4.85)– ajustados para la distribución sobre la huella del percentil del 5% de la presión. Zona de validez sobre la huella $0.16 < y/l < 1$ y $1.1 < y_c/h < 2.3$.

Estadístico	$L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$			
	a	b	c	Correlación (r)
Percentil del 5%	4.50	-5.76	1.87	0.968

Las correlaciones obtenidas entre los modelos de cada estadístico y los correspondientes puntos son en cualquier caso superiores al 95%, al igual que se obtuvo en los modelos en los que se discriminó el tipo de peldaño (Tabla 4.10 y Tabla 4.11). Ello estaría mostrando la idoneidad de haber establecido este único ajuste a ambos escalones dejando para la normalización del estadístico que se esté analizando, tanto la influencia del escalón como del caudal. Para la normalización (ecuación (4.83)) de los cuatro estadísticos podrán utilizarse las expresiones mostradas en la anterior Tabla 4.13.

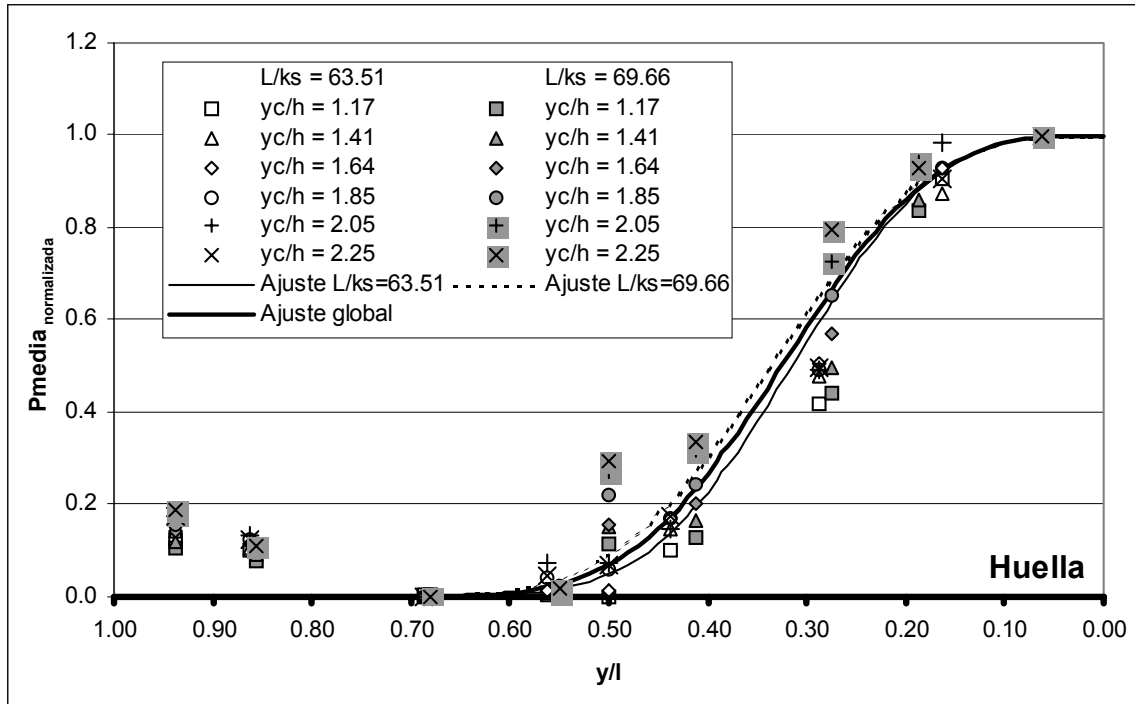


Figura 4.67. Comparación de los ajustes correspondientes a la presión media en $L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$ (trazo fino), con un modelo obtenido conjuntamente a todos los puntos medidos en ambos tipos de escalones (trazo grueso).

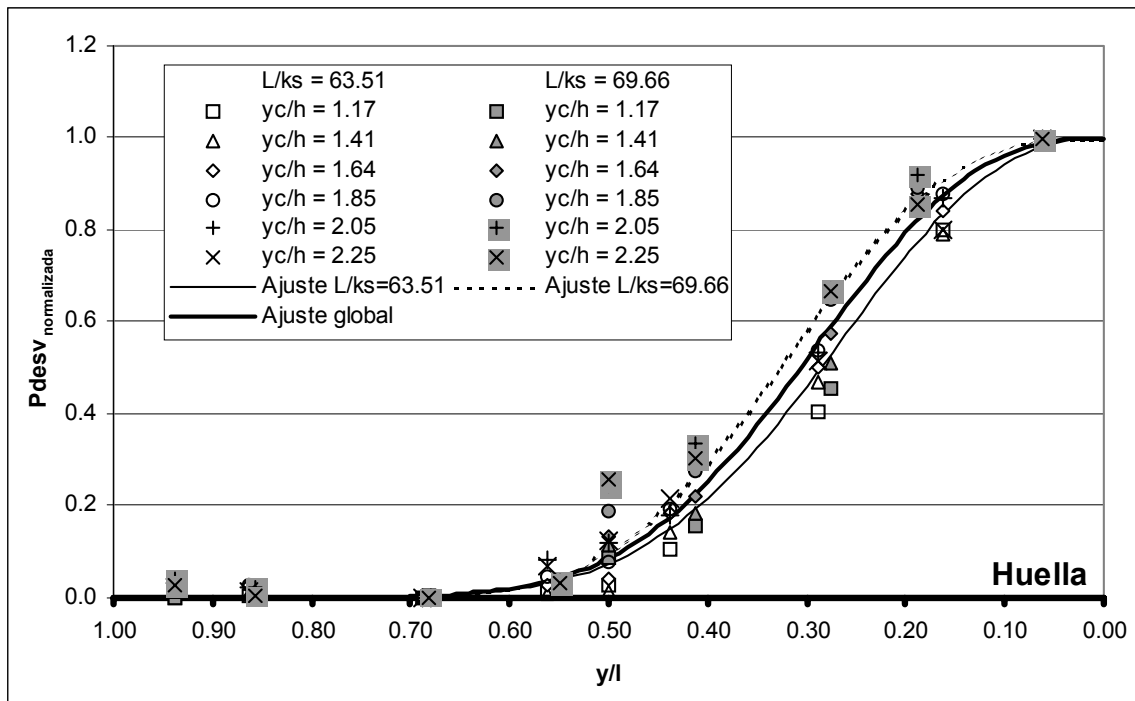


Figura 4.68. Comparación de los ajustes correspondientes a la desviación típica en $L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$ (trazo fino), con un modelo obtenido conjuntamente a todos los puntos medidos en ambos tipos de escalones (trazo grueso).

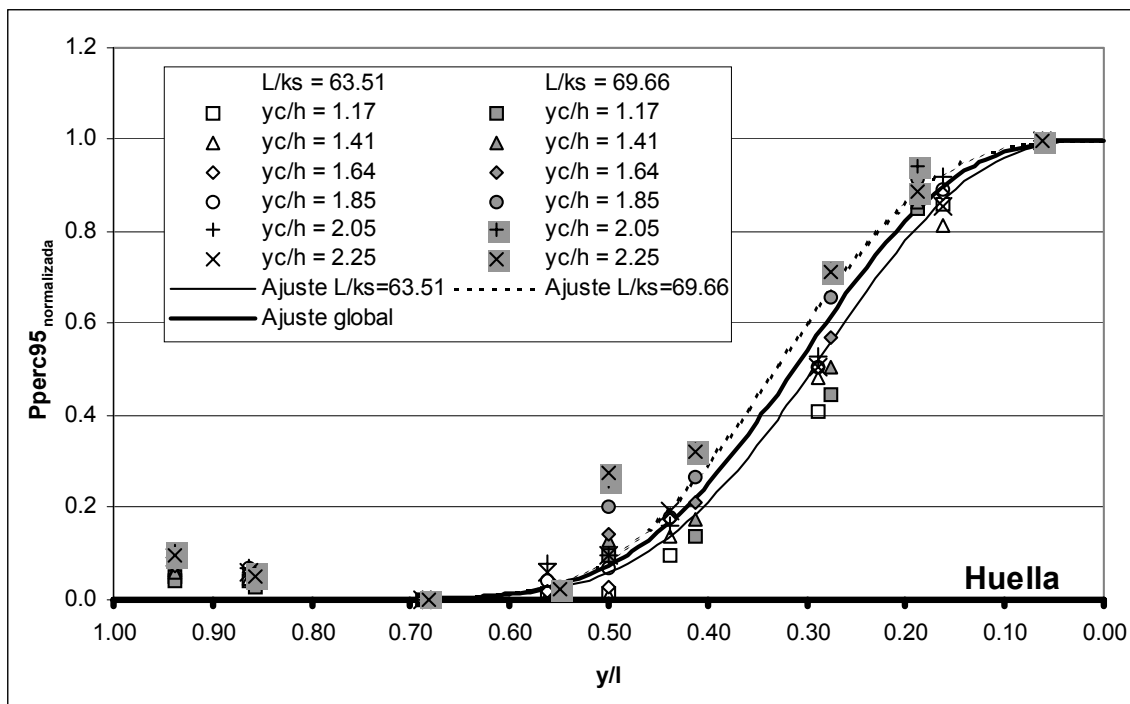


Figura 4.69. Comparación de los ajustes correspondientes al percentil del 95% en $L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$ (trazo fino), con un modelo obtenido conjuntamente a todos los puntos medidos en ambos tipos de escalones (trazo grueso).

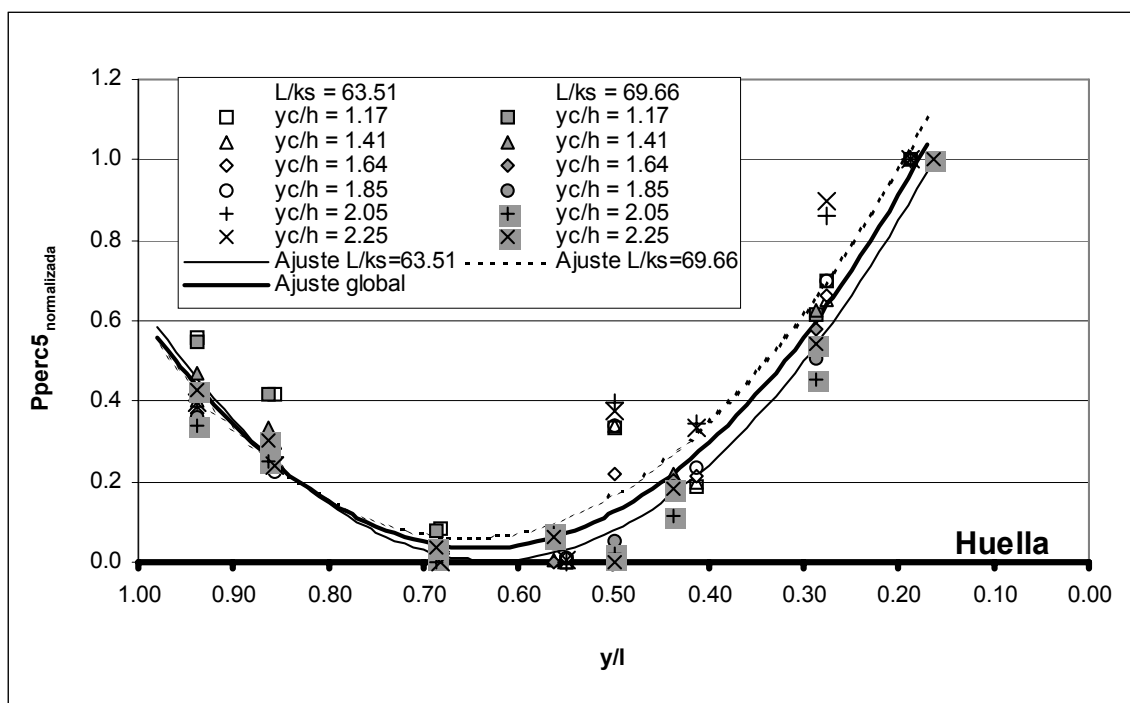


Figura 4.70. Comparación de los ajustes correspondientes al Percentil del 5% en $L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$ (trazo fino), con un modelo obtenido conjuntamente a todos los puntos medidos en ambos tipos de escalones (trazo grueso).

Obsérvese, en los gráficos anteriores correspondientes a la presión media, desviación típica y percentil del 95% (Figura 4.67a la Figura 4.70), como la estandarización de las presiones agrupa dichos estadísticos en el rango de p/h entre 0 y 1, con un mismo patrón de variación exponencial (expresión (4.84)), que en cada caso se ha ajustado con los coeficientes de la Tabla 4.14. En la siguiente Figura 4.71 se comparan los ajustes exponenciales, sobre la huella, correspondientes a los tres citados estadísticos normalizados (curvas en trazo fino). Las pequeñas diferencias que se observan en cada caso, conducen a pensar en unificar los tres ajustes en un único un patrón que se obtendría globalmente de los registros correspondientes a los tres estadísticos de manera simultánea (curva en trazo grueso).

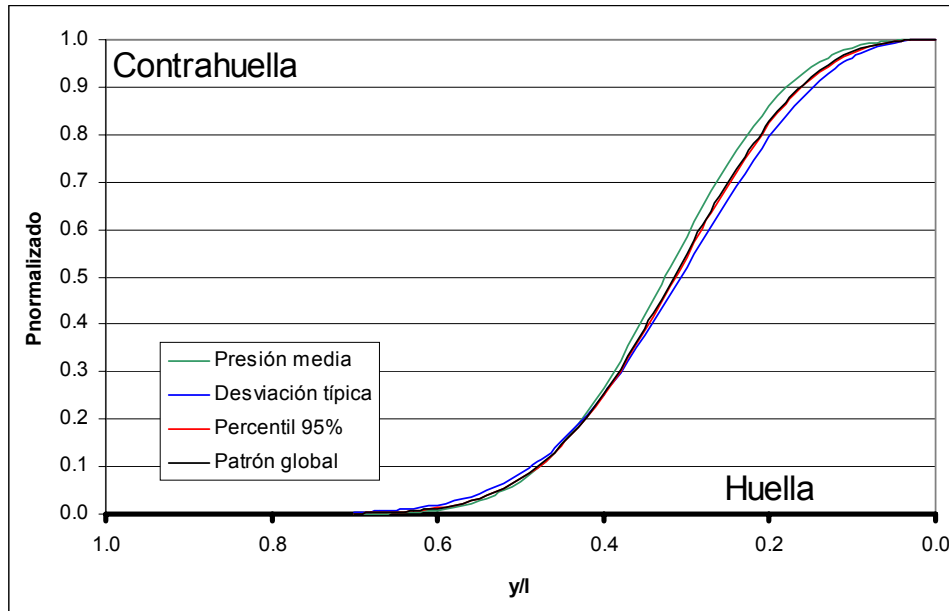


Figura 4.71. Comparación de los ajustes exponenciales correspondientes a la presión media, desviación típica y percentil del 95% normalizadas (curvas en verde, roja y azul), sobre la huella, con un patrón obtenido globalmente de los registros correspondientes a los tres estadísticos de manera simultánea (curva en color negro). Rangos de validez $0 < y/l < 0.7$ y $1.1 < y/h < 2.3$.

Este ajuste global ha sido obtenido estimando los valores de $(P_{\text{estadístico}})_{\text{max}}$ y $(P_{\text{estadístico}})_{\text{min}}$ a partir de los valores registrados en el laboratorio, para los dos peldaños analizados. Así, con dichos valores máximo y mínimo de cada estadístico, se procederá a normalizar cada uno de ellos y a continuación a estimar los parámetros que permitirán ajustar la citada distribución global de estadísticos representativos de la presión. Los resultados se muestran en la Tabla 4.16. A pesar que los resultados que se obtienen con esta estimación global propuesta presentan unas correlaciones muy elevadas, nótese la incongruencia conceptual que se está introduciendo pues, si bien se propone estimar los valores máximos a partir de los registros llevados a cabo en el punto $y/l = 0.062$, se ha supuesto de partida que dicho máximo deberá darse en $y/l = 0$, tal y como se ha descrito en el segundo párrafo del apartado 4.2.1.1 (página 4-47).

Tabla 4.16. Valores de k y α –ecuación (4.84)– para la distribución global sobre la huella de la presión media, desviación típica y percentil de 95%. Rango de validez $0 < y/l < 0.7$ y $1.1 < y/h < 2.3$

Estadístico	$L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$		
	k	α	Correlación (r)
Presión media	18.9	2.86	0.960
Desviación típica			
Percentil del 95%			

En el apartado 2.3 del Anejo 2, se describe el análisis que se desarrollo para analizar el grado de fiabilidad de este primer modelo propuesto. Se mostrará primero la existencia de correlación significativa en los valores de los respectivos estadísticos normalizados, y la variable explicativa usada en el ajuste (i. e posición de los puntos de medida). Finalmente se detallarán los intervalos de confianza del 95% de cada uno de los coeficientes de ajuste mostrados en las anteriores Tabla 4.15 y Tabla 4.16.

4.2.1.1.2. Aplicación del primer modelo

A continuación se describirá el procedimiento que se sugiere seguir para la evaluación, mediante el primer modelo propuesto, de la distribución de presiones que un caudal, en el rango $1.1 < y_c/h < 2.3$, ejercerá sobre la huella de un escalón cualquiera. Dicho escalón debe encontrarse ubicado en la zona de flujo completamente desarrollado, de un aliviadero escalonado, diseñado con peldaños que definan una pendiente próxima a $h/l = 1.25$:

1. Se establecerá el patrón estandarizado con la ecuación (4.84) si el estadístico que se pretende analizar corresponde a la presión media, la desviación típica o el percentil del 95%, y con la (4.85) si se refiere a su percentil del 5%. Los coeficientes que ajustan cada uno de estos modelos se encuentran en la Tabla 4.15 y Tabla 4.16.
2. Establecido cual es el caudal de diseño y_c/h , i. e. 2.25, se procederá a obtener los estimadores máximo y mínimo de cada uno de los estadísticos que se vayan a estudiar (Tabla 4.13). Los valores que se obtendrían en el caso de $y_c/h = 2.25$, así como las expresiones utilizadas, se muestran en la siguiente Tabla 4.17.
3. Finalmente se podrá estimar la distribución de cada estadístico deshaciendo su normalización a partir de los valores calculados en el punto 1. En los gráficos de la Figura 4.72 a la Figura 4.75 se muestran las distribuciones que se obtendrían en cada caso para un caudal $y_c/h = 2.25$. Dichos perfiles se compararan en dichos gráficos, a su vez, con los registros obtenidos en el laboratorio.

Tabla 4.17. Estimación de los valores máximo y mínimo correspondientes a cada uno de los estadísticos a analizar.

Estadístico		Ecuación propuesta	$P/y_c/h$ correspondiente (i. e. $y_c/h = 2.25$)
Presión media	Máximo	(4.86)	3.02
	Mínimo	(4.87)	0.280
Desviación típica	Máximo	(4.88)	1.85
	Mínimo	(4.89)	0.302
Percentil del 95%	Máximo	(4.90)	6.61
	Mínimo	(4.91)	0.787
Percentil 5%	Máximo	(4.92)	0.862
	Mínimo	(4.93)	-0.193

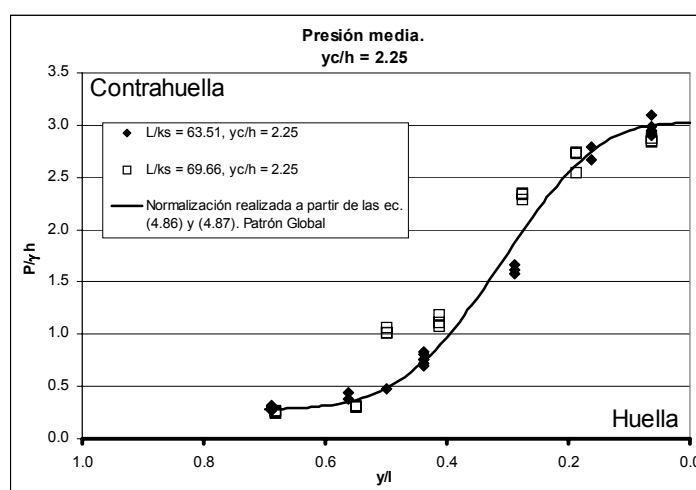


Figura 4.72. Ejemplo para la obtención de la distribución de la presión media sobre la huella de un escalón para $y_c/h = 2.25$. Distribución obtenida a partir de la estimación de los valores máximo y mínimo con las expresiones (4.86) y (4.87). Comparación con los valores registrados experimentalmente.

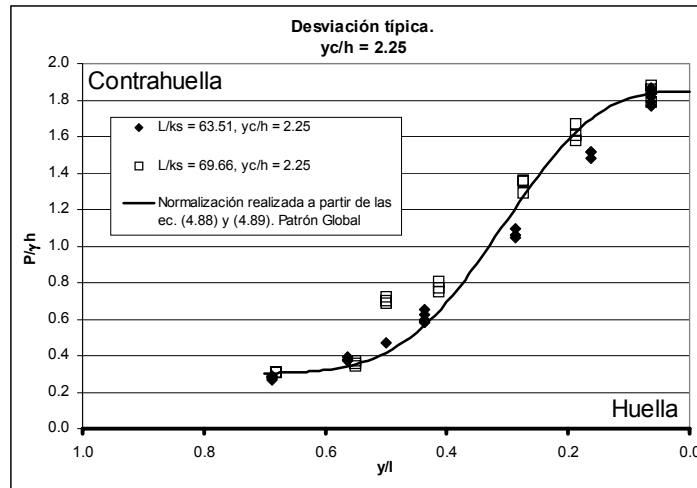


Figura 4.73. Ejemplo para la obtención de la distribución de la desviación típica de la presión, sobre la huella de un escalón para $y_c/h = 2.25$. Distribución obtenida a partir de la estimación de los valores máximo y mínimo con las expresiones (4.88) y (4.89). Comparación con los valores registrados experimentalmente.

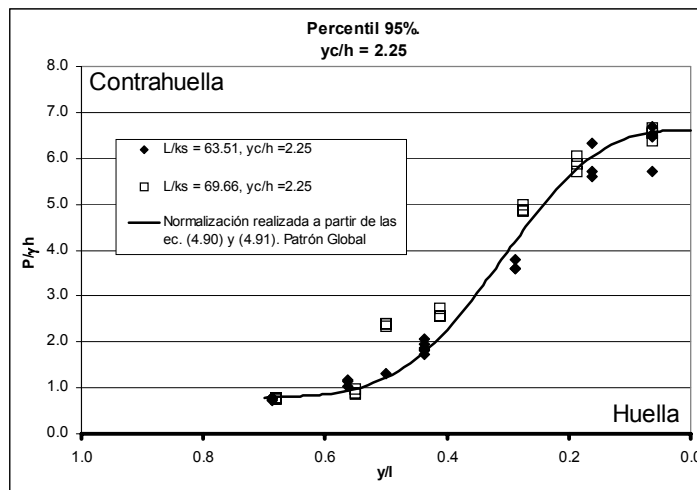


Figura 4.74. Ejemplo para la obtención de la distribución del percentil del 95% sobre la huella de un escalón para $y_c/h = 2.25$. Distribución obtenida a partir de la estimación de los valores máximo y mínimo con las expresiones (4.90) y (4.91). Comparación con los valores registrados experimentalmente.

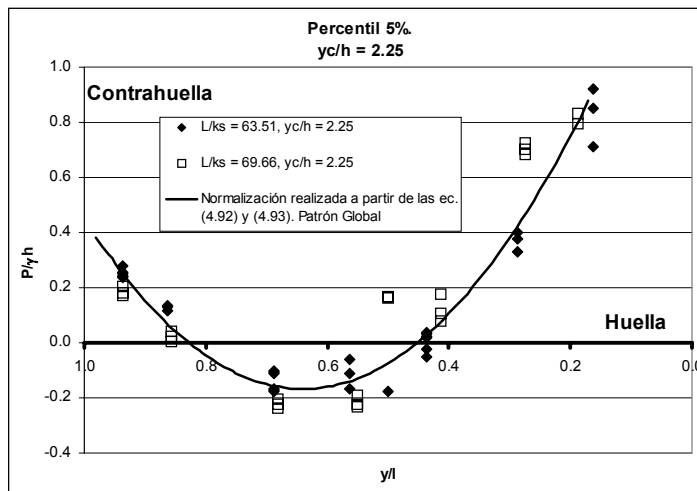


Figura 4.75. Ejemplo para la obtención de la distribución del percentil del 5% sobre la huella de un escalón para $y_c/h = 2.25$. Distribución obtenida a partir de la estimación de los valores máximo y mínimo con las expresiones (4.92) y (4.93). Comparación con los valores registrados experimentalmente.

4.2.1.2. Segunda propuesta de modelación de los perfiles de presión en la huella

Una vez establecida la normalización de los cuatro estadísticos que se están utilizando para describir los perfiles de presión sobre los peldaños, se procede al ajuste de un segundo patrón. Se ha observado que un ajuste exponencial funcionaba suficientemente bien para modelar las distribuciones espaciales de la presión media, desviación típica y percentil del 95%. No es así para el percentil del 5%. Debido al interés en simular adecuadamente el mínimo que este estadístico presenta sobre la huella, se ajustó en este caso un polinomio de segundo grado.

De cualquier manera, las distribuciones de presión obtenidas sobre las huellas, en todos sus estadísticos (ver los gráficos de la Figura 4.32 a la Figura 4.39), muestran un valor mínimo que no podrá ser simulado correctamente con la expresión exponencial comentada anteriormente (sí se simula el valor pero no su posición). Una función cosenoidal, como la (4.94), permitirá el análisis tanto del máximo (en $y/l = 0$) como del mencionado mínimo.

$$[P_{\text{estadístico}}]_{\text{normalizado}} = A \cos\left(\frac{y}{l} \cdot \frac{\pi}{2C}\right) + B \quad (4.94)$$

Una expresión de este tipo presenta sus extremos en,

$$\frac{y}{l} \frac{\pi}{2C} = m \cdot \pi \quad m = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4.95)$$

Correspondiendo a los valores pares los máximos y a los impares los mínimos siempre que el coeficiente A sea positivo (viceversa si A es negativo). Así, el valor mínimo sobre el peldaño, supuesto A positivo (hipótesis que se comprueba posteriormente), se dará para:

$$\left(\frac{y}{l}\right)_{\min} = 2C \quad (4.96)$$

En el caso de las distribuciones de la presión media, desviación típica y percentil del 95%, su comportamiento descrito en la página 4-38, a partir de la observación de los gráficos de la Figura 4.42 a la Figura 4.47, permite afirmar que la normalización de estos estadísticos los transforma en nuevas variables, tales que, teóricamente, en la posición de la huella $y/l = 2C$ deben valer $[P_{\text{estadístico}}]_{\text{normalizado}} = 0$, mientras que en $y/l = 0$ deben valer $[P_{\text{estadístico}}]_{\text{normalizado}} = 1$. Imponiendo, pues, estas condiciones se observa que los coeficientes A y B del ajuste (4.94) deberían ser ambos igual a $1/2$. Por lo que respecta al percentil del 5%, a partir de la observación de la Figura 4.48 y la Figura 4.49, y tal y como se describe en la citada página 4-38, los valores máximos de dicho estadístico no corresponden exactamente a la arista externa del peldaño ($y/l = 0$), más aún, parece que para los caudales mayores ensayados ($1.5 < y_c/h < 2.3$) la posición de dichos valores máximos tiende a desplazarse sensiblemente hacia aguas arriba del peldaño. A pesar de ello, y ya que los valores del percentil del 5% estimados junto a la arista externa del escalón ($y/l = 0.062$) no difieren en exceso de sus valores máximos (ver la Figura 4.48 y la Figura 4.49), en aras de una mayor simplicidad del modelo se consideró que, también en el caso del percentil del 5%, los valores máximos se encontraban sobre la arista externa del escalón, por lo cual, también en este caso, los coeficientes A y B del ajuste (4.94) podrán considerarse ambos igual a $1/2$.

Al objeto de obtener la posición del mínimo correspondiente a un estadístico determinado se procedió del siguiente modo: para un caudal, peldaño y estadístico dados se ajustó una expresión del tipo (4.94), para diferentes valores de $2C$. Ello se hizo sobre los datos sin normalizar. Esto permitió obtener para cada estadístico los valores de $(2C)$ que mejor ajustaban a cada caudal $y_c/h \geq 0.891$. Así se obtuvo, para cada estadístico, un conjunto de pares de puntos $(2C, y_c/h)$. Posteriormente, a estos pares de puntos se ajustó una expresión del tipo:

$$2C = \left(\frac{y}{l}\right)_{\min} = \alpha \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right) + \gamma \quad (4.97)$$

Imponiendo, pues, que los coeficientes A y B sean igual a $1/2$, se comprende que el modelo pasa a depender únicamente de 3 parámetros, precisamente α , β y γ de la anterior ecuación (4.97). En dicha ecuación radica la influencia del tipo de peldaño y del caudal circulante en la forma de los patrones adimensionalizados de los cuatro estadísticos de la presión.

En la Figura 4.76 se muestra como varía la estimación de la posición de los mínimos de los perfiles de la presión media, desviación típica y percentiles del 95% y 5%, comparativamente para ambos escalones. De dicha figura pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- Para el menor de los caudales ensayados ($y_c/h = 0.891$) la posición del mínimo es prácticamente coincidente para todos los peldaños y todos los estadísticos ensayados (incluido el percentil del 5%). Cabe recordar que este caudal se sitúa en el límite del flujo rasante. Para el siguiente caudal medido ($y_c/h = 1.17$), ya en flujo rasante bien establecido, se muestra una clara diferencia entre las posiciones de los mínimos correspondientes al percentil del 5% por un lado y las de los otros tres estadísticos por otro, no existiendo, para este caudal, diferencia apreciable entre ambos peldaños. Es para caudales superiores a este valor donde ya de una forma clara se percibe un comportamiento diferente entre los dos peldaños ensayados.
- Si el escalón es representativo de un pico ($L/k_s = 69.66$) los valores mínimos muestran una tendencia a alejarse de la arista exterior del escalón, respecto de la posición en la que éstos aparecen en un peldaño representativo de un valle ($L/k_s = 63.51$) de la onda estacionara de presión a lo largo del aliviadero que se describe en el apartado 3.2.3.
- Como ya se ha comentado, en general parece mostrarse un comportamiento algo distinto entre el percentil del 5% y los otros tres estadísticos (media, desviación típica y percentil del 95%).

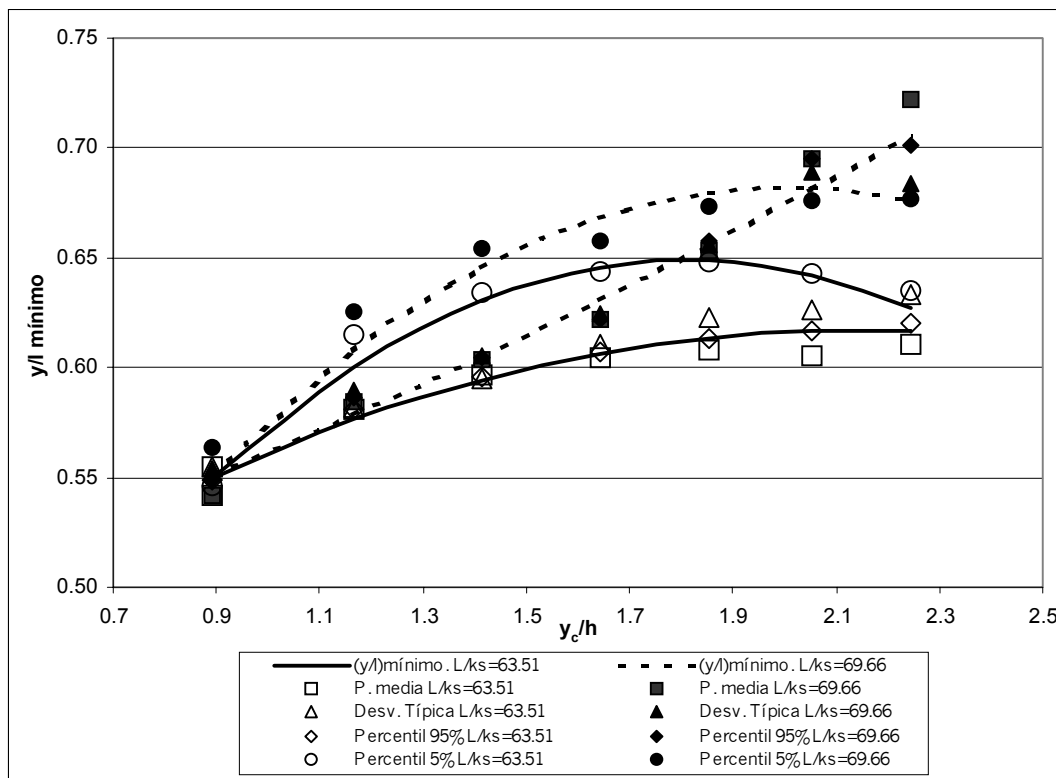


Figura 4.76. Posición y/l sobre la huella en la que se estima el mínimo de los perfiles de la presión media, desviación típica y percentiles del 95% y 5% en los peldaños $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$.

Tabla 4.18. Coeficientes α , β y γ para el ajuste global de la expresión (4.97). Validez para $0.89 < y_c/h < 2.3$.

Estadístico	Escalón (L/k_s)	α	β	γ	Correlación (r)
Media	63.51	-0.043	0.184	0.420	0.974
Desviación típica					0.988
Percentil 95%					0.997
Percentil 5%					0.984
Media	69.66	0.013	0.074	0.474	0.993
Desviación típica					0.984
Percentil 95%					0.990
Percentil 5%					0.987

- Por lo que respecta a la presión media, desviación típica y percentil del 95%, sus mínimos se sitúan más hacia la contrahuella cuanto mayor es el caudal circulante. Para caudales inferiores a $y_c/h = 1.64$ la posición de los mínimos, correspondiente a los tres estadísticos, es prácticamente coincidente en ambos peldaños. Para caudales superiores la posición es tanto más diferente cuanto mayor es el caudal.
- El percentil del 5% muestra un comportamiento similar al anterior, aunque para los caudales mayores parece tender a estabilizar la ubicación de su mínimo, e incluso en el escalón $L/ks = 63.51$ parece mostrar un caudal para el cual la distancia a la contrahuella es mínima.
- En la Tabla 4.18 se muestran los coeficientes de la ecuación (4.97) que se han ajustado, según las características descritas, para cada estadístico y para escalón. En el caso de la presión media, desviación típica y percentil del 95%, merece la pena destacar que las diferencias en la posición de los respectivos valores mínimos no superan $\Delta(y/l) = 0.02$ (Figura 4.76). Ello es así para ambos peldaños analizados, lo que invita, para simplificar la estima de la ubicación de los mínimos correspondientes a la presión media, desviación típica y percentil del 95%, a ajustar una única formulación para los tres estadísticos, tal y como se representa en el citado gráfico y se muestra en la citada tabla. Además, cabe indicar que estos ajustes se han determinado obligando a que las cuatro curvas (representadas en la Figura 4.76) presenten idéntico valor de $(y/l)_{min}$ (igual a 0.55) para $y_c/h = 0.891$.

Igualmente, se podría analizar la posición de los máximos de cada estadístico. No obstante, cabe suponer que éste presenta un valor similar al registrado en $y/l = 0.062$, según lo visto en el anterior apartado 4.2.1.1

Una vez conocida la posición de los máximos y mínimos de los estadísticos, se procederá al análisis de su distribución espacial (expresión (4.94)). Primero se normalizaron (expresión (4.83)) utilizando los extremos de cada estadístico estimados a partir de los propios registros experimentales, por coherencia con el proceso de ajuste utilizado en el anterior modelo de tipo exponencial (apartado 4.2.1.1). En los gráficos de la Figura 4.77 a la Figura 4.84, se muestran los ajustes obtenidos, por mínimos cuadrados, para cada uno de los caudales ensayados, para cada escalón analizado y a partir de la estandarización de los diferentes estadísticos (en trazo discontinuo). Estas curvas se comparan con otras (en trazo continuo) obtenidas al imponer para el patrón (4.94) que los coeficientes A y B valgan $1/2$ y que los valores del parámetro $2C = (y/l)_{min}$, para cada caudal ensayado, correspondan a los mostrados en la Figura 4.76. Nótese que, a diferencia del anterior patrón exponencial, éste ajuste, no consiste en una única curva representativa de todos los caudales simultáneamente, sino que, gracias a la dependencia del parámetro $2C$ con el caudal (ecuación (4.97)), en este caso se establece una familia de curvas. En las citadas figuras se observará un buen solapamiento de dicha familia de curvas a las previamente establecidas a partir de los registros experimentales.

De nuevo, para el menor caudal $y_c/h = 0.891$, se constata un comportamiento algo diferenciado del resto. Por este motivo, al igual que se estableció en el anterior patrón exponencial, se optó por no considerar para el ajuste del modelo propuesto los valores correspondientes a dicho caudal.

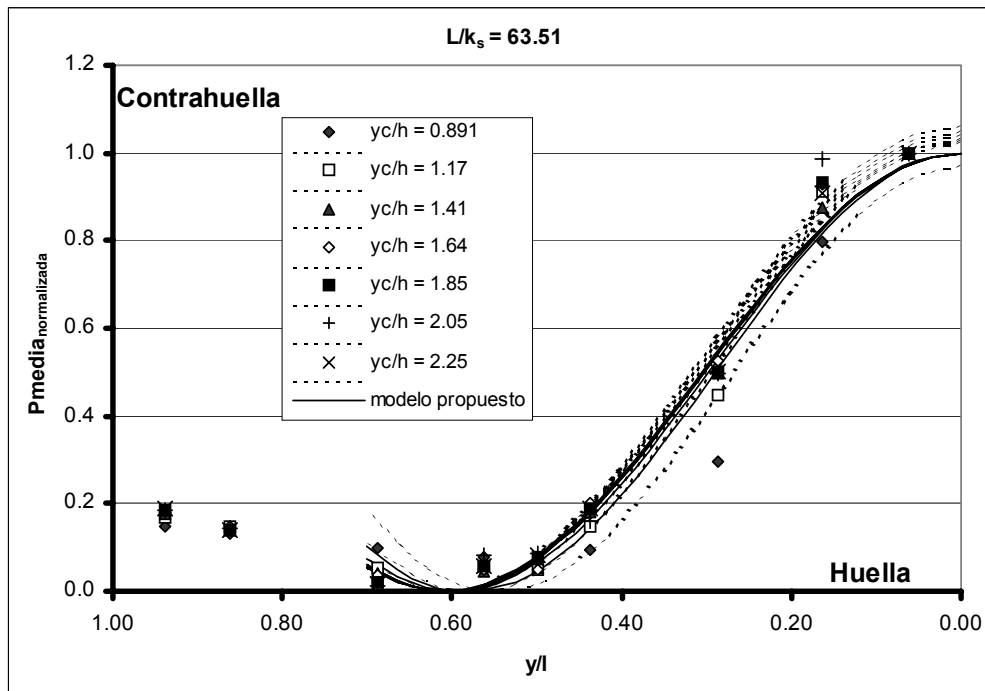


Figura 4.77. Presión media estandarizada. Escalón $L/k_s = 63.51$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto (ecuación (4.94)), imponiendo $A = B = 1/2$ (trazo continuo). Los ajustes tienen validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$. No se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

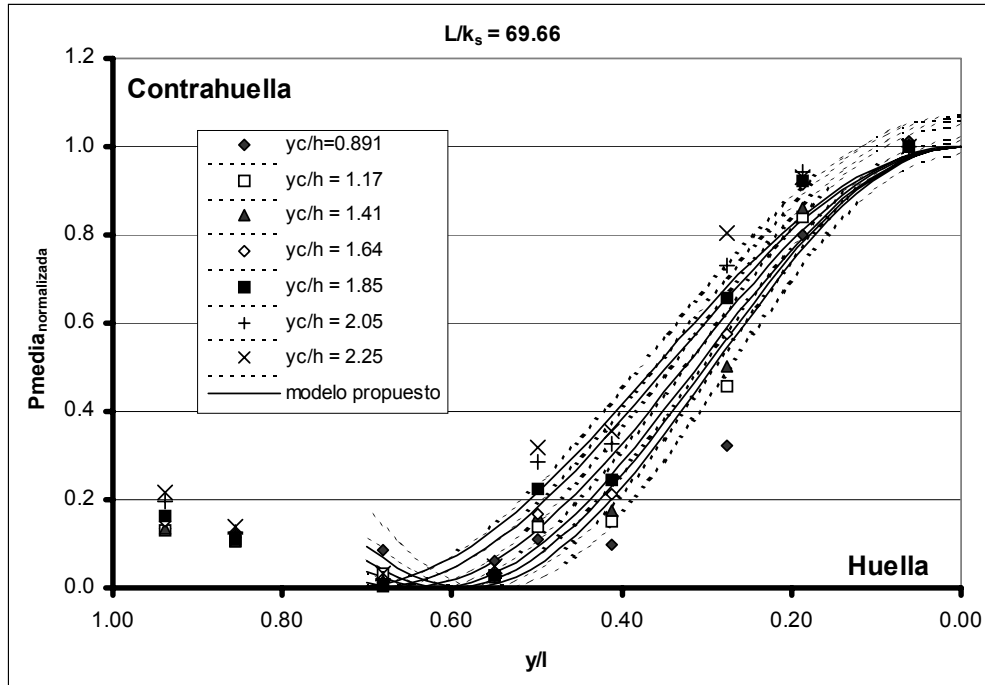


Figura 4.78. Presión media estandarizada. Escalón $L/k_s = 69.66$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto (ecuación (4.94)), imponiendo $A = B = 1/2$ (trazo continuo). Los ajustes tienen validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$. No se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

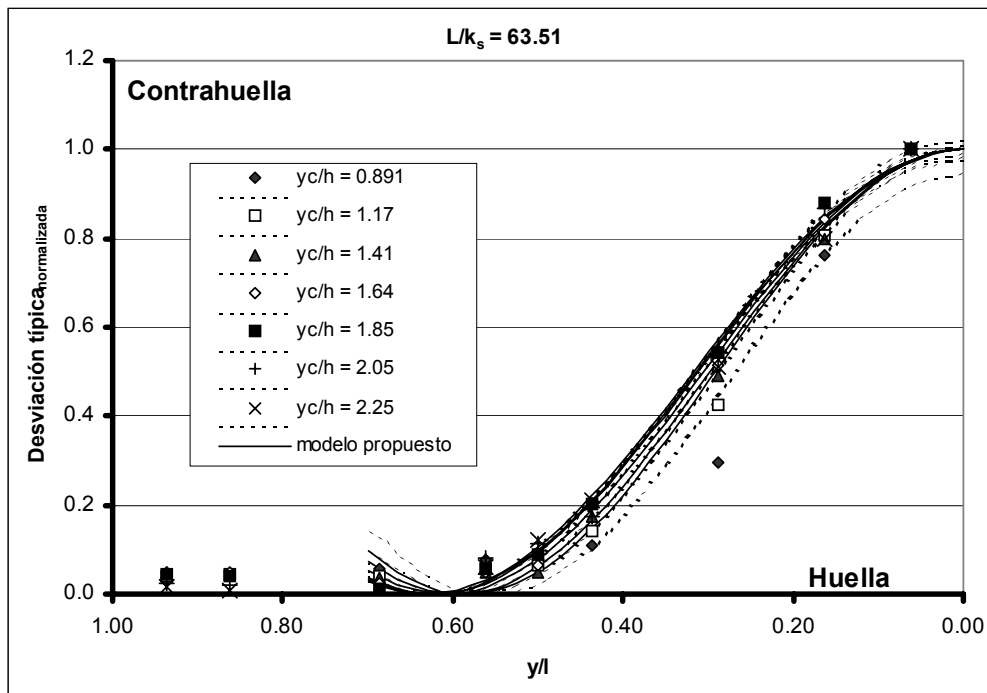


Figura 4.79. Desviación típica estandarizada. Escalón $L/k_s = 63.51$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto (ecuación (4.94)), imponiendo $A = B = 1/2$ (trazo continuo). Los ajustes tienen validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$. No se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

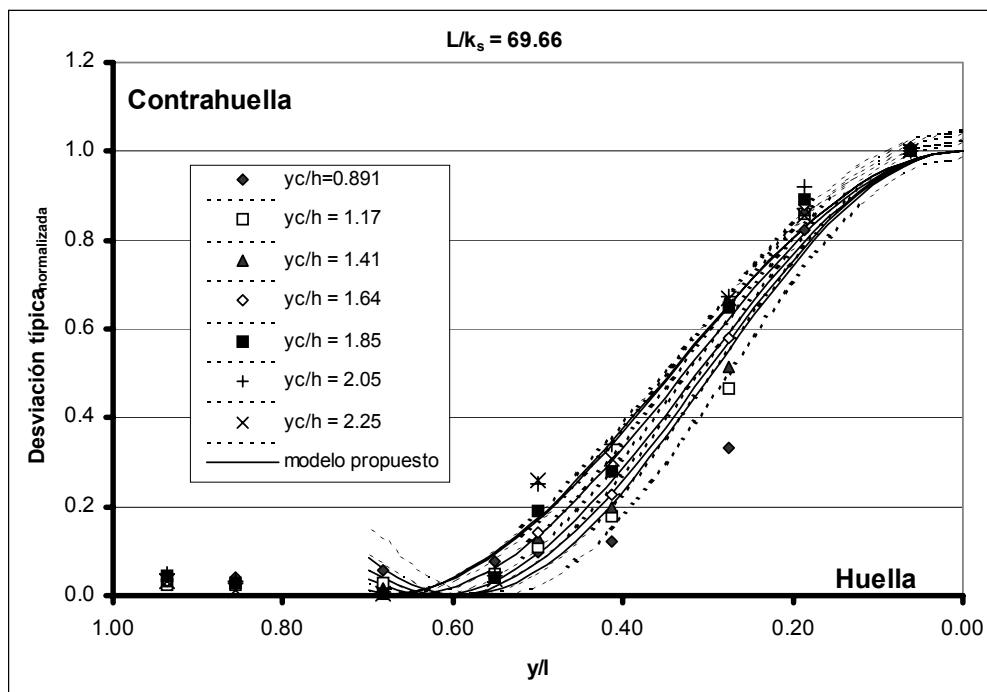


Figura 4.80. Desviación típica estandarizada. Escalón $L/k_s = 69.66$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto (ecuación (4.94)), imponiendo $A = B = 1/2$ (trazo continuo). Los ajustes tienen validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$. No se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

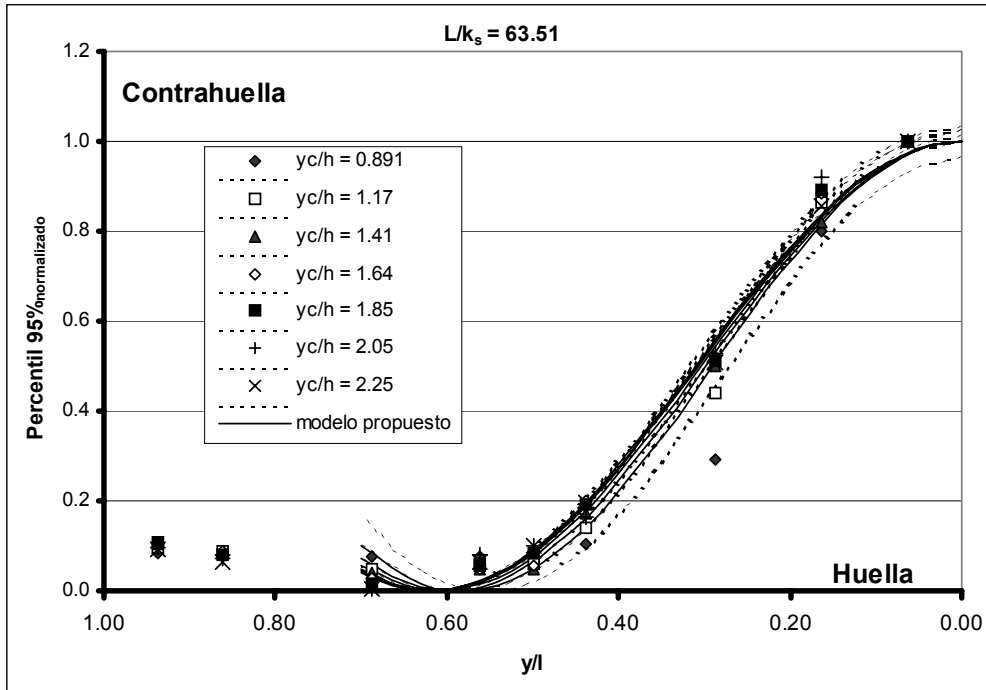


Figura 4.81. Percentil del 95% estandarizada. Escalón $L/k_s = 63.51$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto (ecuación (4.94)), imponiendo $A = B = 1/2$ (trazo continuo). Los ajustes tienen validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$. No se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

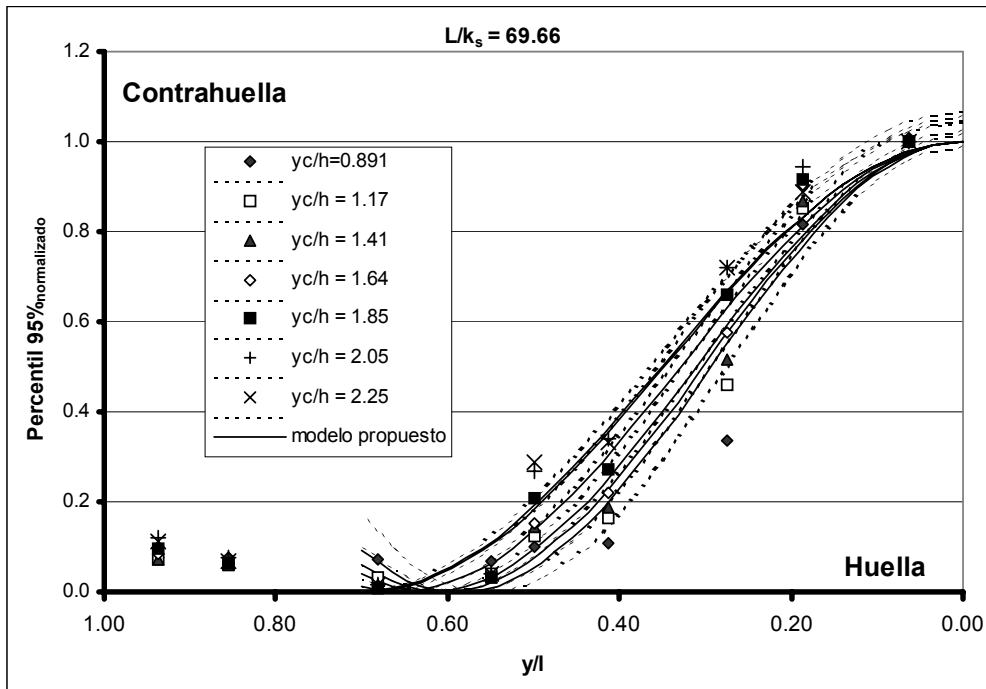


Figura 4.82. Percentil del 95% estandarizada. Escalón $L/k_s = 69.66$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto (ecuación (4.94)), imponiendo $A = B = 1/2$ (trazo continuo). Los ajustes tienen validez en $0 < y/l < 0.7$, $1.1 < y_c/h < 2.3$. No se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

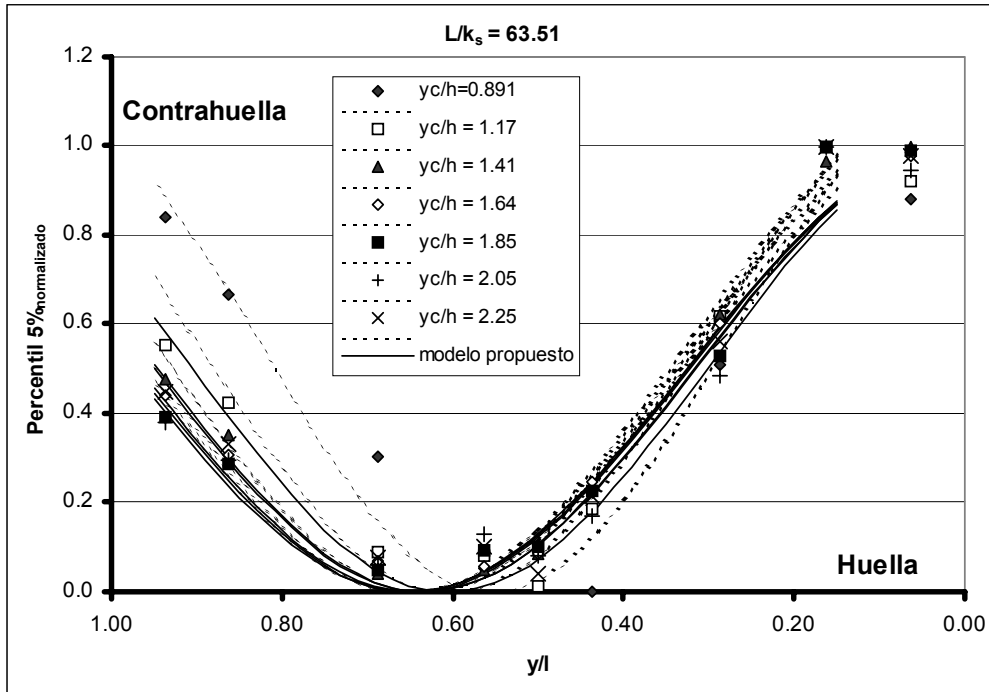


Figura 4.83. Percentil del 5% estandarizada. Escalón $L/k_s = 63.51$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto (ecuación (4.94)), imponiendo $A = B = 1/2$ (trazo continuo). Validez en $0.16 < y/l < 1$, $1.1 < y_c/h < 2.3$. No se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

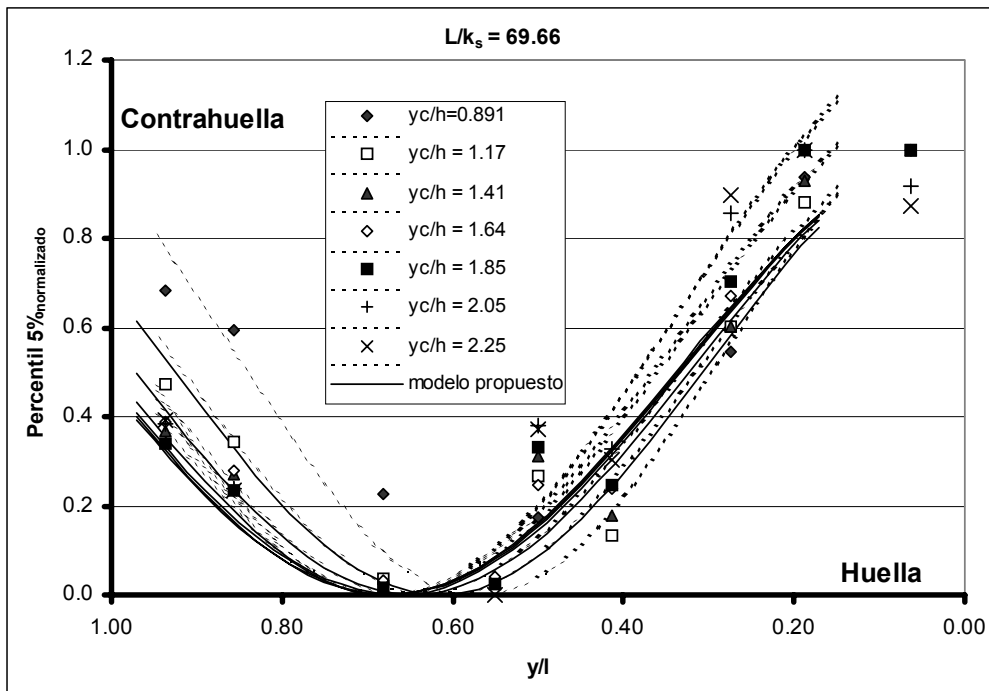


Figura 4.84. Percentil del 5% estandarizada. Escalón $L/k_s = 69.66$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto (ecuación (4.94)), imponiendo $A = B = 1/2$ (trazo continuo). Validez en $0.16 < y/l < 1$, $1.1 < y_c/h < 2.3$. No se consideran los valores correspondientes a $y_c/h = 0.891$.

En la Tabla 4.19 se muestran las correlaciones obtenidas para los ajustes de la expresión (4.94) considerando $A = B = 1/2$ y $2C$ evaluado según la ecuación (4.97) (parámetros de la Tabla 4.18), con los valores experimentales de los respectivos estadísticos.

Tabla 4.19. Correlaciones (r) correspondientes al ajuste de ecuación (4.94), para la distribución sobre la huella de los cuatro estadísticos analizados en los dos escalones ensayados $L/k_s = 63.51$ y $L/k_s = 69.66$. Siendo $A = B = 1/2$ y el coeficiente $2C$ tomado de la ecuación (4.97) y parámetros de la Tabla 4.18 (curvas en trazo continuo de los gráficos de la Figura 4.77 a la Figura 4.84). Validez en $0 < y/l < 0.7$ y $1.1 < y_c/h < 2.3$

y_c/h	Presión media		Desviación típica		Percentil del 95%		Percentil del 5%	
	L/k_s	L/k_s	L/k_s	L/k_s	L/k_s	L/k_s	L/k_s	L/k_s
	69.66	63.51	69.66	63.51	69.66	63.51	69.66	63.51
1.17	0.986	0.993	0.989	0.993	0.988	0.994	0.973	0.983
1.41	0.988	0.998	0.992	0.997	0.991	0.998	0.969	0.997
1.64	0.991	0.996	0.996	0.998	0.994	0.998	0.982	0.991
1.85	0.991	0.995	0.996	0.998	0.994	0.997	0.973	0.988
2.05	0.988	0.989	0.994	0.996	0.991	0.995	0.950	0.976
2.25	0.985	0.996	0.993	0.996	0.990	0.997	0.938	0.988

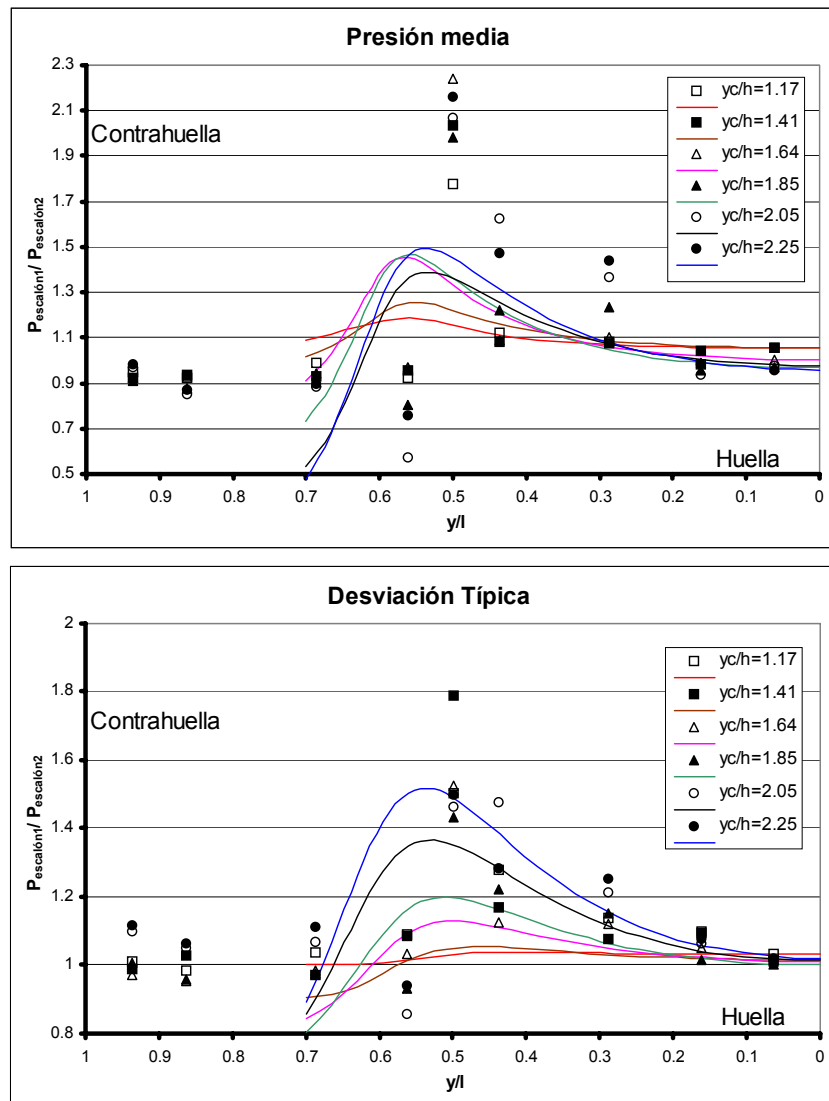


Figura 4.85. Cociente de los perfiles de presión media y de desviación típica, resultantes de los modelos ajustados en cada escalón (escalón 1: $L/k_s = 69.66$, escalón 2: $L/k_s = 63.51$).

En la Figura 4.85 se muestra el cociente de los perfiles de la presión media obtenida sobre las huellas de los escalones $L/k_s = 69.66$ y $L/k_s = 63.51$, así como el de las desviaciones típicas, los cuatro estimados a partir de las ecuaciones (4.94) y (4.97) con los coeficientes que se resumen en la Tabla 4.20. Si se comparan estos gráficos con los equivalentes al modelo exponencial (Figura 4.58), se puede comprobar que en este caso, al simularse mejor los puntos correspondientes a los alrededores de $y/l = 0.5$ (ver Figura 4.77 a Figura 4.84), se obtiene un mejor comportamiento del cociente de los respectivos perfiles, si bien el grado de atenuación de dicho cociente sigue siendo notable.

4.2.1.2.1. Resumen del segundo modelo

Para normalizar cada uno de los estadísticos, los correspondientes valores extremos podrán estimarse de las expresiones mostradas en la Tabla 4.13 que incluyen (sin diferenciarlos) ambos tipos de escalones. Nótese que en la Tabla 4.13 se indican los valores del máximo y mínimo para cada estadístico, sin matizarse su posición. En este nuevo modelo la posición del máximo es $y/l = 0$ y del mínimo es $y/l = 2C$, parámetro caracterizado por la ecuación (4.97) y la Tabla 4.18.

En la siguiente Tabla 4.20 se resumen los valores de los diversos parámetros que permitirán modelar los diversos estadísticos analizados sobre las huellas de un aliviadero escalonado, en la zona de flujo rasante completamente desarrollado.

<i>Tabla 4.20. Coeficientes para el ajuste global de la expresión (4.94) y (4.97). Validez para $1.1 < y/h < 2.3$.</i>					
<i>Estadístico</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>2C</i>	<i>Rango de validez</i>	<i>Estimación de los valores extremos</i>
Media	1/2	1/2	Tabla 4.18	0 < y/l < 0.7	Tabla 4.13
Desviación típica					
Percentil 95%				0.16 < y/l < 1	
Percentil 5%					

En el apartado 2.4 del Anejo 2, se justificará la bondad del modelo cosenoidal propuesto. Primero se mostrará la existencia de correlación significativa entre los estadísticos de la presión modelados y la variable explicativa del ajuste. Se mostrará que en cualquier caso ésta es significativa con un nivel de significación del 1%. La bondad del modelo se basará en la aceptación, en todos los casos evaluados, de los valores $A = B = 1/2$, con un nivel de significación del 10%.

4.2.1.2.2. Aplicación del segundo modelo

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, si se pretende modelar la distribución de la presión sobre la huella de un peldaño mediante la aplicación de un modelo tipo cosenoidal como el mostrado a lo largo de este apartado, se propone proceder de la siguiente manera:

1. A partir del caudal y del tipo de peldaño, se escogerán los coeficientes correspondientes al estadístico que se vaya a analizar para establecer la ecuación (4.97). Dichos coeficientes se detallan en la Tabla 4.18. De este modo se obtendrá el parámetro $2C$, que junto a los parámetros $A = B = 1/2$ permiten conocer la distribución espacial del estadístico normalizado (ecuación (4.94)). Los resultados se muestran en los gráficos de la Figura 4.86 y la Figura 4.87.
2. Finalmente será necesario estimar los valores máximo y mínimo del estadístico en cuestión para deshacer la normalización del mismo. Las expresiones propuestas se detallan en la Tabla 4.13.

Así se han estimado las curvas de la presión media, desviación típica y percentiles del 95% y del 5%, para un escalón representativo de un valle ($L/k_s = 63.51$) y otro de un pico ($L/k_s = 69.66$) de la onda estacionaria de presiones. Se muestra la comparación de las citadas estimaciones con los correspondientes estadísticos obtenidos en el laboratorio (Figura 4.88 a la Figura 4.95).

A partir de las familias de curvas normalizadas (Figura 4.86 y Figura 4.87) correspondientes a los diferentes estadísticos, se observa un desplazamiento del campo de presiones normalizado hacia aguas arriba al aumentar el caudal. Este desplazamiento es más acusado en el peldaño representativo de un máximo (L/k_s

= 69.66) que en el correspondiente a un mínimo ($L/k_s = 63.51$). Ello también se observa al analizar las familias de curvas correspondientes a los estadísticos sin normalizar (Figura 4.88 a la Figura 4.95).

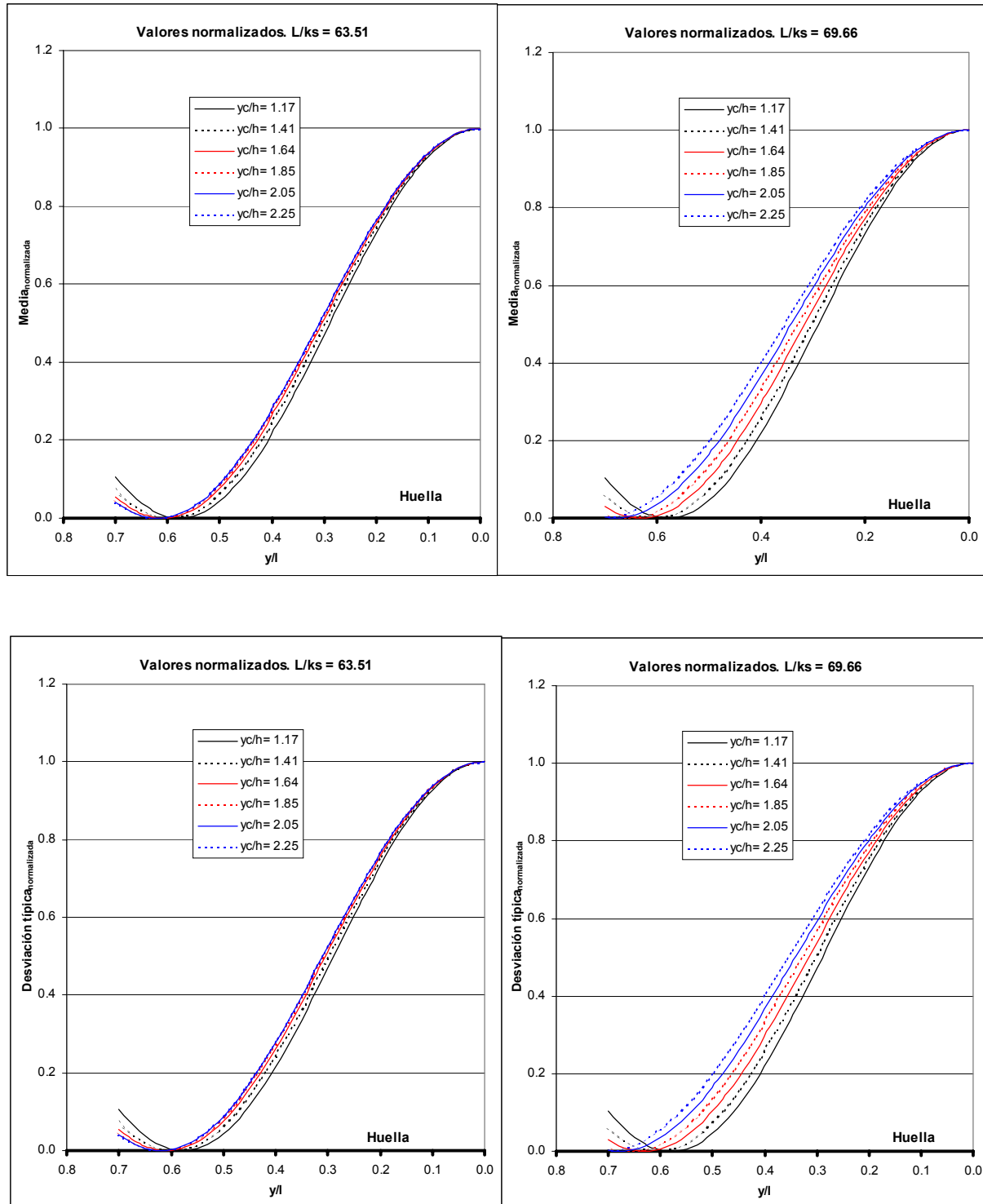


Figura 4.86. Perfiles ajustados para la presión media y la desviación típica estandarizadas, en los respectivos peldaños, correspondientes a un ajuste cosenoidal.

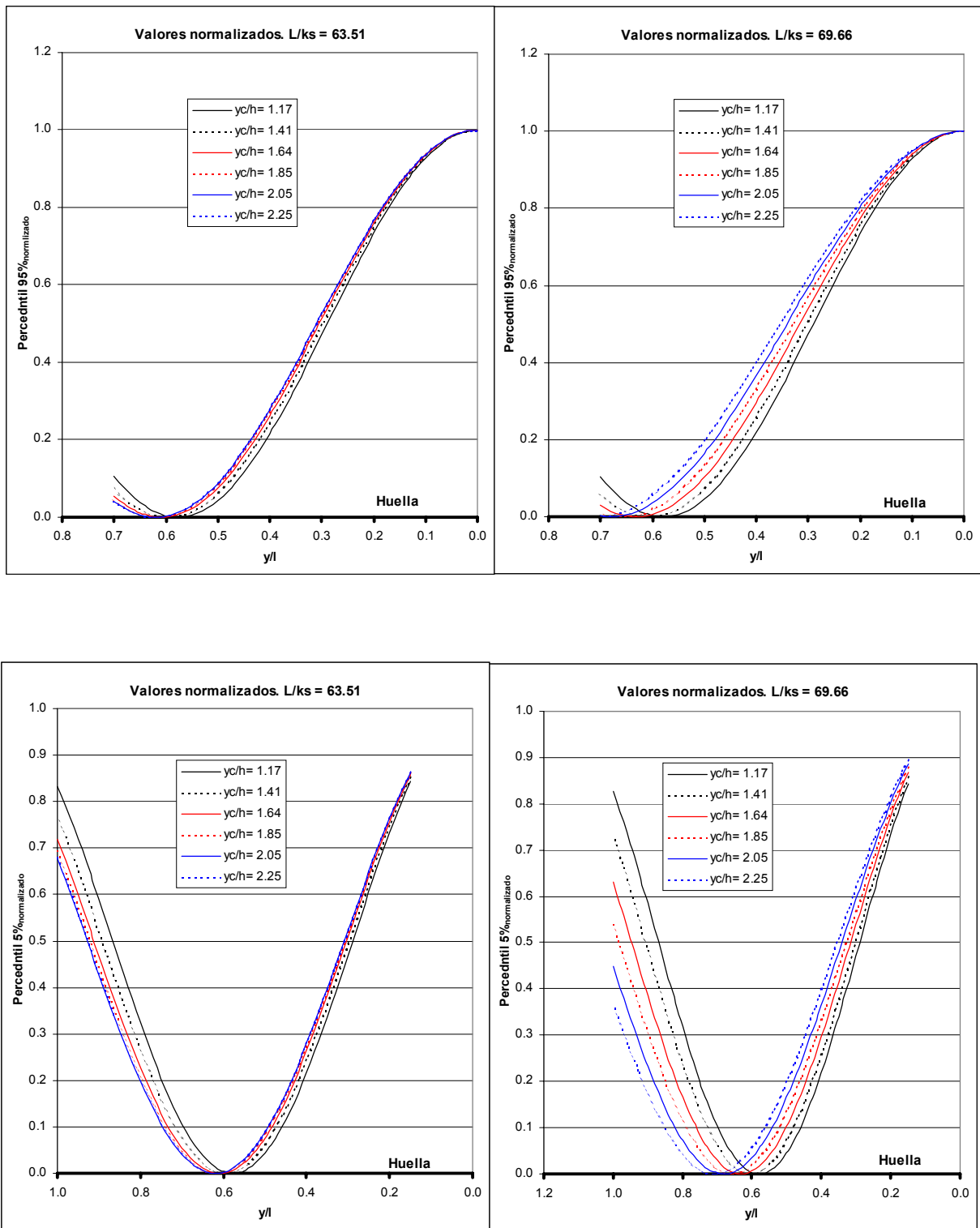


Figura 4.87. Perfiles ajustados para los percentiles del 95% y del 5% estandarizados, en los respectivos peldaños, correspondientes a un ajuste cosenoidal.

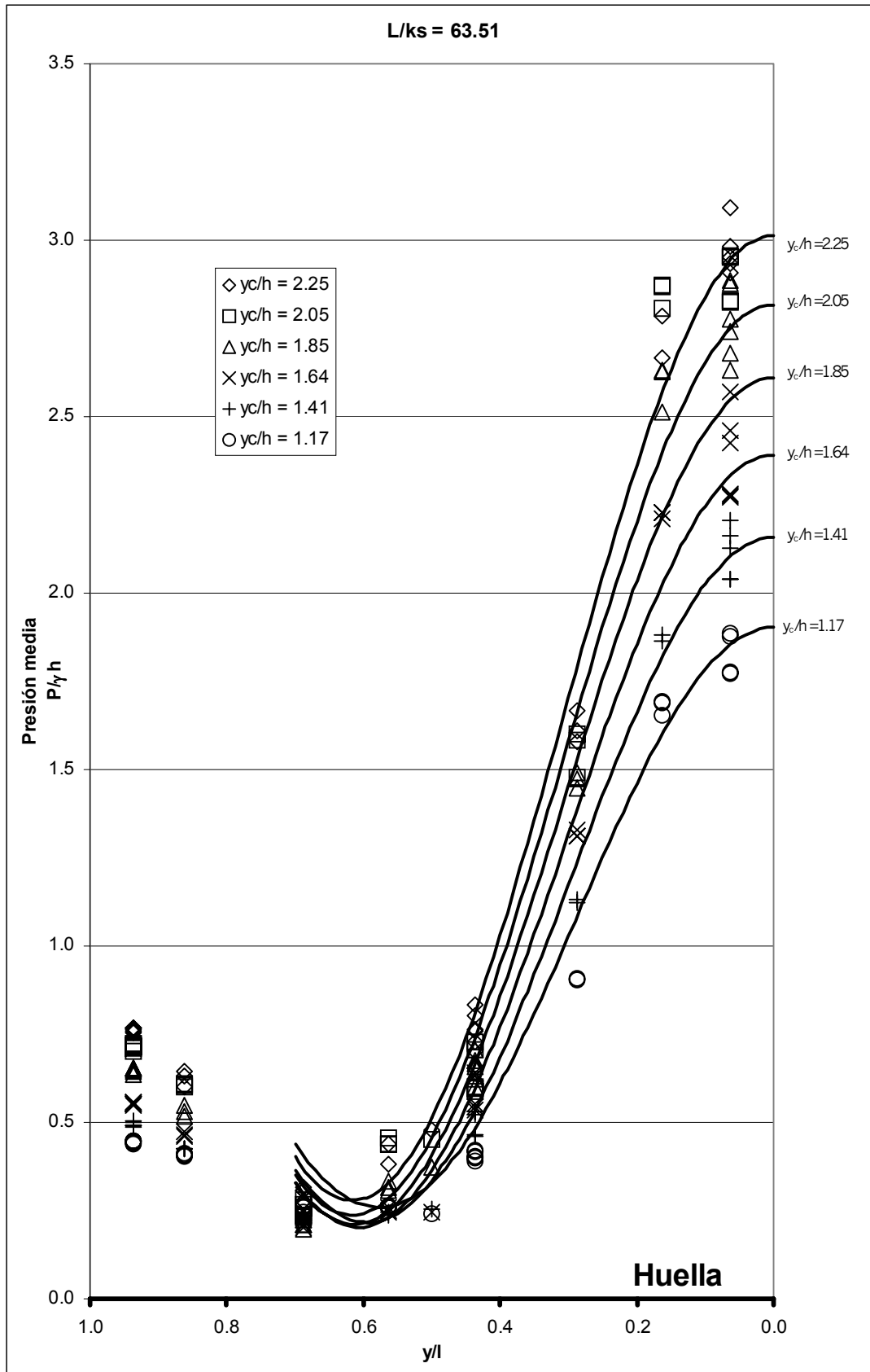


Figura 4.88. Perfiles ajustados para la presión media, en el peldaño $L/k_s = 63.51$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con las medidas obtenidas en el laboratorio.

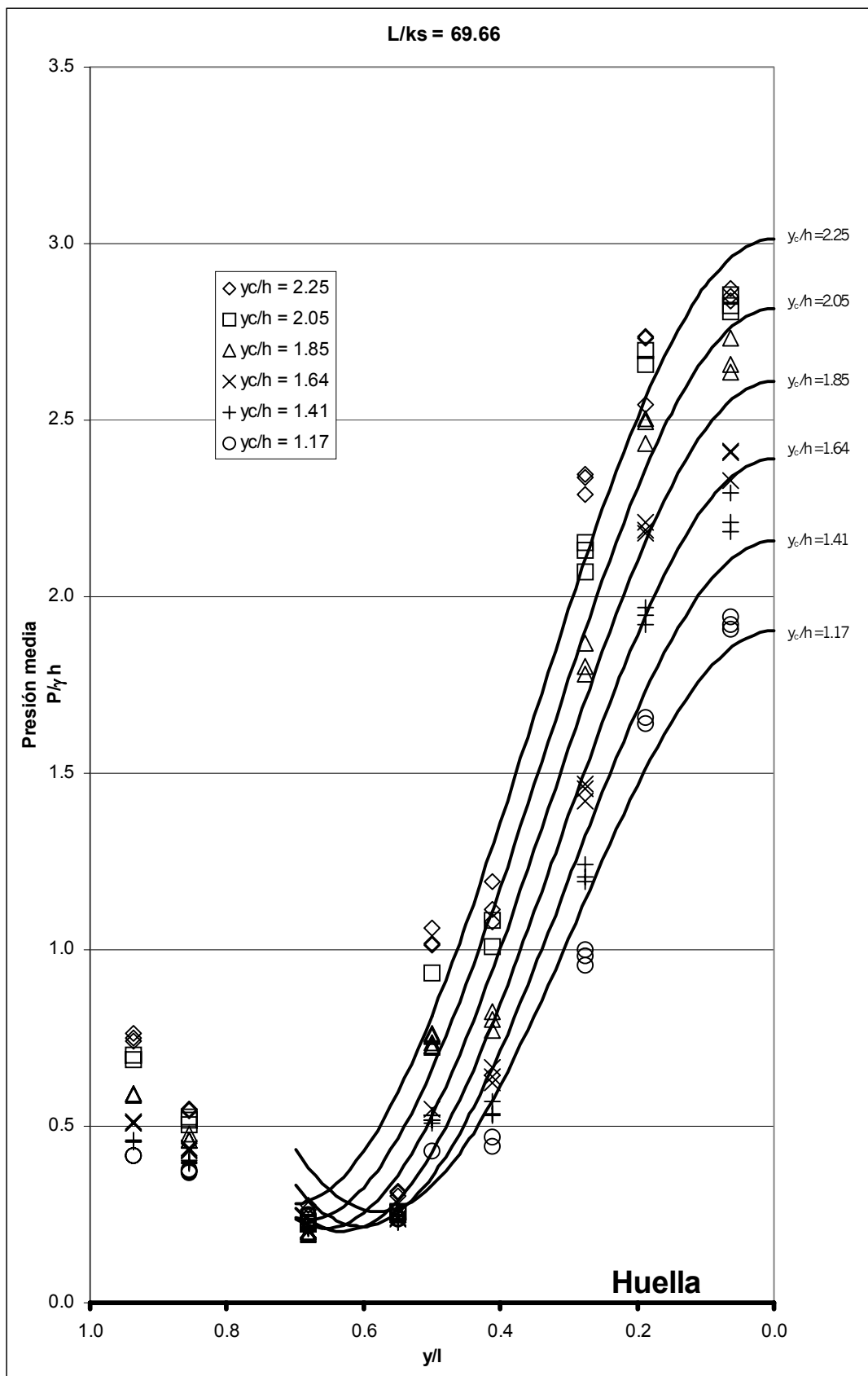


Figura 4.89. Perfiles ajustados para la presión media, en el peldaño $L/k_s = 69.66$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con las medidas obtenidas en el laboratorio.

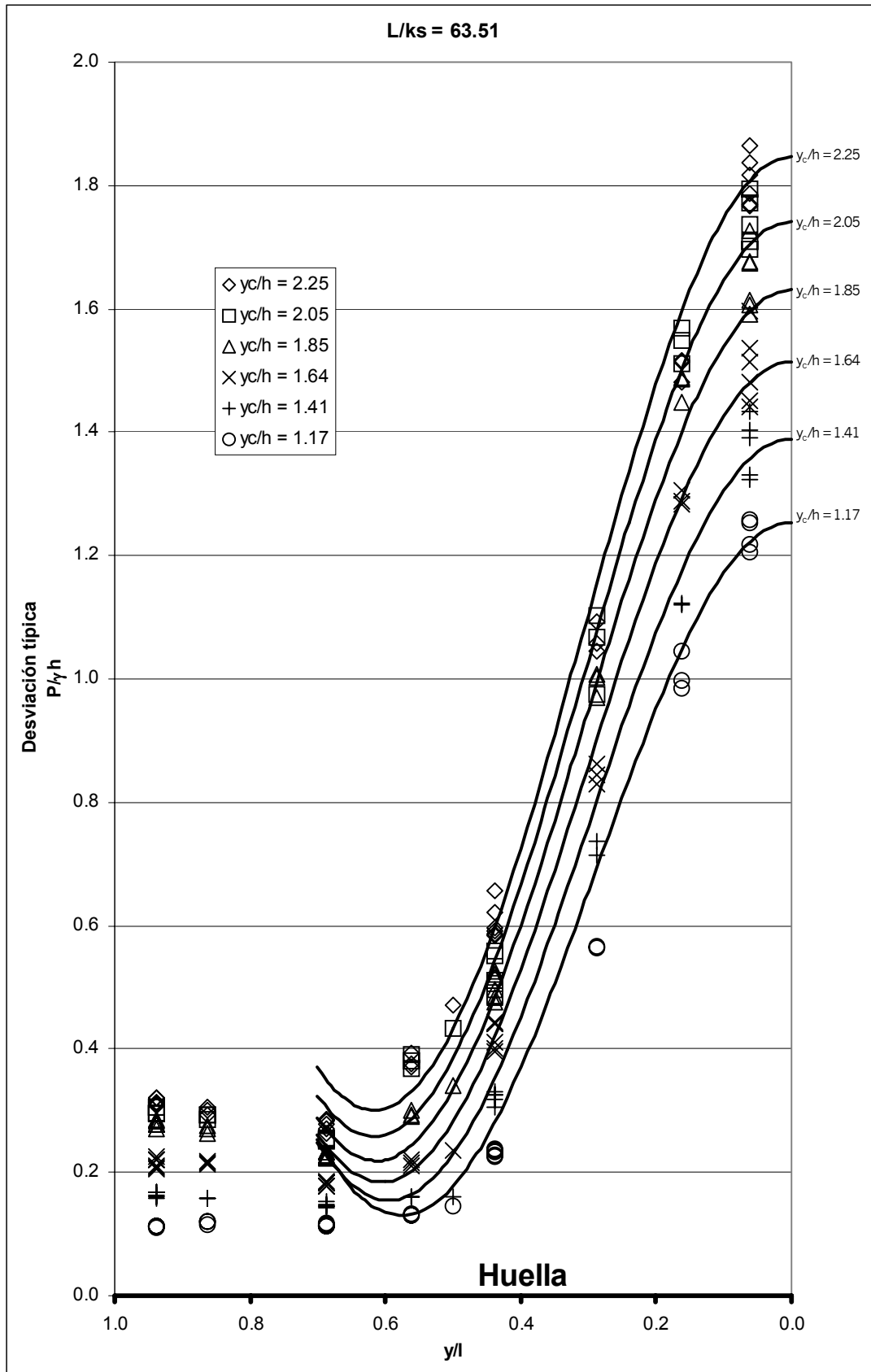


Figura 4.90. Perfiles ajustados para la desviación típica, en el peldaño $L/k_s = 63.51$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con las medidas obtenidas en el laboratorio.

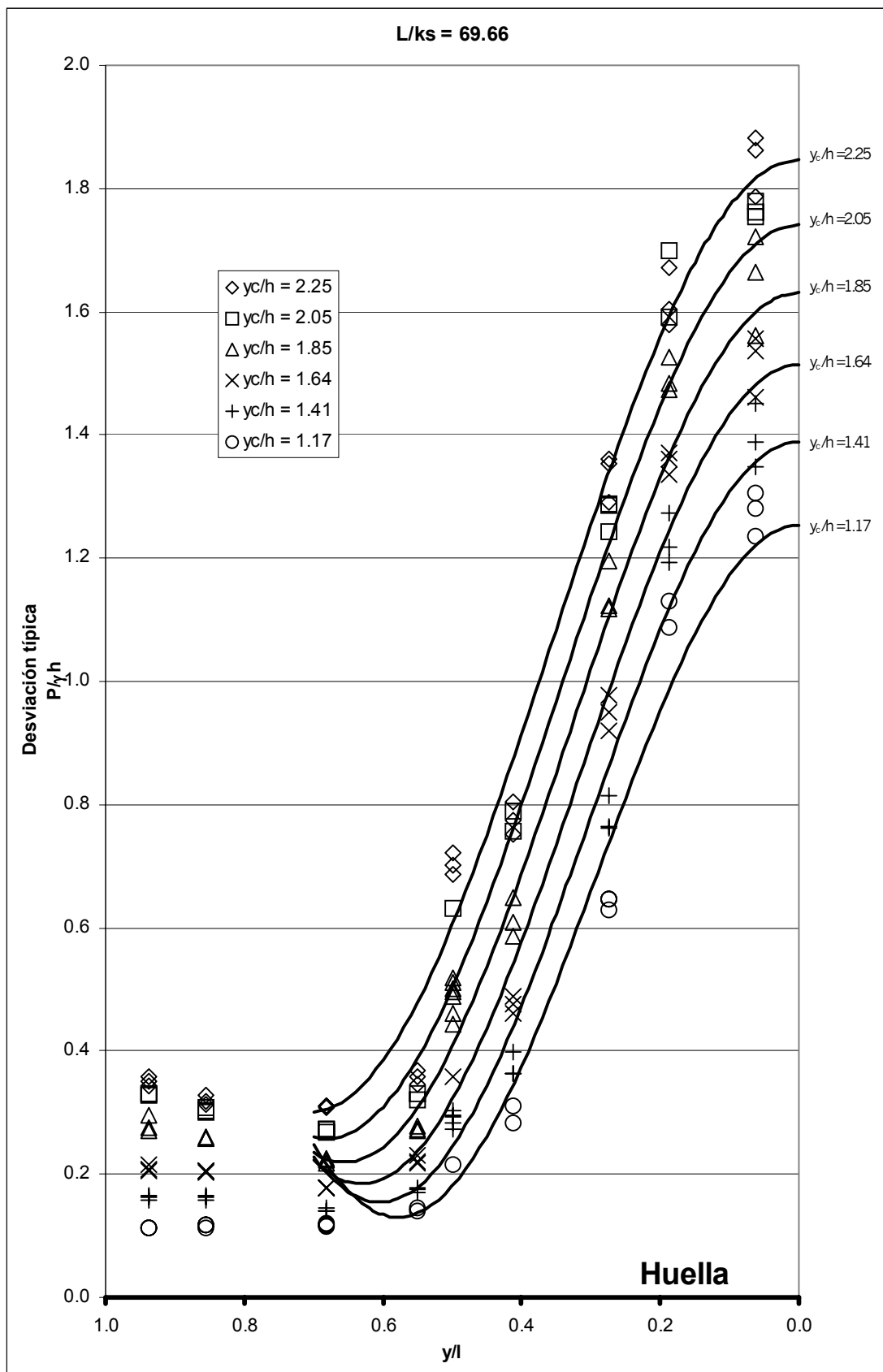


Figura 4.91. Perfiles ajustados para la desviación típica, en el peldaño $L/k_s = 69.66$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con las medidas obtenidas en el laboratorio.

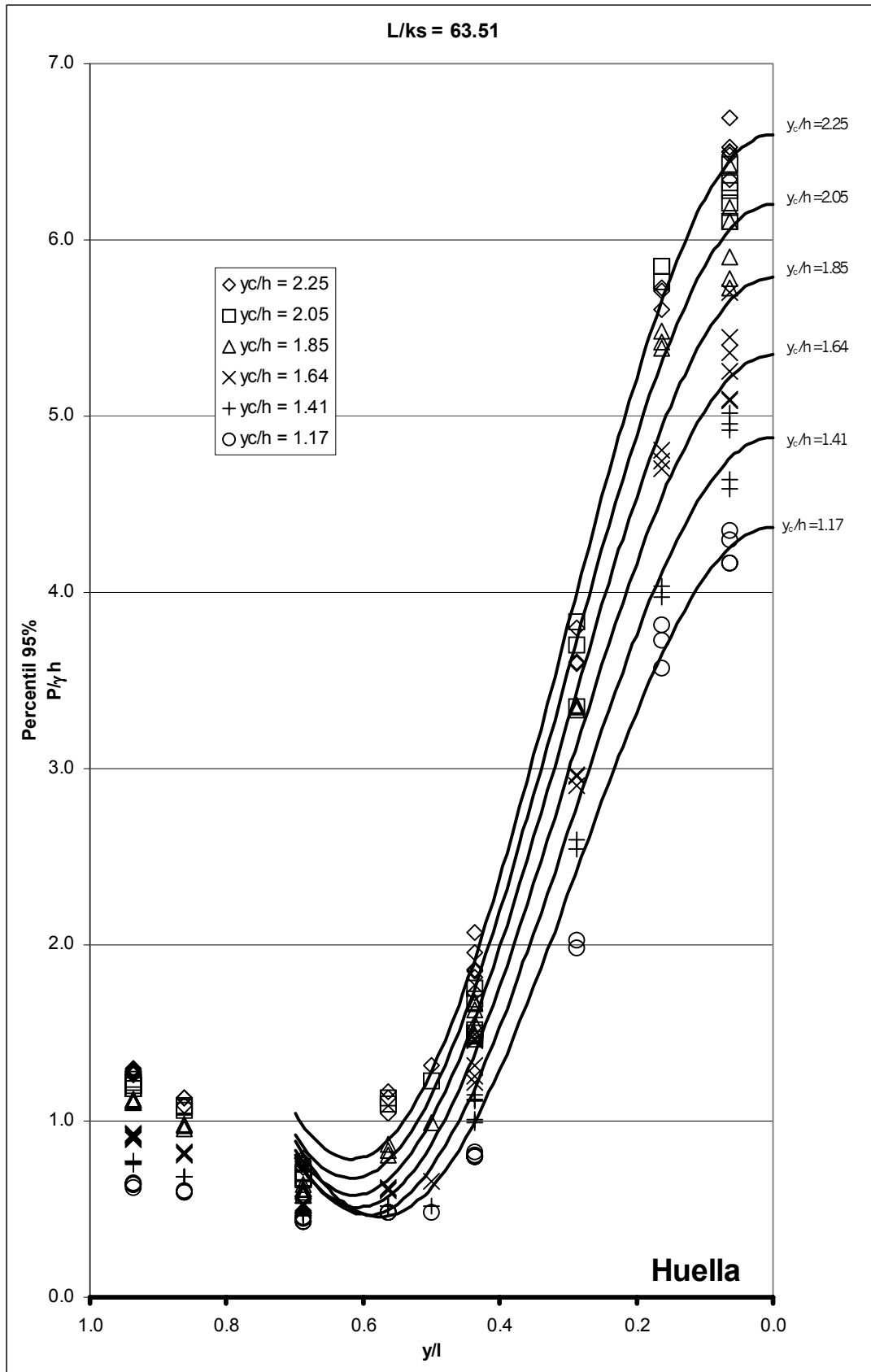


Figura 4.92. Perfiles ajustados para el percentil del 95%, en el peldaño $L/k_s = 63.51$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con las medidas obtenidas en el laboratorio.

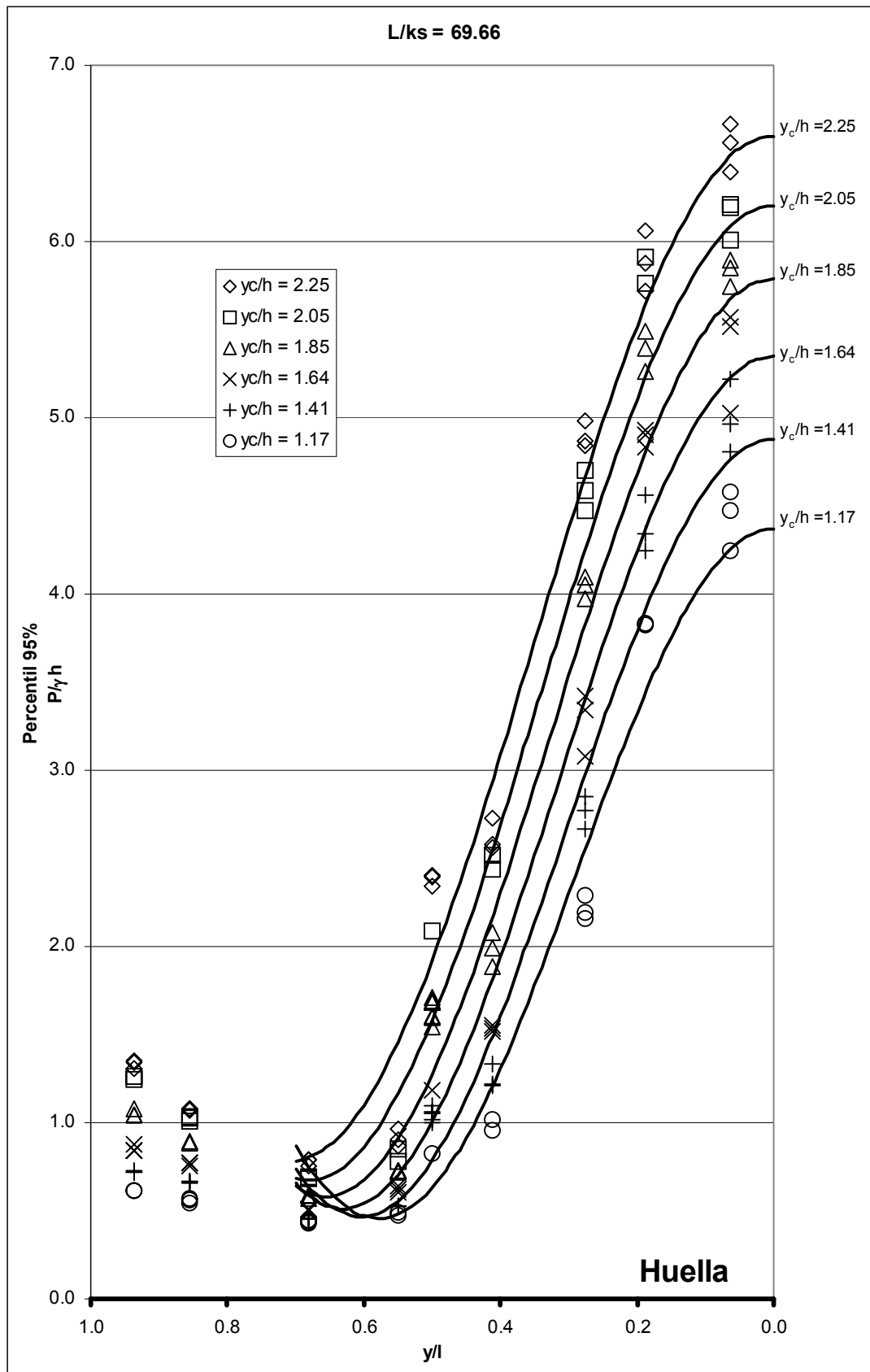


Figura 4.93. Perfiles ajustados para el percentil del 95%, en el peldaño $L/k_s = 69.66$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con las medidas obtenidas en el laboratorio.

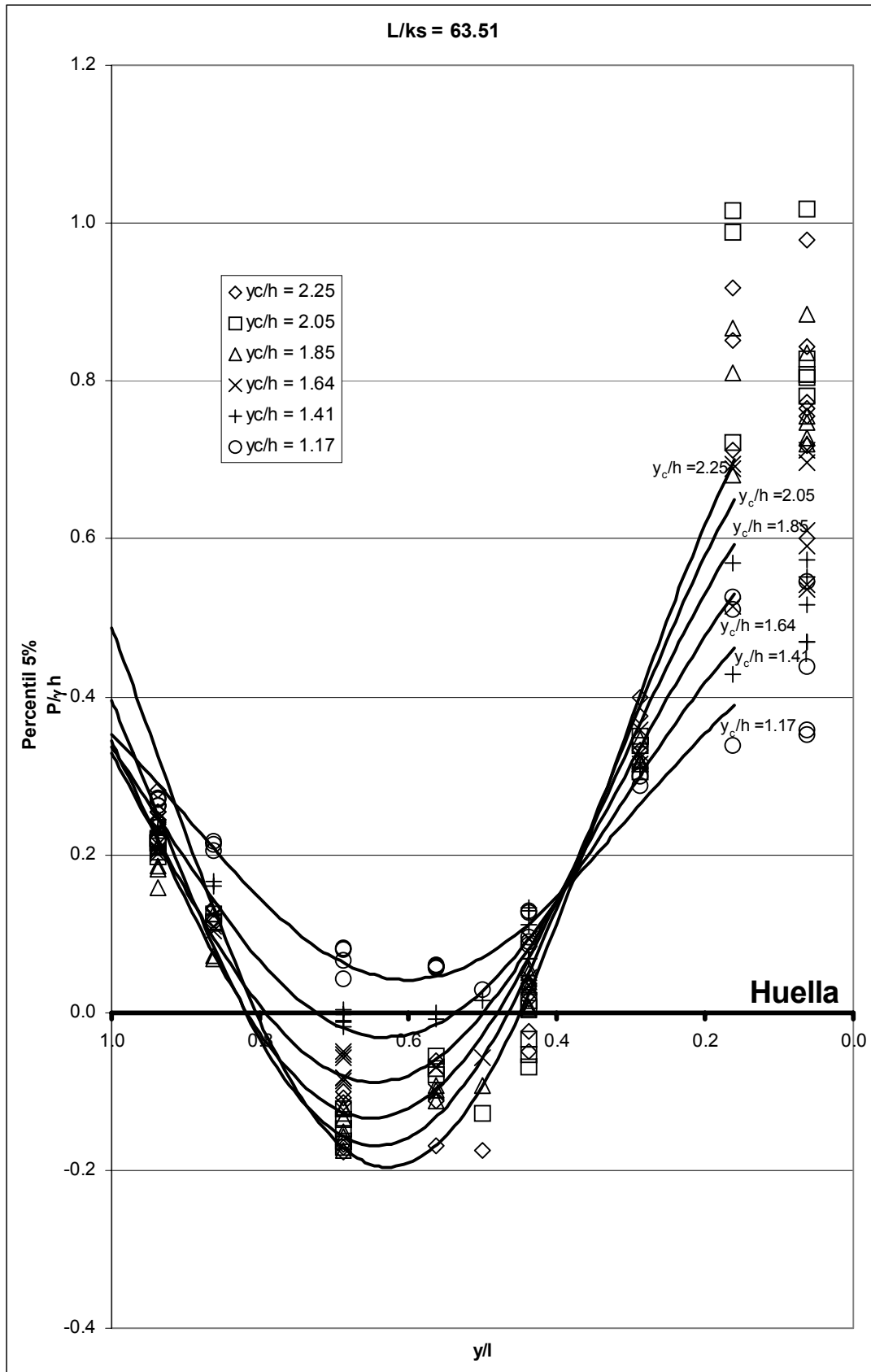


Figura 4.94. Perfiles ajustados para el percentil del 5%, en el peldaño $L/k_s = 63.51$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con las medidas obtenidas en el laboratorio.

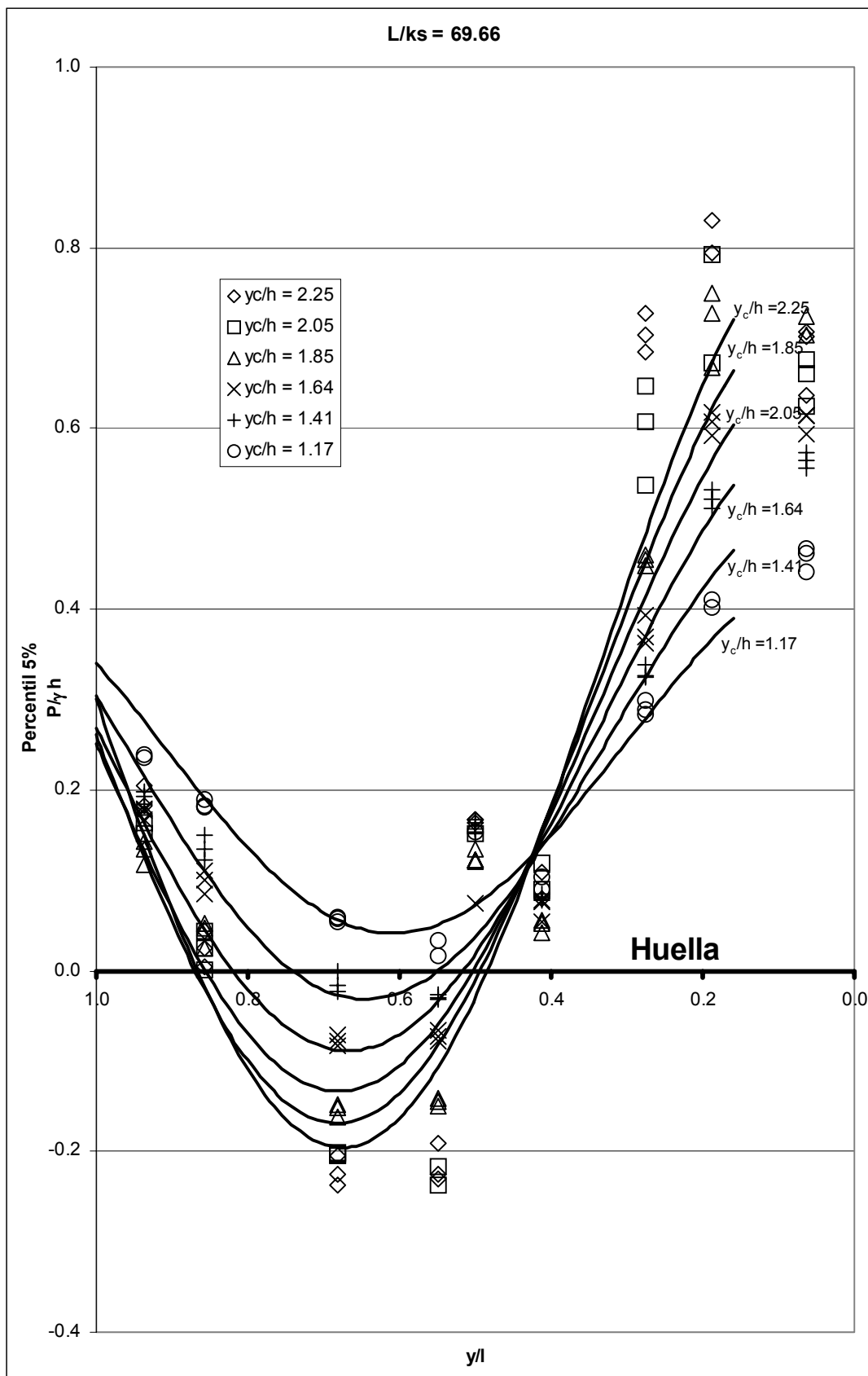


Figura 4.95. Perfiles ajustados para el percentil del 5%, en el peldaño $L/k_s = 69.66$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con las medidas obtenidas en el laboratorio.

4.2.1.3. Resumen

Se han propuesto dos posibles modelos para la estimación de la distribución de la presión sobre la huella de un peldaño de un aliviadero escalonado, con una pendiente alrededor de 1v:0.8h, funcionando en régimen rasante, plenamente establecido, para un rango de caudales $1.1 < y_c/h < 2.3$.

Ambos modelos establecen sendos patrones para cada uno de los cuatro estadísticos básicos que caracterizaran la presión que el flujo ejerce sobre el contorno: presión media, su desviación típica y los percentiles del 95% y del 5% que permitirán estimar los valores extremos.

La obtención de cualquiera de los dos modelos planteados pasa por la estandarización de los estadísticos a analizar en función de los respectivos valores máximo y mínimo, según la ecuación (4.83), que permite pasar a unas nuevas variables en el rango 0 a 1. La estimación de estos valores extremos se obtiene, con buena aproximación (apartado 4.2.1.1.1), mediante las ecuaciones (4.86) y (4.87) para la presión media, la (4.88) y (4.89) para desviación típica, la (4.90) y (4.91) para el percentil del 95% y la (4.92) y (4.93) para el percentil del 5% (ver Tabla 4.13).

El primer modelo que se ha analizado (apartado 4.2.1.1) muestra dos formas sensiblemente distintas: una para la media, desviación típica y percentil del 95% de tipo exponencial (ecuación (4.84)) que requiere de dos coeficientes, y la segunda, de tipo parabólico (tres coeficientes), correspondiente al percentil del 5% (ecuación (4.85)). Los coeficientes que ajustan cada uno de los estadísticos se detallan en la Tabla 4.15 y la Tabla 4.16.

El segundo modelo (apartado 4.2.1.2) es de tipo cosenoidal (expresión (4.94)), para los cuatro estadísticos. Este modelo se ajusta con tres parámetros tal y como se detalla en la Tabla 4.20. A diferencia del primer modelo permite diferenciar el comportamiento de un escalón según pertenezca a un valle o un pico de la onda estacionaria de presión que se establece a lo largo de la rápida en régimen rasante plenamente establecido, así como simular la posición del mínimo relativo en la distribución de los cuatro estadísticos sobre la huella.

En la siguiente tabla se resumen las principales diferencias de los dos modelos estudiados.

<i>Tabla 4.21. Principales diferencias de los modelos para los perfiles de presión, que se han ajustado sobre la huella de un peldaño de un aliviadero escalonado.</i>	
<i>Modelo Exponencial</i>	<i>Modelo Cosenoidal</i>
Patrones distintos para la presión media, desviación típica y percentil del 95% (exponencial, con dos coeficientes) y el percentil del 5% (parabólico, con tres coeficientes).	Mismo patrón para los cuatro estadísticos (cosenoidal, con tres coeficientes).
No distingue entre escalones correspondientes a un valle o un pico de la onda estacionaria de presión que se establece a lo largo de la rápida en régimen rasante.	Permite distinguir el comportamiento de la presión según sea un valle o un pico de la citada onda estacionaria.
No simula la posición de valores mínimos en los perfiles de los respectivos estadísticos.	Permite simular la posición de los mínimos relativos presentes en perfiles de los respectivos estadísticos.

4.2.2. Distribución de las presiones sobre la contrahuella

En los gráficos de la Figura 4.96 a la Figura 4.103, se aprecian los resultados obtenidos en los registros realizados sobre las contrahuellas inmediatamente aguas arriba de las huellas donde también se analizó el campo de presiones. Como se recordará estos escalones son representativos de un máximo ($L/k_s = 67.61$) y de un mínimo ($L/k_s = 61.46$) de la onda estacionaria de las presiones registradas sobre el centro de simetría del peldaño a lo largo de la rápida. En los citados gráficos se muestran los valores medios, desviación típica, percentil del 5% y percentil del 95%. Para cada punto de medida y para cada caudal se llevaron a cabo, al menos, dos medidas. En estas figuras se presentan todas las que no fueron desestimadas. En adelante, cualquier tratamiento de estos resultados se llevará a cabo con los valores medios de los registros obtenidos en cada punto de medida. Se destacan los siguientes aspectos:

- El extremo más cercano a la arista del escalón, corresponde a la zona de separación del vórtice de esa celda. Por ello parece coherente encontrar en esta región presiones medias negativas.
- La zona más cercana a la huella inferior en cambio, corresponde a una zona de impacto del fluido que se encuentra rotando en el vórtice, por ello en esta región las presiones medias son positivas, aunque inferiores a las de la zona de impacto de la huella del escalón (junto a la arista externa de esta huella).
- El análisis de la desviación típica y también el comportamiento de las presiones máximas y mínimas, pone de manifiesto una mayor variabilidad de las presiones en la zona más externa de la contrahuella (y tanto mayor cuanto mayor es el caudal).
- Los valores de las presiones obtenidas son inferiores a las registradas sobre las huellas. Ello podría responder al hecho que la huella recibe el impacto directo del flujo rasante superior, mientras que las contrahuellas están sometidas únicamente a las acciones del vórtice atrapado en cada celda de cada escalón. Aproximadamente en $z/h < 0.4$ las presiones medias registradas (Figura 4.96 y Figura 4.97) presentan valores negativos, en todo el rango de caudales ensayado, mientras que en $z/h > 0.5$ las presiones medias son positivas. Así, las presiones medias extremas se registran en los extremos de las contrahuellas, dándose los valores mínimos en los alrededores de la arista exterior y los máximos cerca de la huella inferior. Se constata que las presiones medias en la zona próxima a la arista exterior de la contrahuella ($z/h = 0$), son tanto más negativas cuanto menor es el caudal circulante.
- La desviación típica (Figura 4.98 y Figura 4.99) de los registros de presión tiende a ser tanto menor cuanto menor es el caudal circulante. Muestra un mínimo alrededor de $z/h = 0.5$, mientras que a lado y lado de dicho punto los valores registrados tienden a aumentar presentando un comportamiento muy similar, tendiendo a valores algo mayores en la zona cercana a la arista exterior ($z/h = 0$) que los obtenidos en la zona próxima a la arista interna ($z/h = 1$).
- Los percentiles del 5% obtenidos (Figura 4.100 y Figura 4.101) son negativos para $z/h < 0.7$, llegando a alcanzar valores extremos cerca la arista externa ($z/h = 0$) con valores de $p/\gamma h$ entre -0.6 y -1.0 , menores cuanto mayor es el caudal circulante. Nótese que este comportamiento es el contrario del que se observó en esa misma zona para las presiones medias, ello concuerda por el hecho de que las desviaciones típicas también son tanto mayores cuanto mayor es el caudal. Así, si bien en cuanto al comportamiento medio de las presiones parecía que a mayor espesor de flujo rasante sobre las aristas de los peldaños (mayor caudal) disminuía el riesgo de cavitación en dicha zona de las paredes verticales de los peldaños, el comportamiento de las presiones mínimas parece indicar que cuanto mayor sea dicho caudal mayor será el riesgo de que puntualmente se presente cavitación en la zona aledaña a la arista externa de la contrahuella. En el siguiente apartado 6 (página 4-121), se discute el % del tiempo en que las presiones registradas fueron negativas.
- Los percentiles del 95% observados (Figura 4.102 y Figura 4.103), tal como cabía esperar, mostraron valores mayores cuanto mayor fue el caudal circulante. Parecen presentar un valor mínimo alrededor de $z/h = 0.5$, tanto mejor definido cuanto mayor es el caudal circulante. Los valores máximos se han registrado, como ya se ha mencionado, en la vecindad de la huella inferior. Se da la particularidad que para el menor de los caudales ensayados ($y_c/h = 0.891$) en la zona $0 < z/h < 0.2$ se obtuvieron percentiles del 95 % negativos, indicando que en dicha zona el porcentaje del tiempo en que las presiones fueron negativas es igual o superior al 95% (apartado 6).

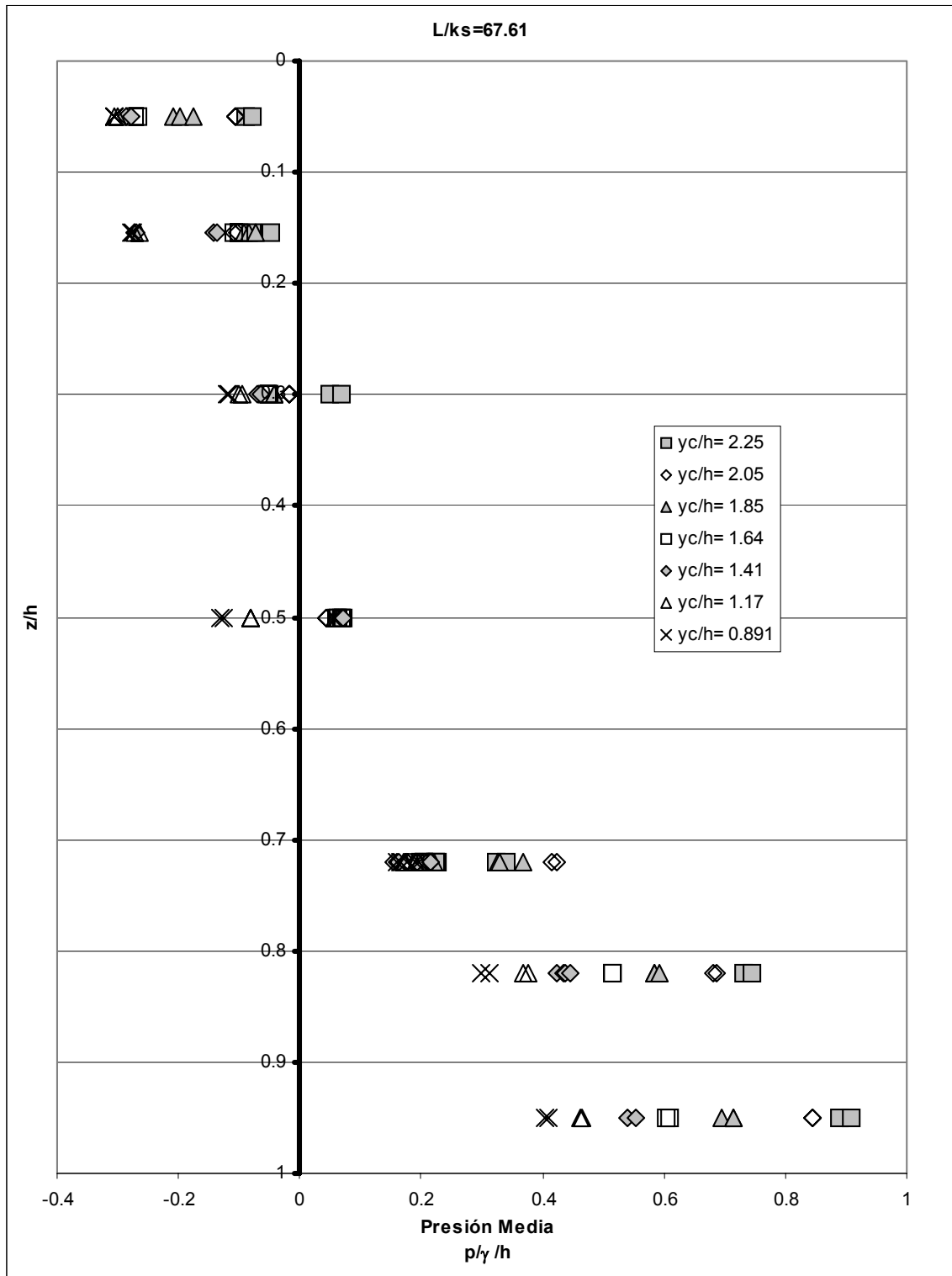


Figura 4.96. Presión media sobre la contrahuella del escalón $L/k_s = 67.61$.

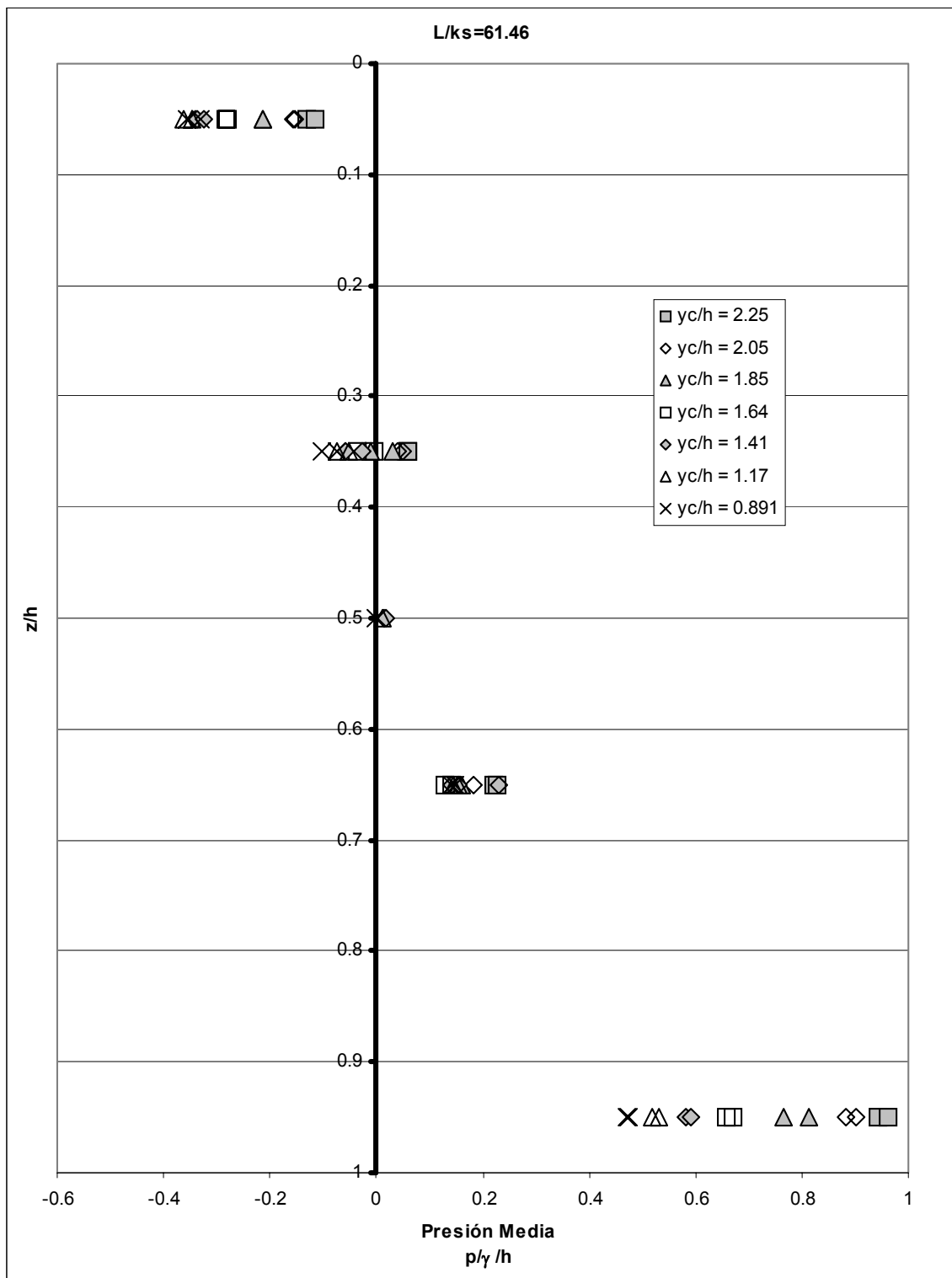


Figura 4.97. Presión media sobre la contrahuella del escalón $L/k_s = 61.46$.

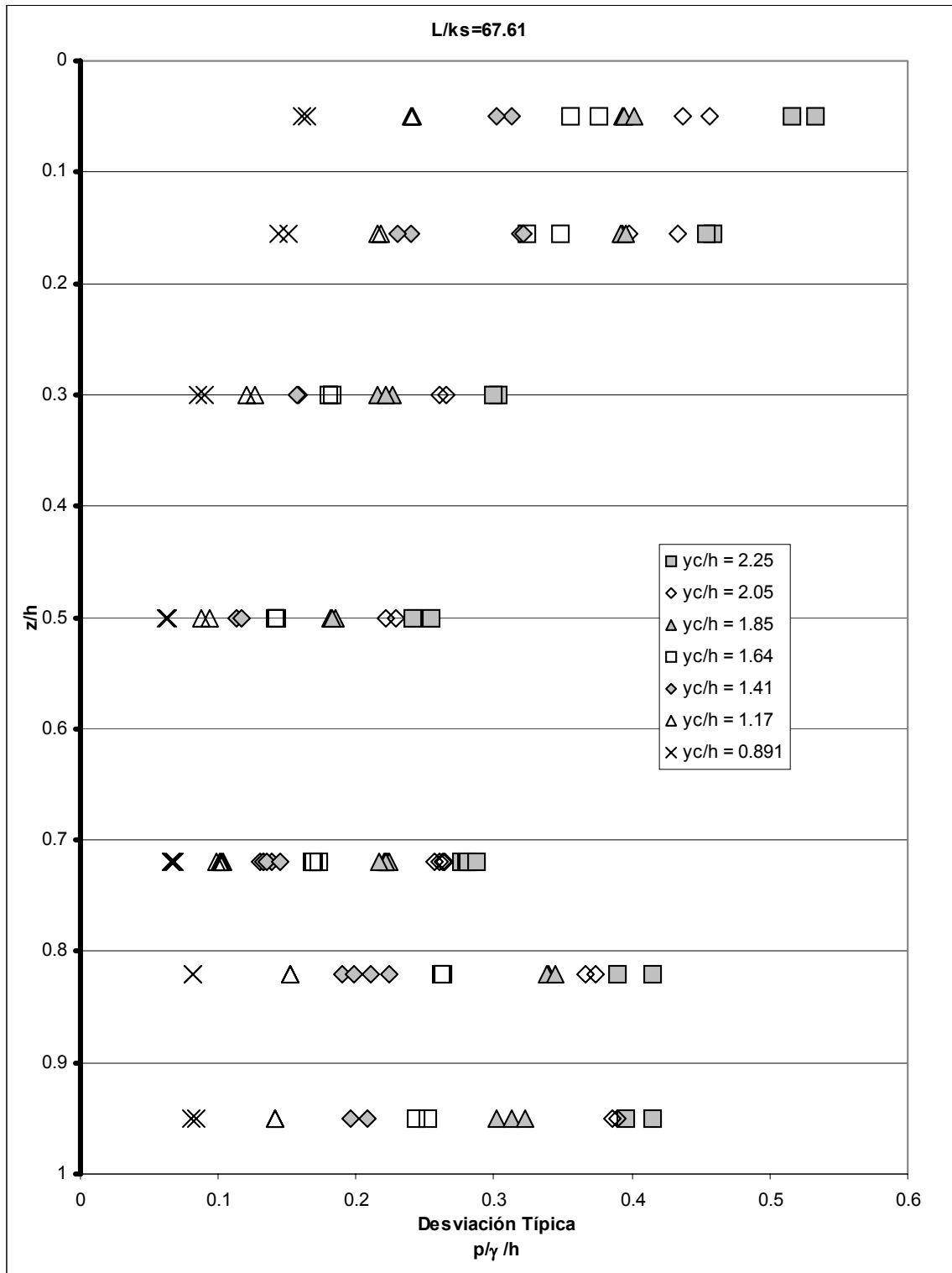


Figura 4.98. Desviación típica sobre la contrahuella del escalón $L/k_s = 67.61$.

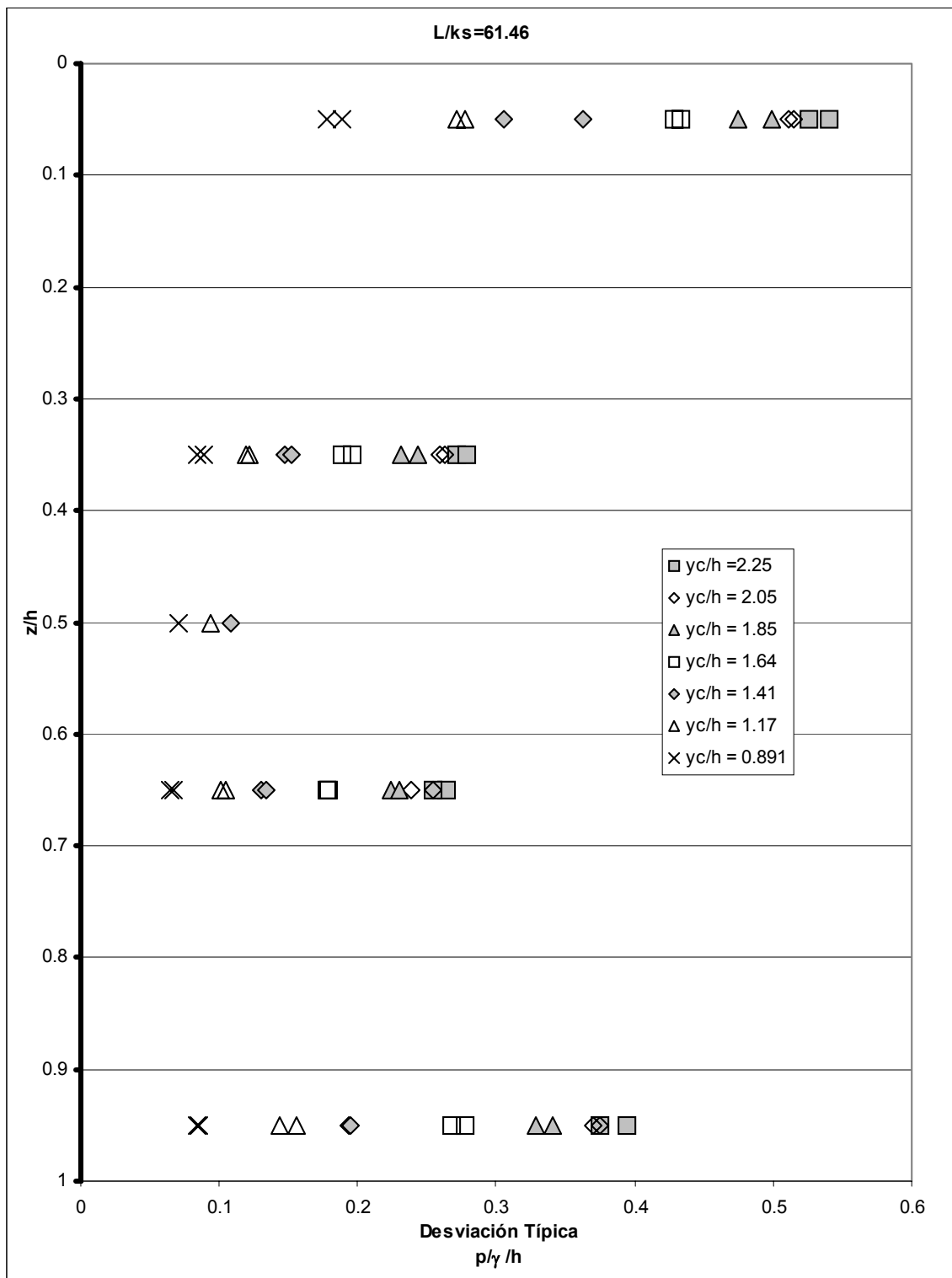


Figura 4.99. Desviación típica sobre la contrahuella del escalón $L/k_s = 61.46$.

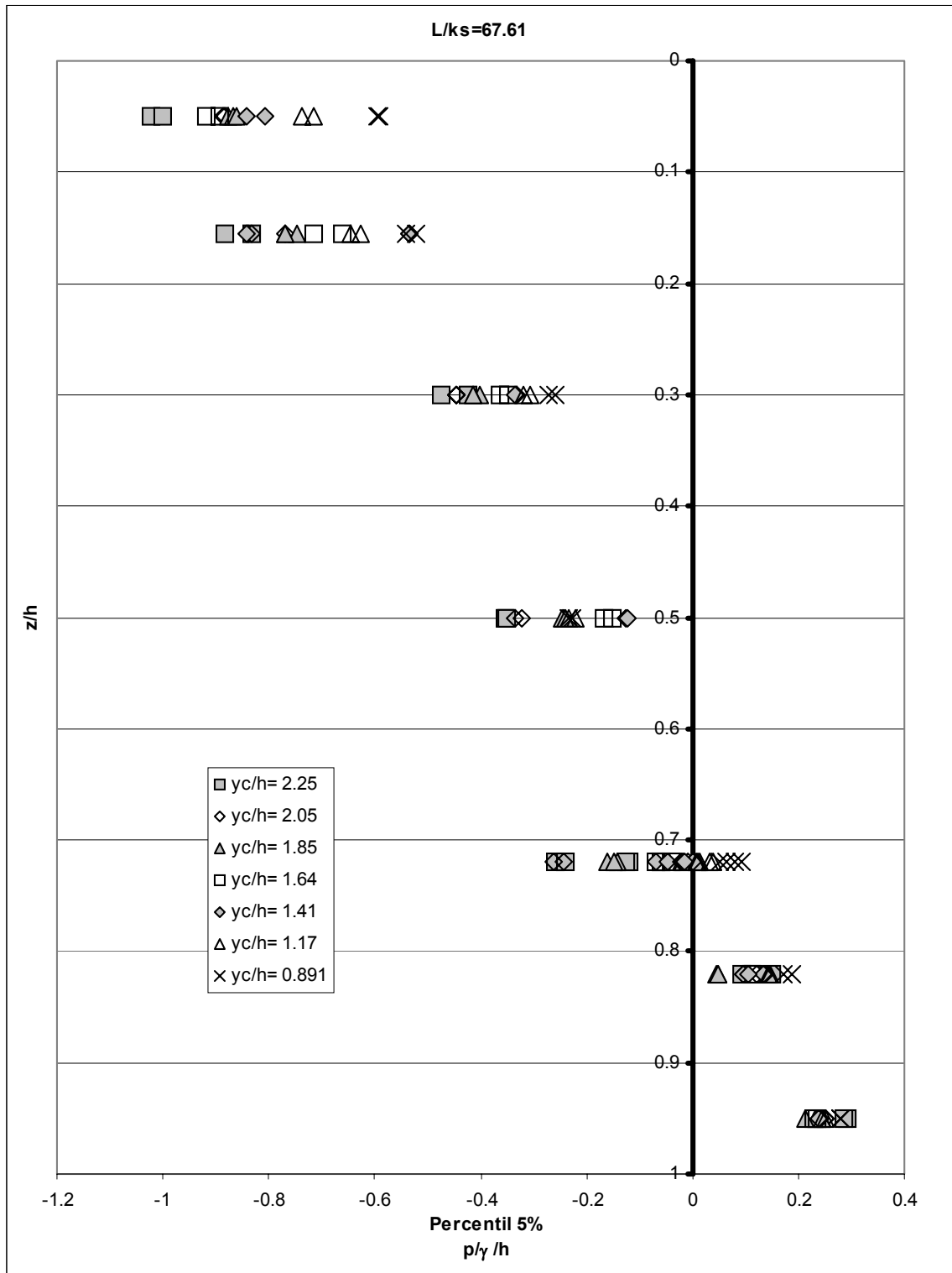


Figura 4.100. Percentil del 5% sobre la contrahuella del escalón $L/k_s = 67.61$.

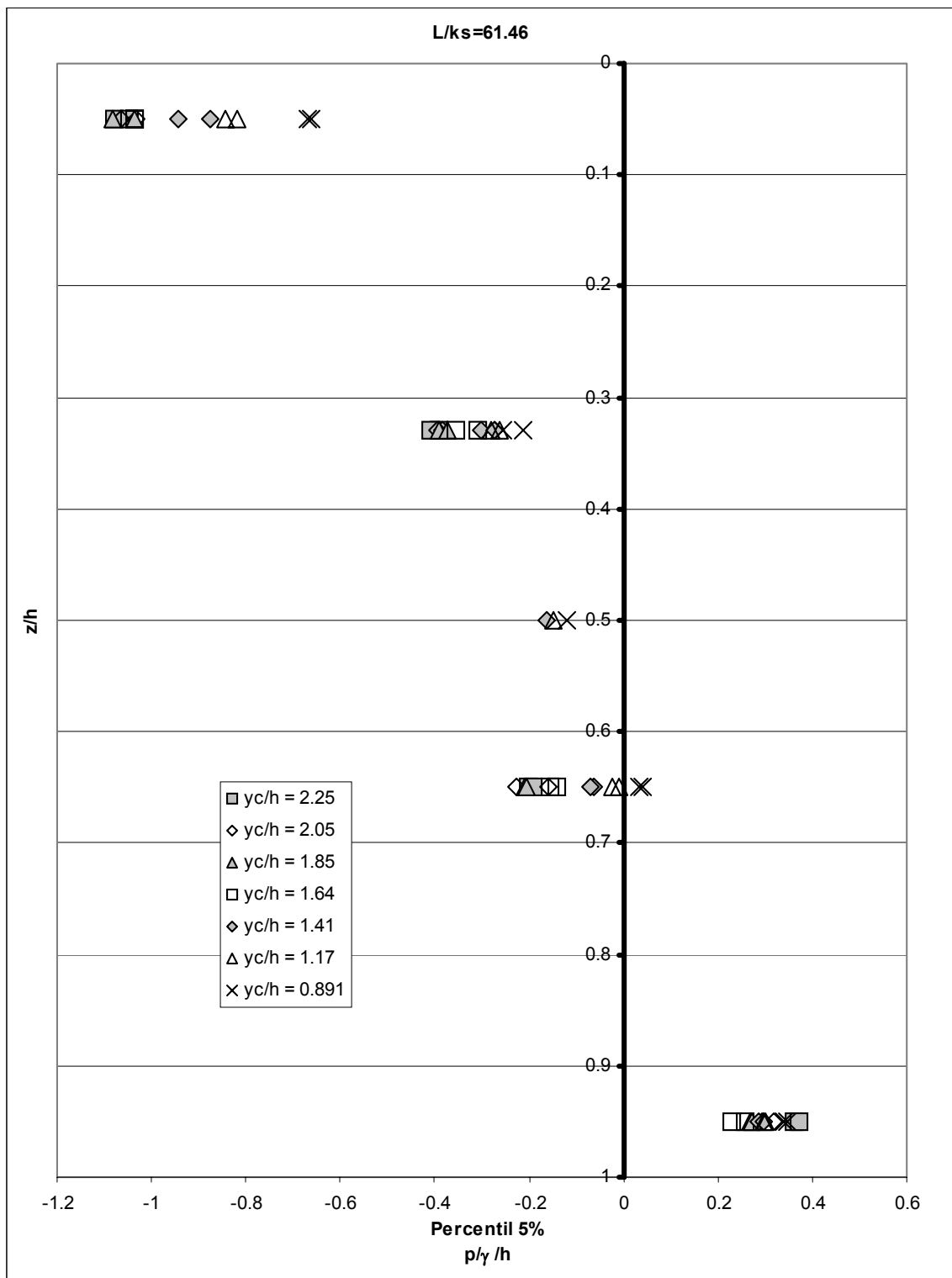


Figura 4.101. Percentil del 5% sobre la contrahuella del escalón $L/k_s = 61.46$.

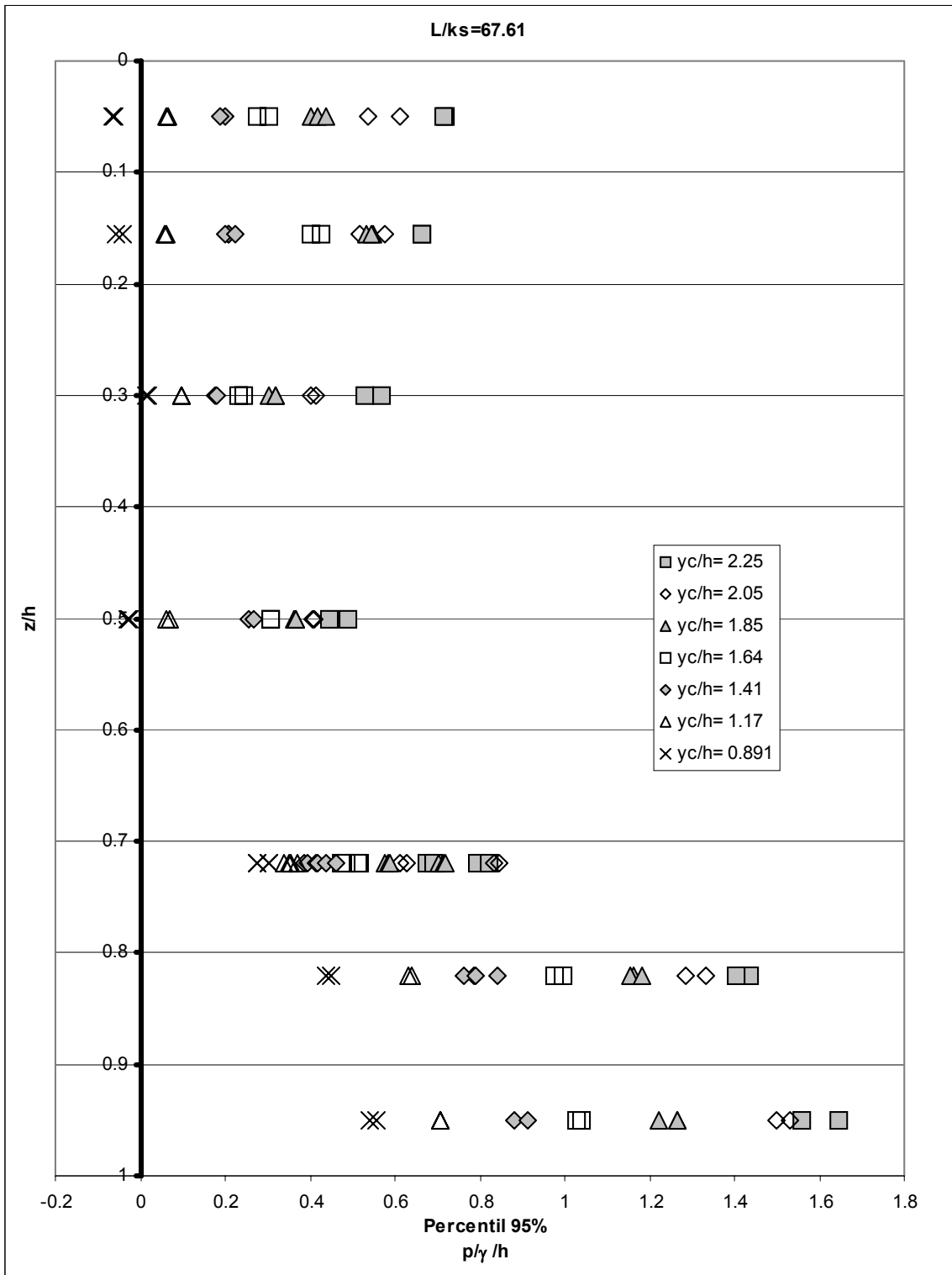


Figura 4.102. Percentil del 95% sobre la contrahuella del escalón $L/k_s = 67.61$.

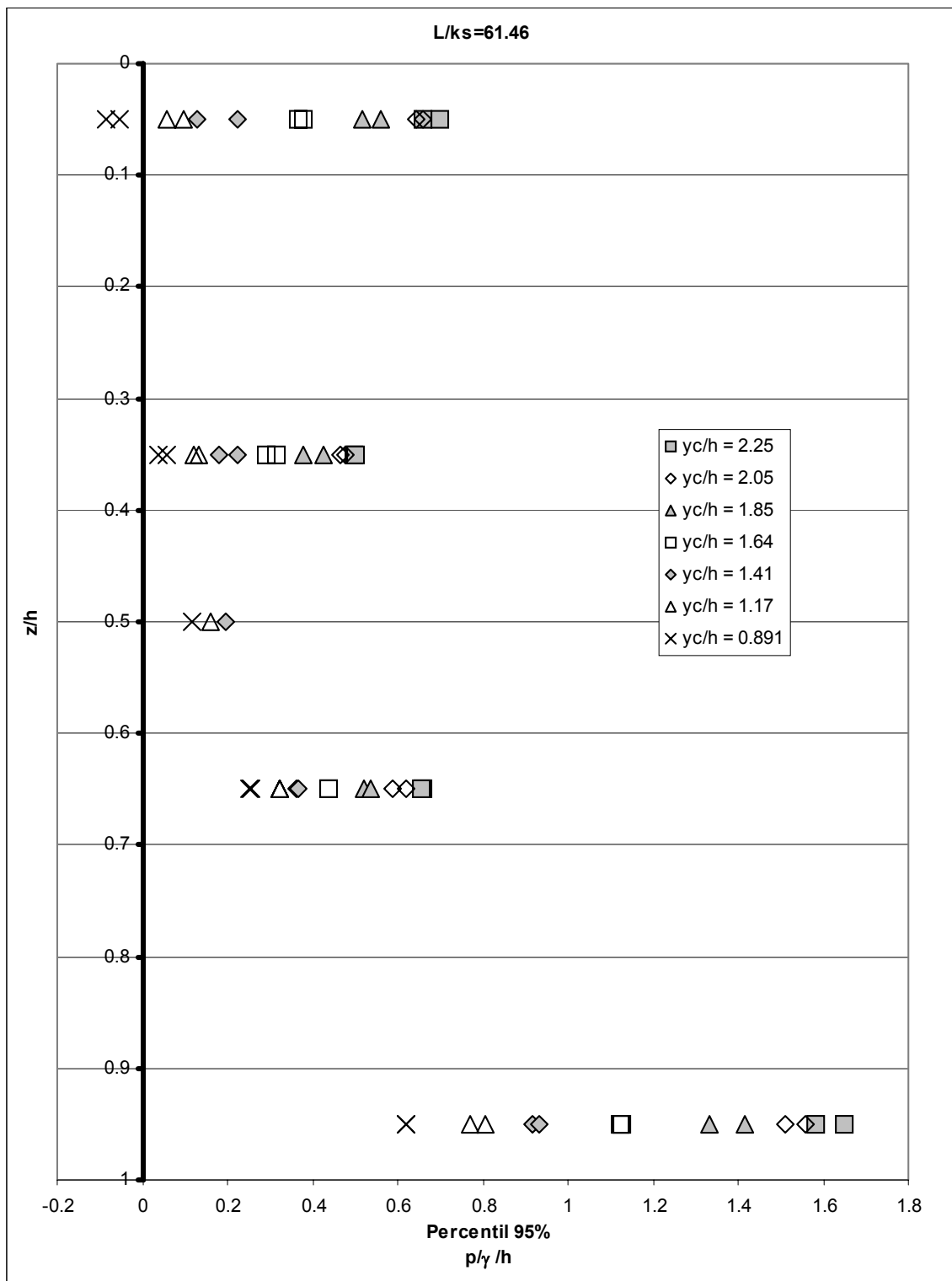


Figura 4.103. Percentil del 95% sobre la contrahuella del escalón $L/k_s = 61.46$.

De la Figura 4.104 a la Figura 4.111 se presenta como varían los cuatro estadísticos estudiados en función del caudal y para cada punto de la contrahuella. Se han obtenido las expresiones que en cada caso mejor se ajustan a dichos puntos. Las ecuaciones obtenidas se resumen de la Tabla 4.22 a la Tabla 4.25. Excepto en dos casos, ajustando una recta se han obtenido correlaciones superiores al 60% –y la mayoría de los casos superiores al 90%–, en cambio en los citados dos casos (correspondientes al percentil del 5%) se optó por una expresión polinómica de segundo grado, para las cuales se obtuvieron correlaciones, en el peor de los casos, del 94%. Del análisis de los ajustes presentados puede apreciarse que:

- Nótese como, salvo el comportamiento de los percentiles del 5% en cualquier otro caso (media, desviación típica y percentil del 95%) los valores obtenidos en cada punto de medida son tanto mayores cuanto mayor es el caudal circulante. Las estimaciones de los mínimos presentan una tendencia distinta: menores presiones cuanto mayor es el caudal.
- Al analizar la ubicación de los puntos sobre las contrahuellas en los que se registraron los máximos valores de cada uno de los estadísticos estudiados, se observa que en cualquier caso ese punto tiende a coincidir con la arista interior del peldaño ($z/h = 1$), salvo en el caso de la desviación típica que correspondió precisamente a la arista externa ($z/h = 0$). La posición donde se encuentran los valores mínimos para el caso de la presión media y el percentil del 5% coincide con la arista exterior ($z/h = 0$). En el caso del percentil del 95% dicha posición queda algo más indefinida, observándose algunos cruces entre los diversos ajustes llevados a cabo. De cualquier manera, dicho mínimo se encuentra en la zona $0.3 < z/h < 0.5$. El caso de la desviación típica el mínimo se registró sistemáticamente en el punto $z/h = 0.5$.
- Se aprecia que los valores máximos y mínimos estimados para cada uno de los estadísticos muestran una significativa tendencia lineal con el caudal. Tal y como será analizado posteriormente sólo el percentil del 5% muestra un comportamiento algo diferente al de los otros tres estadísticos: sus valores máximos parecen mostrar un comportamiento parabólico, mientras que sus valores mínimos muestran una tendencia de nuevo lineal.

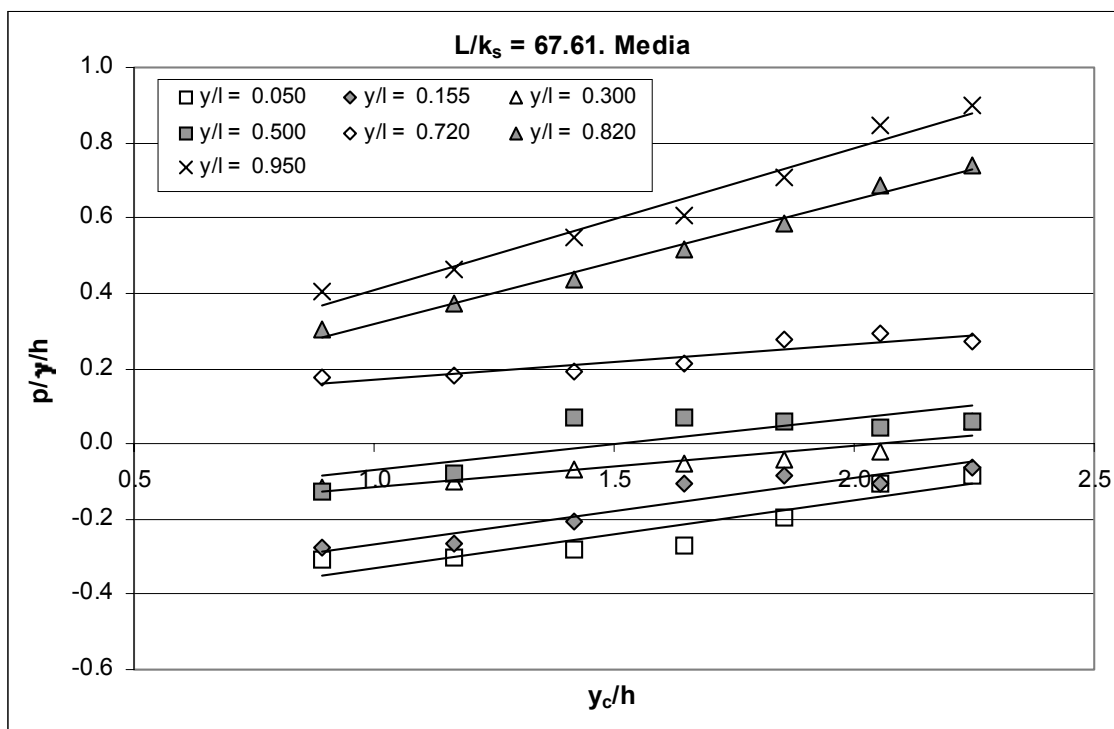


Figura 4.104. Variación de la media en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 67.61$.

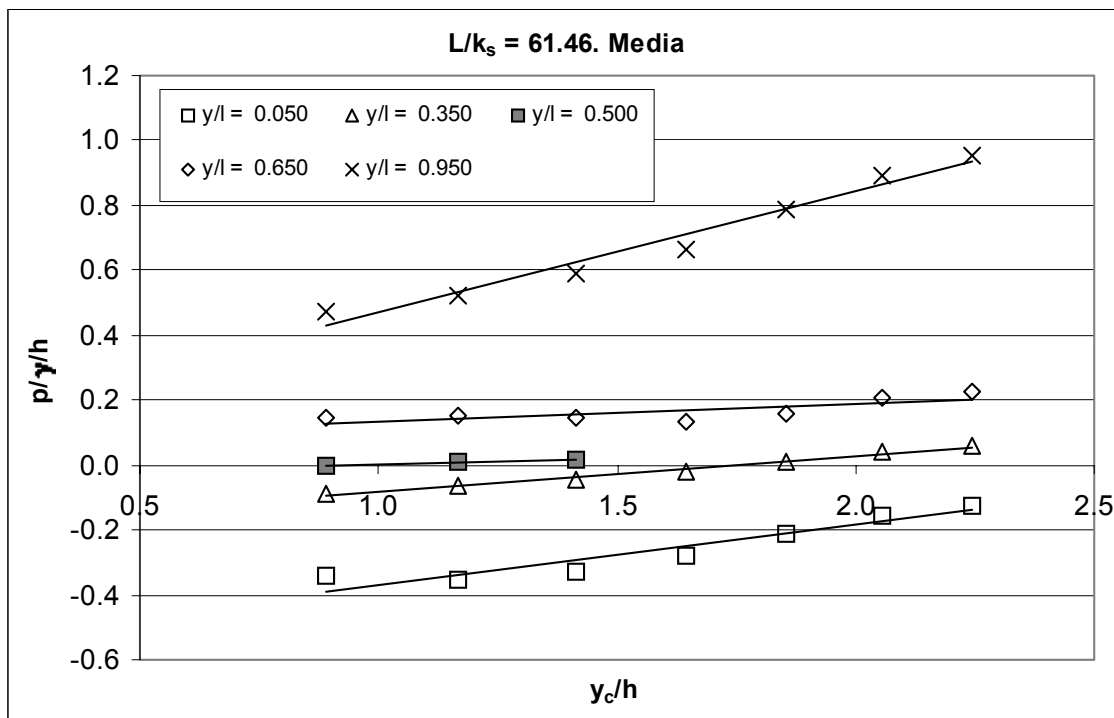


Figura 4.105. Variación de la media en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 61.46$.

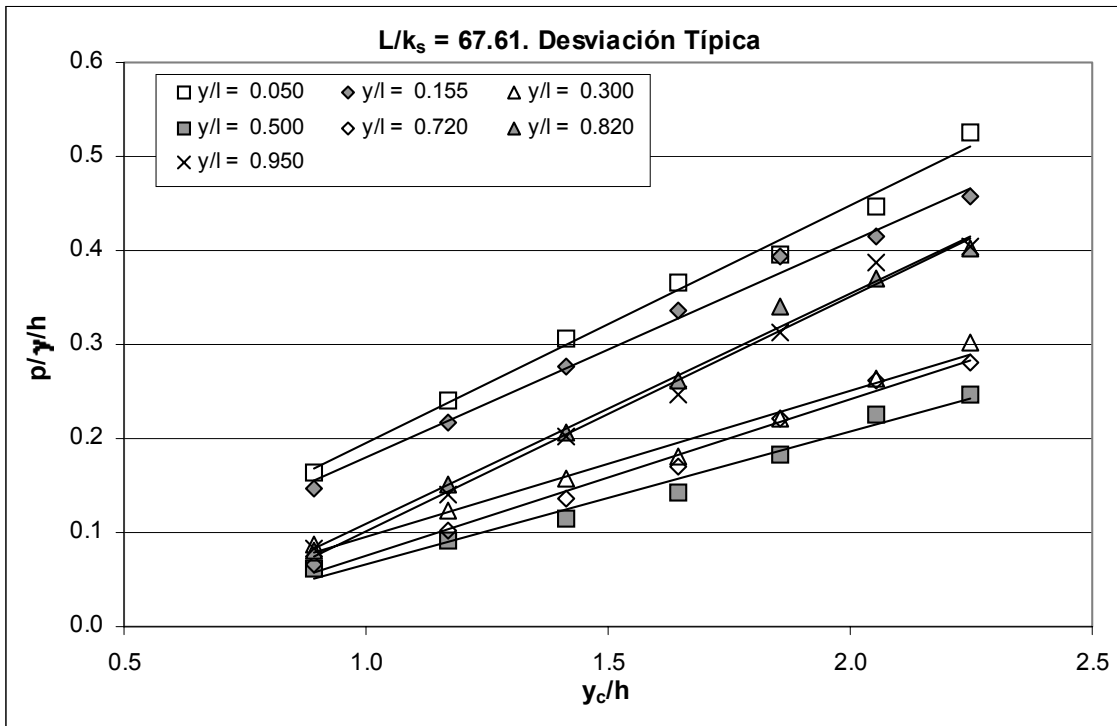


Figura 4.106. Variación de la desviación típica en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 67.61$.

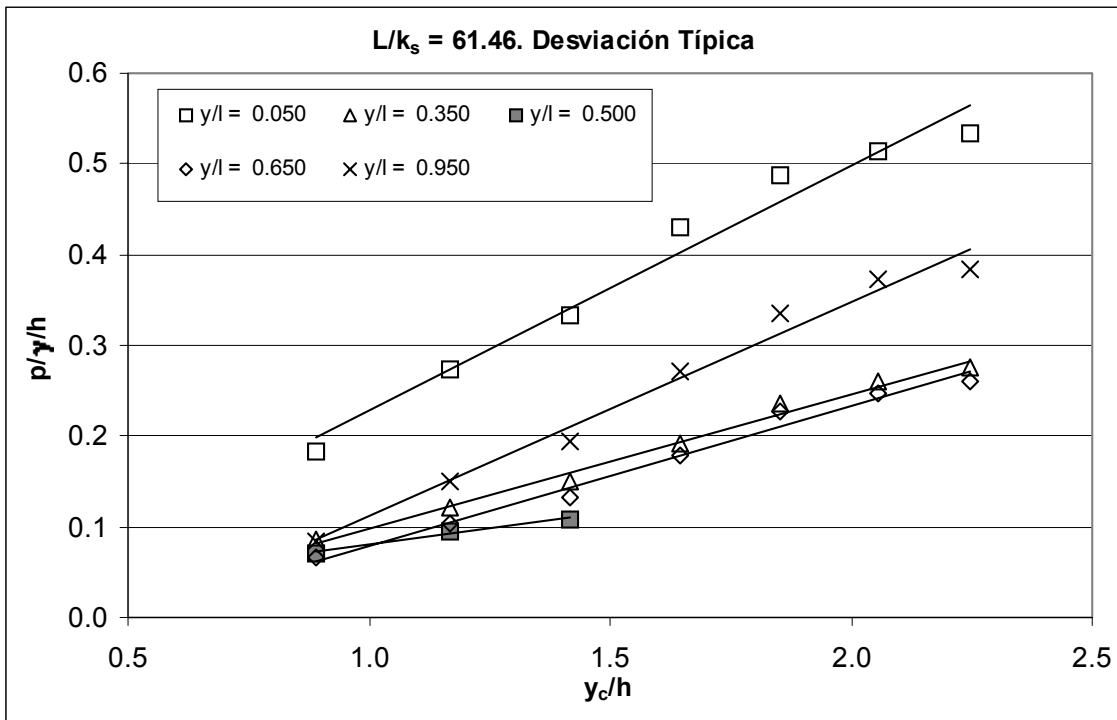


Figura 4.107. Variación de la desviación típica en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 61.46$.

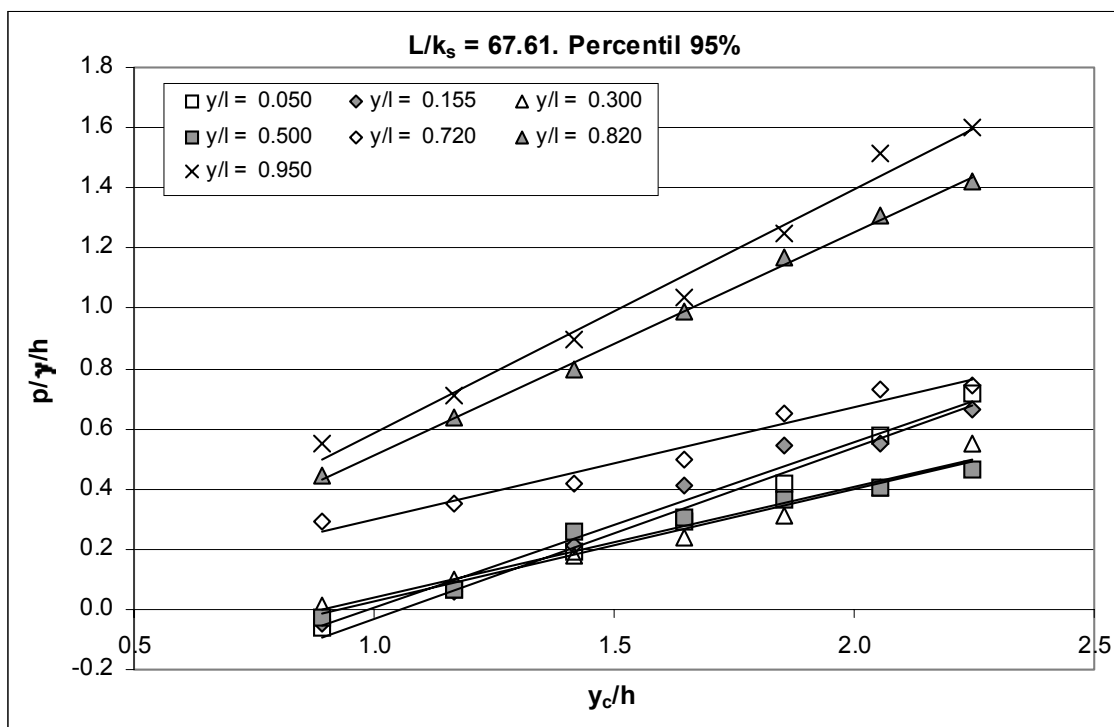


Figura 4.108. Variación del percentil del 95% en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 67.61$.

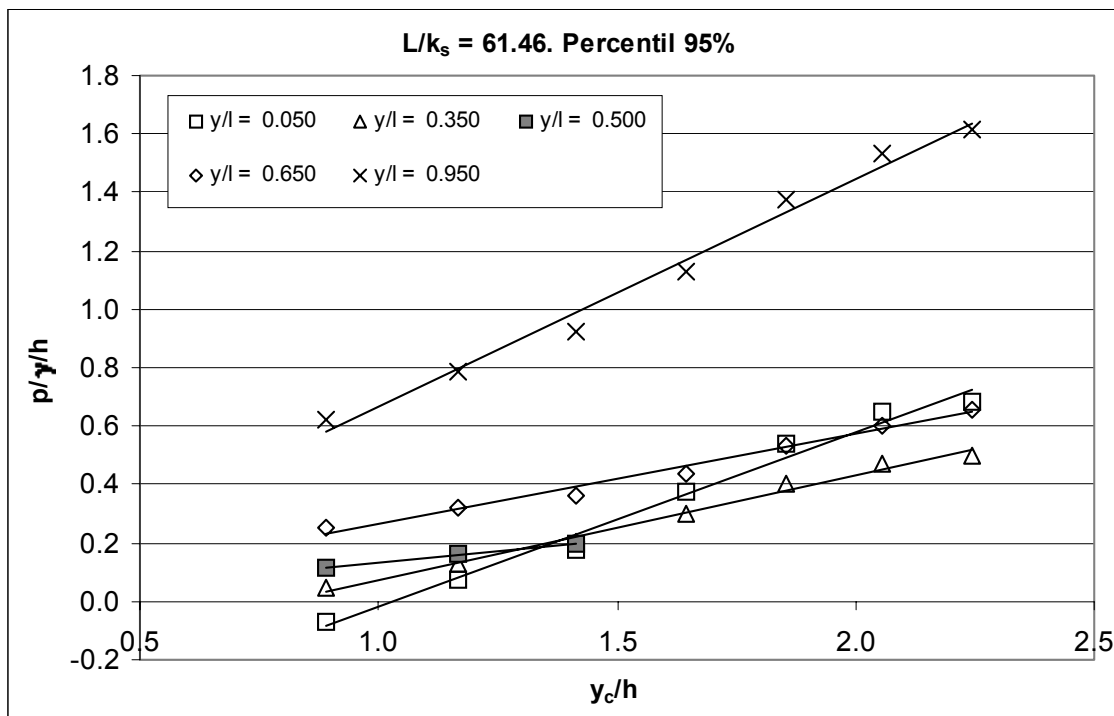


Figura 4.109. Variación del percentil del 95% en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 61.46$.

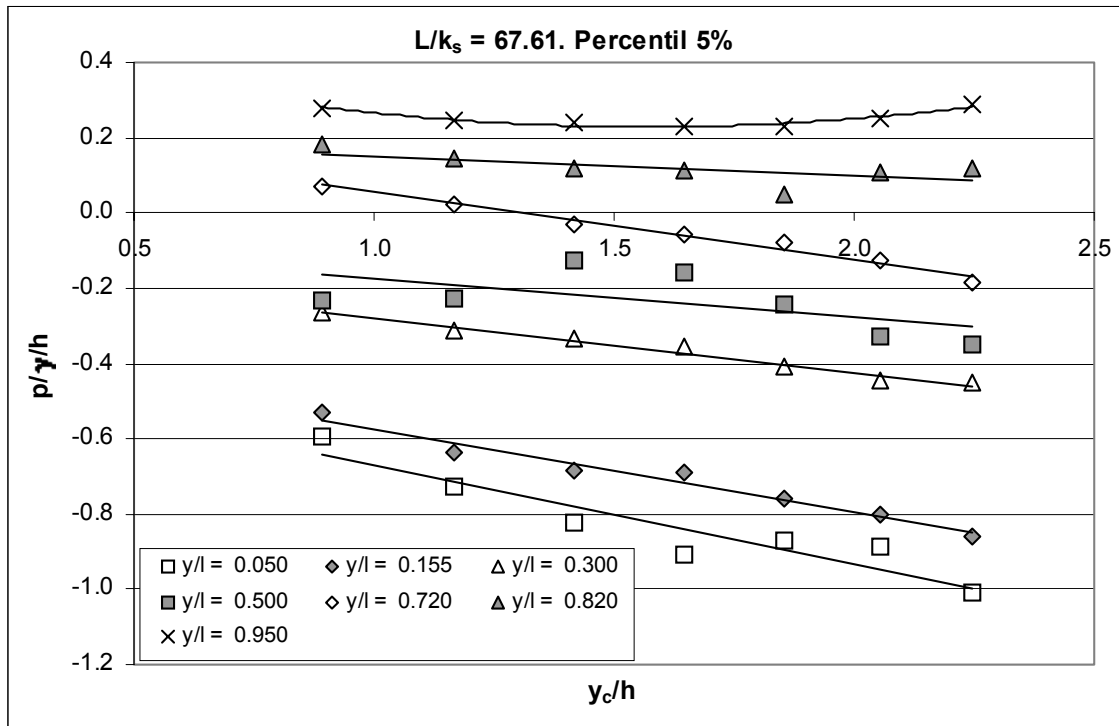


Figura 4.110. Variación del percentil del 5% en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 67.61$.

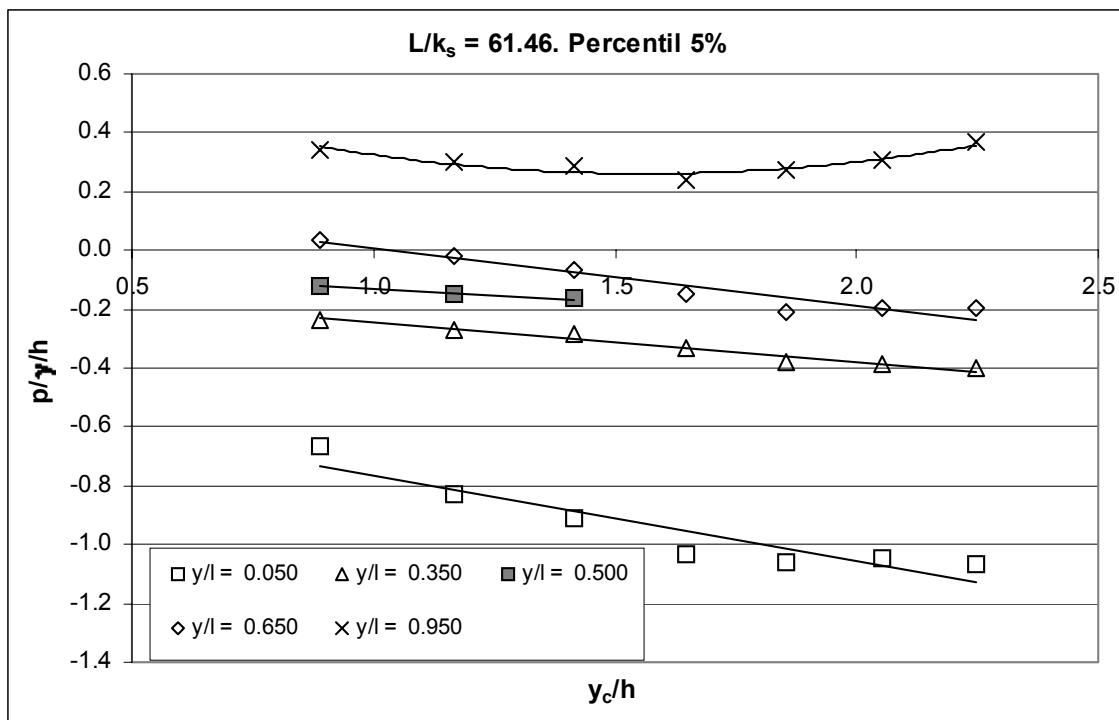


Figura 4.111. Variación del percentil del 5% en función del caudal, en los diferentes puntos de registro, para el peldaño $L/k_s = 61.46$.

<i>Tabla 4.22. Ecuaciones ajustadas para la presión media en las contrahuellas de los dos escalones ensayados.</i>				
<i>Punto de medida (z/h)</i>	<i>Ecuación ajustada</i>	<i>Correlación (r)</i>	<i>Escalón (L/k_s)</i>	<i>Figura de referencia</i>
0.050	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.178 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.507$ (4.98)	0.921	67.61	Figura 4.104
0.155	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.174 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.439$ (4.99)	0.943		
0.300	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.112 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.229$ (4.100)	0.940		
0.500	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.135 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.204$ (4.101)	0.793		
0.720	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.093 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.079$ (4.102)	0.916		
0.820	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.329 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.009$ (4.103)	0.994		
0.950	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.378 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.030$ (4.104)	0.984		
0.050	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.184 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.555$ (4.105)	0.948	61.46	Figura 4.105
0.350	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.111 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.193$ (4.106)	0.991		
0.500	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.036 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.033$ (4.107)	0.994		
0.650	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.054 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.080$ (4.108)	0.776		
0.950	$\frac{p}{\gamma} / h = 0.375 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.093$ (4.109)	0.984		

Tabla 4.23. Ecuaciones ajustadas para la desviación típica en las contrahuellas de los dos escalones ensayados.

Punto de medida (y/l)	Ecuación ajustada	Correlación (r)	Escalón (L/k_s)	Figura de referencia
0.050	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.253 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.058$ (4.110)	0.996	67.61	Figura 4.106
0.155	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.231 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.051$ (4.111)	0.996		
0.300	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.156 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.060$ (4.112)	0.993		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.141 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.075$ (4.113)	0.989		
0.720	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.166 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.091$ (4.114)	0.994		
0.820	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.245 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.135$ (4.115)	0.996		
0.950	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.250 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.148$ (4.116)	0.995		
0.050	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.270 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.041$ (4.117)	0.986	61.46	Figura 4.107
0.350	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.149 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.051$ (4.118)	0.994		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.072 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.008$ (4.119)	0.994		
0.650	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.154 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.074$ (4.120)	0.992		
0.950	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.237 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.126$ (4.121)	0.991		

<i>Tabla 4.24. Ecuaciones ajustadas para el percentil del 95% en las contrahuellas de los dos escalones ensayados.</i>				
<i>Punto de medida (y/l)</i>	<i>Ecuación ajustada</i>	<i>Correlación (r)</i>	<i>Escalón (L/k_v)</i>	<i>Figura de referencia</i>
0.050	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.568 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.601$ (4.122)	0.993	67.61	Figura 4.108
0.155	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.552 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.548$ (4.123)	0.987		
0.300	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.372 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.342$ (4.124)	0.984		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.365 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.325$ (4.125)	0.977		
0.720	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.372 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.073$ (4.126)	0.983		
0.820	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.739 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.225$ (4.127)	0.999		
0.950	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.811 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.228$ (4.128)	0.992		
0.050	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.600 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.620$ (4.129)	0.991	61.46	Figura 4.109
0.350	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.358 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.283$ (4.130)	0.995		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.148 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.014$ (4.131)	0.999		
0.650	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.305 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.038$ (4.132)	0.991		
0.950	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.783 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.120$ (4.133)	0.993		

Tabla 4.25. Ecuaciones ajustadas para el percentil del 5% en las contrahuellas de los dos escalones ensayados.

Punto de medida (y/l)	Ecuación ajustada	Correlación (r)	Escalón (L/k _s)	Figura de referencia
0.050	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.260 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.411$ (4.134)	0.936	67.61	Figura 4.110
0.155	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.221 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.353$ (4.135)	0.984		
0.300	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.143 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.137$ (4.136)	0.987		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.102 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.074$ (4.137)	0.600		
0.720	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.178 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.232$ (4.138)	0.991		
0.820	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.054 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.206$ (4.139)	0.659		
0.950	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.116 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.364 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.514$ (4.140)	0.964		
0.050	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.291 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.476$ (4.141)	0.929	61.46	Figura 4.111
0.350	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.133 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.114$ (4.142)	0.983		
0.500	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.084 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.047$ (4.143)	0.978		
0.650	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.193 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.198$ (4.144)	0.956		
0.950	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.206 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.643 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.762$ (4.145)	0.937		

4.2.2.1. Propuesta de modelación de los perfiles de presión en la contrahuella

Tras comprobar que de los dos modelos propuestos para simular los perfiles de presión sobre las huellas, la expresión cosenoidal (ecuación (4.94)) permitió un mejor análisis de aspectos importantes como el desplazamiento con el caudal de la posición de los mínimos relativos detectados, se propone en el caso de la contrahuella un modelo basado en el ajuste de una función trigonométrica a los valores normalizados de la presión sobre la misma. A pesar de ello, la observación de los valores de la presión media (Figura 4.96 y Figura 4.97) y percentil del 5% (Figura 4.100 y Figura 4.101) obtenidos de los registros realizados sobre las contrahuellas, puede apreciarse que no existe en tales casos una tendencia clara que invite a pensar en la existencia de un valor mínimo relativo de la distribución de dichos estadísticos. En ambos casos parece intuirse una tendencia monótona creciente desde $z/h = 0$ hasta $z/h = 1$. Ello permitió reducir el número de parámetros de ajuste de la distribución de los citados estadísticos (ecuación (4.146)). En el caso de la desviación típica y el percentil del 95%, se constató que un modelo senoidal (cosenoidal desfasado $\pi/2$) presentaba un mejor ajuste que el cosenoidal, a la vez que se apreciaba, esta vez sí, la existencia de un valor mínimo relativo de su distribución sobre las contrahuellas. Las expresiones que se sugieren son:

- para la presión media y percentil del 5%:

$$[P_{estadístico}]_{normalizado} = A \cos\left(\frac{z}{h} \cdot \pi\right) + B \quad (4.146)$$

- para la desviación típica y percentil del 95%:

$$[P_{estadístico}]_{normalizado} = A \sin\left(\frac{z}{h} \cdot \frac{\pi}{4C}\right) + B = A \cos\left(\frac{z}{h} \cdot \frac{\pi}{4C} - \frac{\pi}{2}\right) + B \quad (4.147)$$

Así, las expresiones (4.146) y (4.147) presentan sus extremos, respectivamente en:

$$\frac{z}{h} = m \quad m = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4.148)$$

$$\frac{z}{h} = (2m - 1) \cdot 2C \quad m = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4.149)$$

Correspondiendo, para la ecuación (4.146), los máximos a los valores pares de m y los mínimos a los impares, siempre y cuando el coeficiente A sea positivo (viceversa si es negativo). Lo contrario sucede para la ecuación (4.147).

Al igual que se estableció sobre la huella (ver apartado 4.2.1.2), para obtener la posición del mínimo correspondiente a la desviación típica o al percentil del 95% se procedió como sigue: para un caudal, peldaño y estadístico dados se ajustó una expresión del tipo (4.147), para diferentes valores de $(z/h)_{min}$. Ello se hizo con los datos sin normalizar. Esto permitió obtener para cada estadístico los valores de $(z/h)_{min}$ que mejor se ajustaban a cada caudal $y_c/h \geq 0.891$. Así, para la desviación típica y percentil del 5%, se obtuvieron los pares de puntos $((z/h)_{min}, y_c/h)$ para los cuales, por mínimos cuadrados, se ajustó una expresión del tipo:

$$\left(\frac{z}{h}\right)_{min} = \alpha \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + \beta \frac{y_c}{h} + \gamma \quad (4.150)$$

En la Figura 4.112 se muestra como varía la estimación de la posición de los extremos relativos de los perfiles de la desviación típica y de los percentiles del 95%. No se ha incluido en dicho gráfico una curva específica correspondiente a la presión media ni al percentil del 5% puesto que, como se ha justificado al inicio de este apartado, sus respectivas distribuciones sobre las contrahuellas muestran un comportamiento monótono creciente, careciendo de un mínimo relativo. En dicho gráfico puede apreciarse que:

- Para cualquier caudal y ambos peldaños, en los dos estadísticos se aprecia un comportamiento algo distinto entre sí, a diferencia de lo sucedido sobre las huellas.
- La posición del mínimo en la distribución de la desviación típica, parece mostrarse prácticamente constante, con una ligera tendencia a desplazarse hacia la arista externa del escalón al aumentar el caudal.
- La posición del mínimo para la distribución del percentil del 95%, presenta valores muy parecidos en ambos escalones, encontrándose siempre entre $0.25 < z/h < 0.4$, con una ligera tendencia a encontrarse más hacia el interior de la contrahuella para caudales mayores.

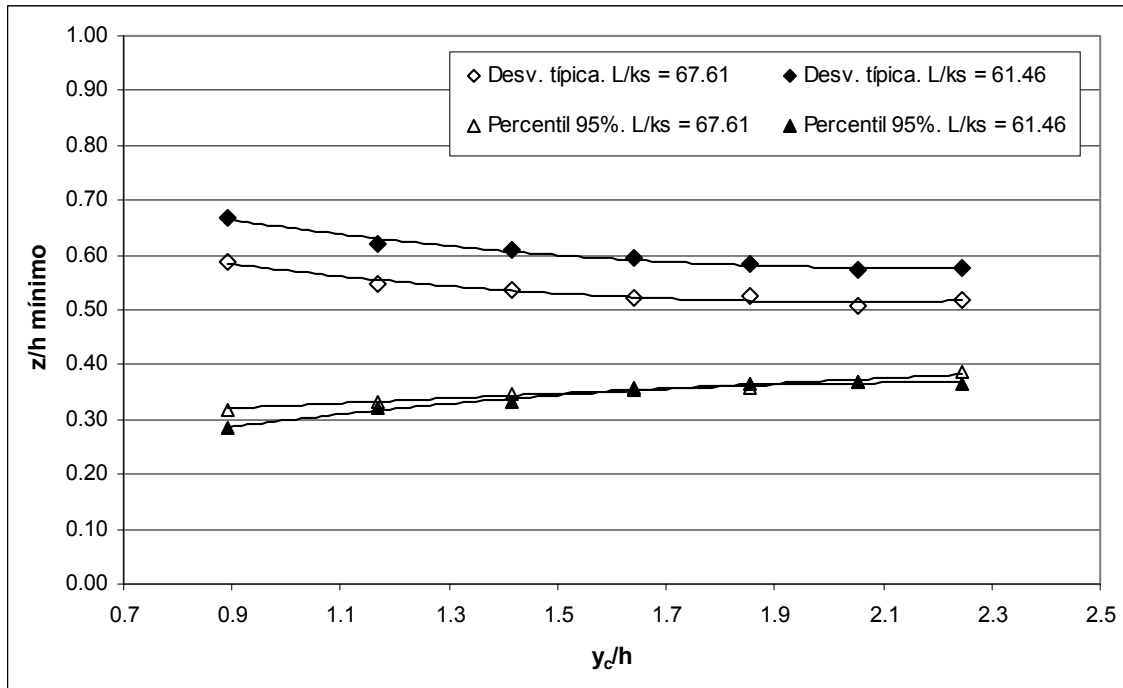


Figura 4.112. Posición z/h sobre la contrahuella en la que se estima el mínimo relativo de los perfiles de la desviación típica y percentil del 95%.

Tabla 4.26. Coeficientes α , β y γ para el ajuste de la expresión (4.150). Validez para $0.89 \leq \frac{y_c}{h} \leq 2.3$

Perfil de presión	Escalón (L/k_s)	α	β	γ	Correlación (r)
Desviación típica	61.46	0.057	-0.244	0.837	0.993
	67.61	0.053	-0.217	0.736	0.988
Percentil 95%	61.46	-0.049	0.213	0.135	0.995
	67.61	0.001	0.043	0.281	0.988

En la Tabla 4.26 se indican los coeficientes que ajustan la expresión (4.150) a los puntos mostrados en la Figura 4.112.

Una vez analizado el comportamiento de los perfiles de presión sobre las contrahuellas en lo que se refiere a la existencia y ubicación de extremos relativos, se exigirá que los coeficientes A y B de las ecuaciones de ajuste propuestas (4.146) y (4.147) adopten unos valores acordes con la presencia de extremos en la posición adecuada. Teniendo en cuenta la normalización del estadístico estos extremos son 0 (mínimo) y 1 (máximo)

En la Tabla 4.27 puede observarse que tanto en el caso de la desviación típica como del percentil del 95%, $A < 0$ por lo que del patrón de ajuste (4.147) y de (4.149), se concluye que la posición en la que se dará el valor mínimo de dichos estadísticos ($(z/h)_{\min}$) coincide, como cabía esperar, con el parámetro $2C$. Es decir:

$$\left(\frac{z}{h}\right)_{\min} = 2C \tag{4.151}$$

Así, conocida la posición de los máximos y mínimos de los estadísticos, se procederá al análisis de su distribución espacial (expresión (4.146) ó (4.147), según corresponda). Primero se procedió a normalizarlos (expresión (4.83)) utilizando los extremos de cada estadístico estimados a partir de los propios registros experimentales, por coherencia con el proceso de ajuste utilizado en los modelos ajustados sobre la huella. En los gráficos de la Figura 4.113 a la Figura 4.116, se muestran los ajustes obtenidos, por míni-

mos cuadrados, para cada uno de los caudales ensayados, para cada escalón analizado y a partir de la estandarización de los diferentes estadísticos (en trazo discontinuo). Estas curvas se comparan con otras (en trazo continuo) obtenidas al imponer para el patrón (4.146) ó (4.147) que los coeficientes A y B valgan lo que se establece en la Tabla 4.27 y que los valores del parámetro $2C=(z/h)_{min}$, para cada caudal ensayado, correspondan a los establecidos por la ecuación (4.150) y la Tabla 4.26. Nótese que en el caso de la presión media (Figura 4.113) y del percentil del 5% (Figura 4.116) se obtiene una única curva de ajuste ya que en ambos casos no se cuenta con el parámetro de ajuste $2C$, y por tanto, cualquier dependencia con el caudal se manifiesta en el proceso de normalización de los estadísticos.

<i>Tabla 4.27. Valores de A y B correspondientes a la distribución sobre la contrahuella de la presión media, desviación típica, percentil de 95% y percentil de 5% en los dos escalones ensayados $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$. Rango de validez $0 < z/h < 1$ y $1.1 < y_c/h < 2.3$</i>						
Estadístico	Ecuación	$z/h = 0$	$z/h = 2C$	$z/h = 1$	A	B
Presión media	(4.146)	Mínimo	–	Máximo	$-1/2$	$1/2$
Desviación típica	(4.147)	Máximo	Mínimo	–	-1	1
Percentil del 95%	(4.147)	–	<i>Mínimo</i>	Máximo	$\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{4C}\right)} - 1$	$\frac{-1}{\sin\left(\frac{\pi}{4C}\right)} - 1$
Percentil del 5%	(4.146)	Mínimo	–	<i>Máximo</i>	$-1/2$	$1/2$

No se aprecia que los puntos correspondientes al menor de los caudales ($y_c/h = 0.891$) reflejen una conducta significativamente diferenciada a la de los caudales mayores, tal y como se había apreciado con claridad al analizar los resultados sobre la huella –apartado 4.2.1.1–. De cualquier manera por coherencia con dicho análisis se estudiará como ajustan las ecuaciones (4.146) y (4.147) a los resultados obtenidos, salvo para el menor caudal.

Si bien los ajustes, que se grafican de la Figura 4.113 a la Figura 4.116, se han establecido a partir de los estadísticos normalizados mediante los valores extremos estimados en cada caso de los registros experimentales, en la práctica estos valores podrán ser obtenidos de las expresiones mostradas de la Tabla 4.22 a la Tabla 4.25. En la Tabla 4.28 se resumen las ecuaciones que se obtuvieron para la estimación de los extremos de cada estadístico, a fin de establecer su estandarización –expresión (4.83)–.

<i>Tabla 4.28. Expresiones propuestas para la estimación de las variables de normalización de la expresión (4.83).</i>				
Variable	Tabla	Escalón (L/k_s)	Ecuación propuesta	Rango de validez
Máxima presión media ($P_{media})_{max}$	Tabla 4.22	67.61	(4.104)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
		61.46	(4.109)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
Mínima presión media ($P_{media})_{min}$	Tabla 4.22	67.61	(4.98)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
		61.46	(4.105)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
Máxima desviación típica ($P_{desv})_{max}$	Tabla 4.23	67.61	(4.110)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
		61.46	(4.117)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
Mínima desviación típica ($P_{desv})_{min}$	Tabla 4.23	67.61	(4.113)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
		61.46	(4.119)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
Máximo percentil del 5% ($P_{perc5\%})_{max}$	Tabla 4.25	67.61	(4.140)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
		61.46	(4.145)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
Mínimo percentil del 5% ($P_{perc5\%})_{min}$	Tabla 4.25	67.61	(4.134)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
		61.46	(4.141)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
Máximo percentil del 95% ($P_{perc95\%})_{max}$	Tabla 4.24	67.61	(4.128)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
		61.46	(4.133)	$1.1 < y_c/h < 2.3$
Mínimo percentil del 95% ($P_{perc95\%})_{min}$	Tabla 4.24	67.61	(4.122)	$1.1 < y_c/h < 1.35$
			(4.124)	$1.35 < y_c/h < 2.3$
		61.46	(4.129)	$1.1 < y_c/h < 1.35$
			(4.130)	$1.35 < y_c/h < 2.3$

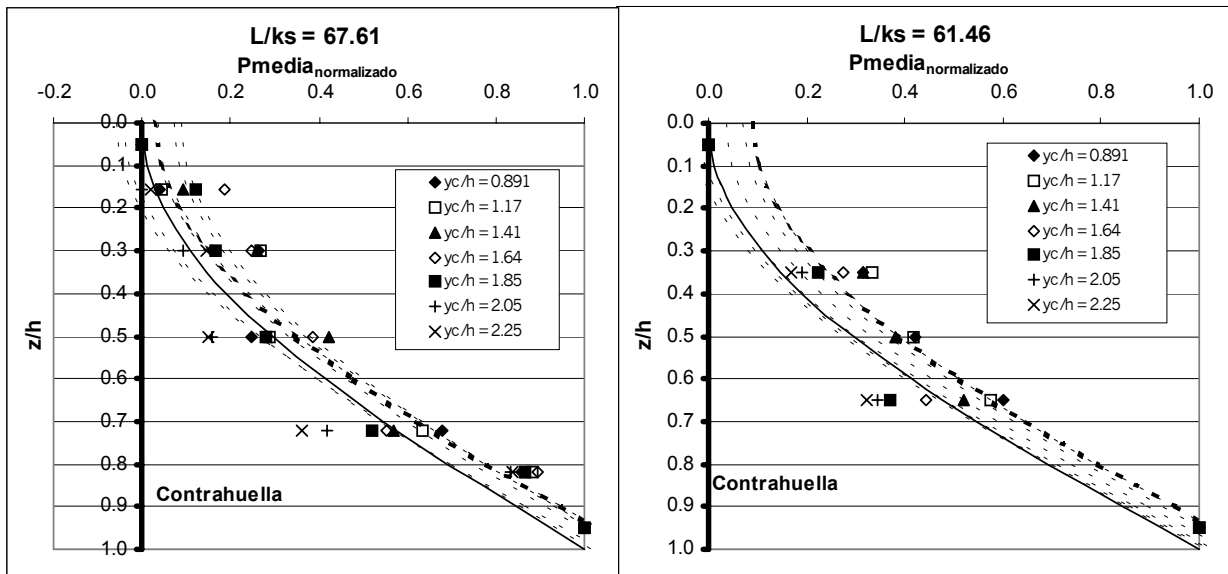


Figura 4.113. Presión media estandarizada. Escalones $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la curva correspondiente al modelo propuesto –ecuación (4.146) y coeficientes mostrados en la Tabla 4.27– (trazo continuo). Validez entre $0 < y/l < 1$, y $1.1 < y_c/h < 2.3$. El caudal $y_c/h = 0.891$ en trazo discontinuo grueso.

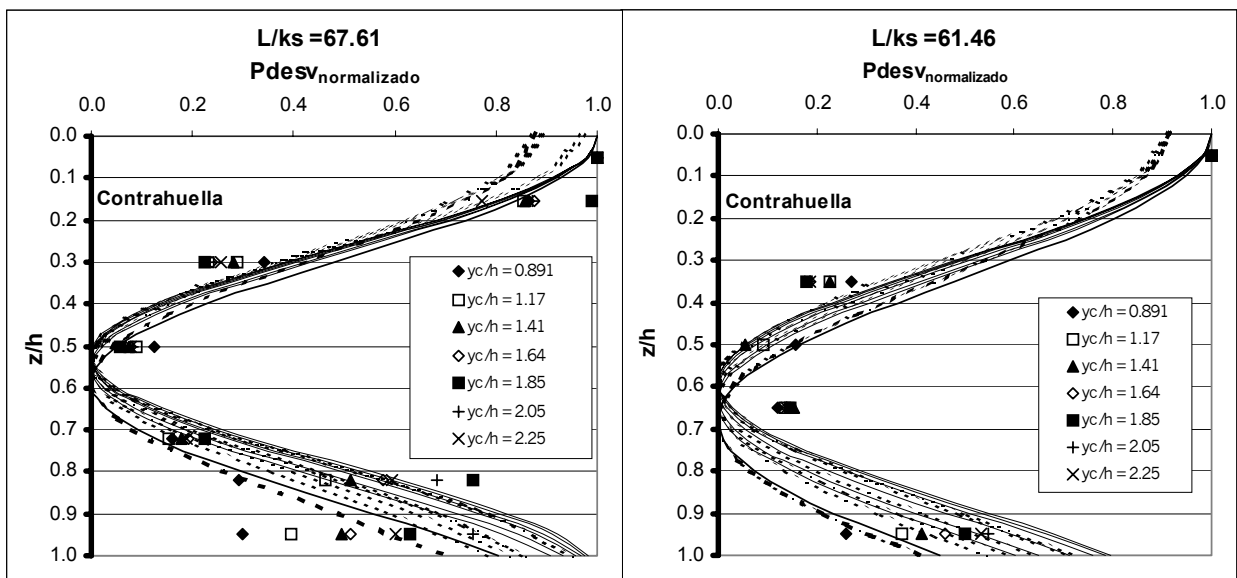


Figura 4.114. Desviación típica estandarizada. Escalones $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto –ecuación (4.147) y coeficientes mostrados en la Tabla 4.26 y la Tabla 4.27– (trazo continuo). Validez entre $0 < y/l < 1$, y $1.1 < y_c/h < 2.3$. Las curvas correspondientes a $y_c/h = 0.891$ en trazo grueso.

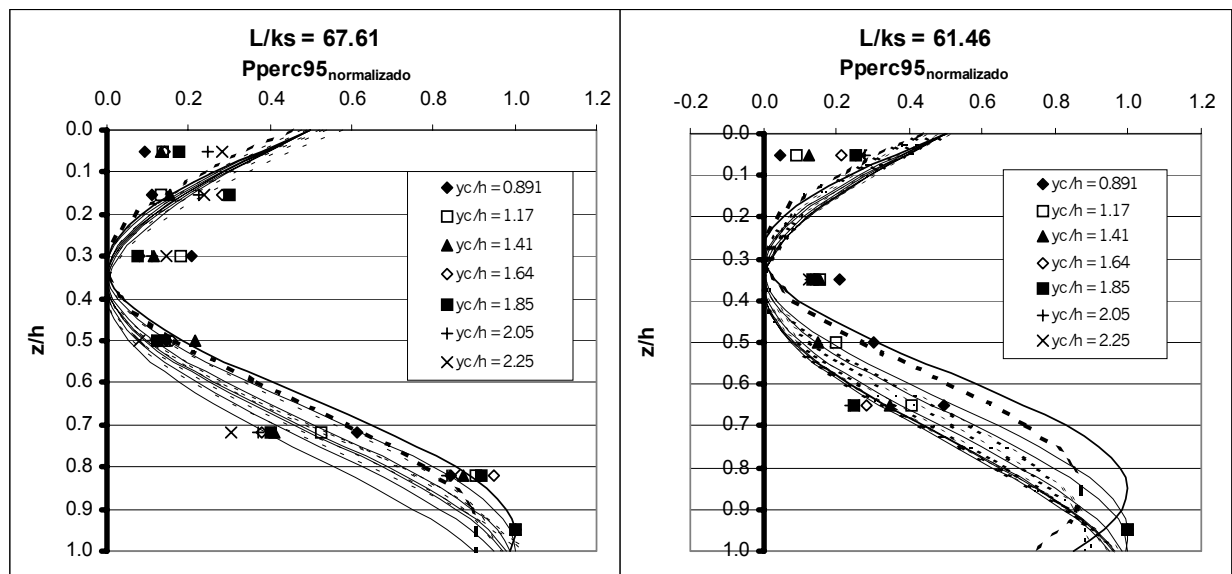


Figura 4.115. Percentil del 95% estandarizado. Escalones $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la familia de curvas correspondiente al modelo propuesto –ecuación (4.147) y coeficientes mostrados en la Tabla 4.26 y la Tabla 4.27– (trazo continuo). Validez entre $0 < y/l < 1$, y $1.1 < y_c/h < 2.3$. Las curvas correspondientes a $y_c/h = 0.891$ en trazo grueso.

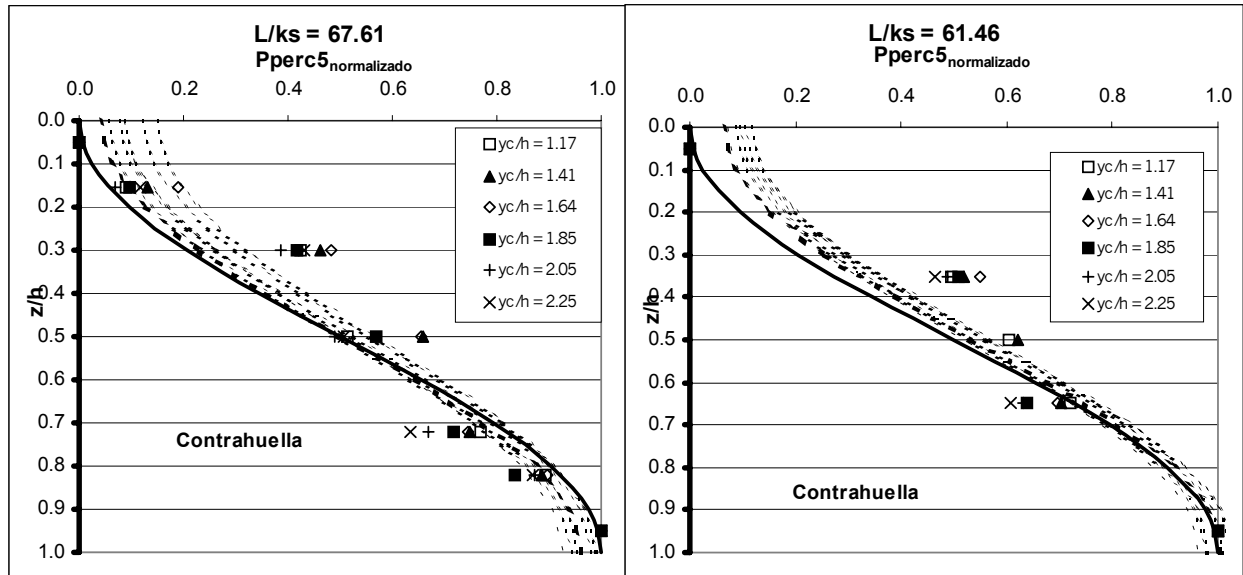


Figura 4.116. Percentil del 5% estandarizado. Escalones $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$. Comparación del ajuste obtenido para cada caudal (trazo discontinuo) con la curva correspondiente al modelo propuesto –ecuación (4.146) y coeficientes mostrados en la Tabla 4.27– (trazo continuo). Validez entre $0 < y/l < 1$, y $1.1 < y_c/h < 2.3$. El caudal $y_c/h = 0.891$ en trazo discontinuo grueso.

En el apartado 3.3 del Anejo 2, se analizará la bondad del presente modelo. Se mostrará que en ciertos casos, apareció correlación muestral no suficientemente significativa, y se justificará que ello fue debido a los pocos puntos usados en los ajustes para ciertos caudales. A pesar de ello ya que las correlaciones obtenidas fueron siempre alrededor del 90%, se procedió a evaluar la bondad de los valores propuestos en la Tabla 4.27, resultando siempre aceptables con un nivel de significación del 10%.

4.2.2.1.1. Simplificación del modelo

- Normalización de los estadísticos. Estimación de los extremos

En la página 4-94 se ha descrito el comportamiento de los diversos estadísticos estimados sobre un punto de medida de la contrahuella en función del caudal circulante. Se destacó la tendencia lineal de los valores extremos registrados en cada caso, salvo los valores máximos del percentil del 5% que mostraban una tendencia parabólica.

Al comparar los ajustes correspondientes a los extremos de cada estadístico, obtenidos para cada uno de los dos peldaños analizados, se observan pocas diferencias. Ello hizo pensar en optar por un ajuste común a los dos escalones. De esta manera se plantea una formulación más sencilla en los modelos de distribución de cada estadístico sobre las contrahuellas.

De la Figura 4.117 a la Figura 4.120 se muestran dichas comparaciones. En la Tabla 4.29 se presentan los ajustes correspondientes para la estimación de los valores extremos de cada estadístico comunes a ambos peldaños. Obsérvese que la diferencia entre la anterior Tabla 4.28 y la Tabla 4.29 estriba en que mientras en la primera se propone una expresión para el máximo y el mínimo de cada estadístico distinta en función del tipo de escalón que se analice, en la segunda se propone una única expresión para ambos escalones a la vista de las escasas diferencias que se observan al compararlos (Figura 4.117 a la Figura 4.120).

<i>Tabla 4.29. Ecuaciones propuestas para la obtención de los valores extremos de los respectivos estadísticos, comunes a las contrahuellas de ambos escalones ($L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$).</i>					
<i>Estadístico</i>		<i>Ecuación ajustada</i>		<i>Correlación (r)</i>	<i>Figura de referencia</i>
Media	Máximo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.377 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.061$	(4.152)	0.970	Figura 4.117
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.181 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.531$	(4.153)	0.915	Figura 4.117
Desviación típica	Máximo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.261 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.049$	(4.154)	0.973	Figura 4.118
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.135 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.065$	(4.155)	0.983	Figura 4.118
Percentil del 95%	Máximo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.797 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.174$	(4.156)	0.989	Figura 4.119
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.365 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.313$	(4.157)	0.983	Figura 4.119
Percentil del 5%	Máximo	$\frac{p}{\gamma}/h = 0.161 \cdot \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.503 \cdot \frac{y_c}{h} + 0.638$	(4.158)	0.708	Figura 4.120
	Mínimo	$\frac{p}{\gamma}/h = -0.275 \cdot \frac{y_c}{h} - 0.444$	(4.159)	0.855	Figura 4.120

Si bien todo el análisis mostrado en este apartado se ha establecido a partir de los estadísticos normalizados con los valores extremos experimentales, en la práctica, estos valores máximo y mínimo de cada uno de los estadísticos podrán estimarse de las expresiones indicadas en la Tabla 4.29 y obtenidas de manera conjunta para ambos tipos de escalones. En el caso de la presión media y del percentil del 5%, los valores máximo y mínimo se dan respectivamente en $z/h = 1$ y $z/h = 0$, tal y como ya ha sido descrito. En el caso

de la desviación típica y del percentil del 95%, sus valores máximos se dan respectivamente en $z/h = 0$ y en $z/h = 1$. Se han localizado los puntos sobre las huellas de cada uno de los escalones donde se dan los mínimos de estos dos estadísticos (ecuación (4.150) y Tabla 4.26). Estos puntos se entiende que no coinciden exactamente con los correspondientes a las expresiones de la Tabla 4.29, que se aconseja utilizar. Si bien se comprende que ello estará introduciendo una cierta distorsión al modelo trigonométrico, se sugiere estimar los valores mínimos a partir de las expresiones de la citada tabla.

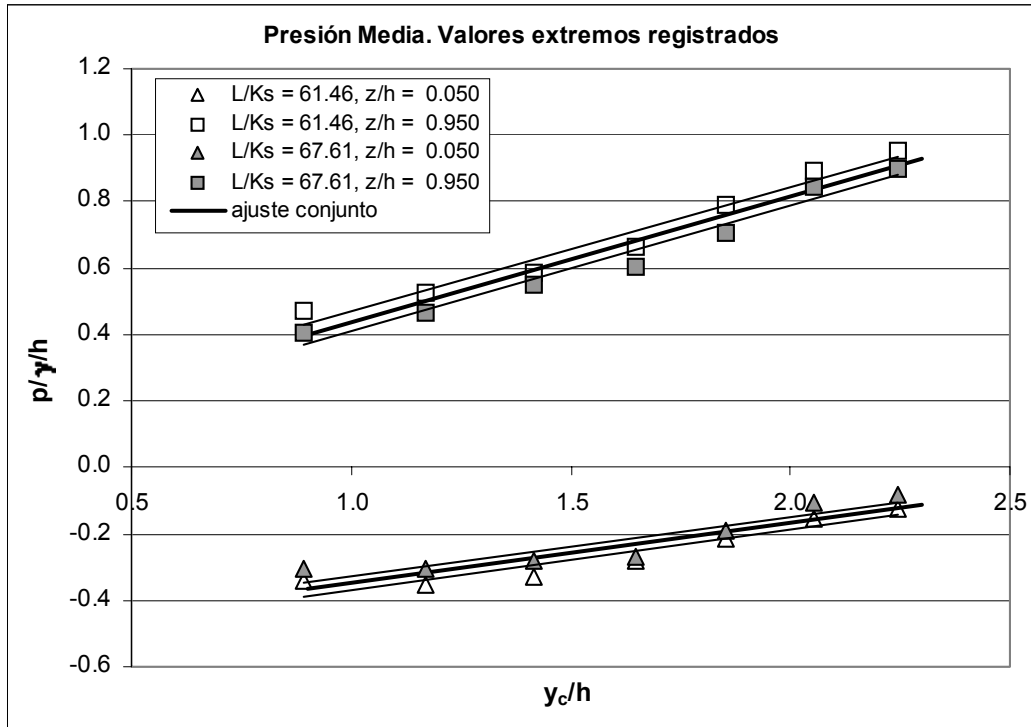


Figura 4.117. Comparación de los valores extremos de las presiones medias obtenidas, sobre las contra-huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$, en función del caudal circulante.

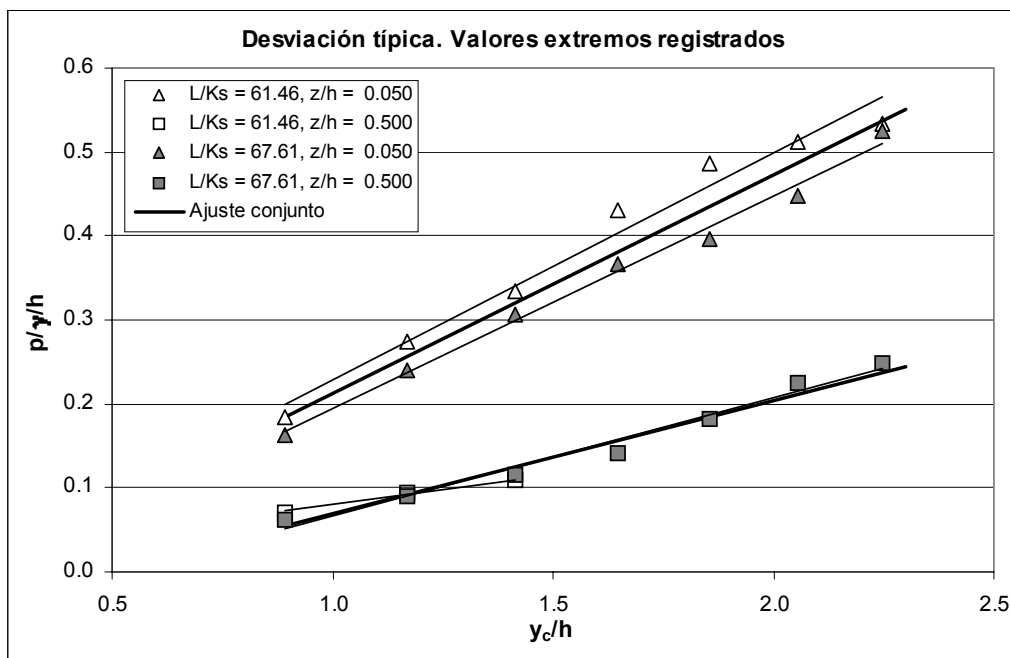


Figura 4.118. Comparación de los valores extremos de la desviación típica obtenida, sobre las contra-huellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$, en función del caudal circulante.

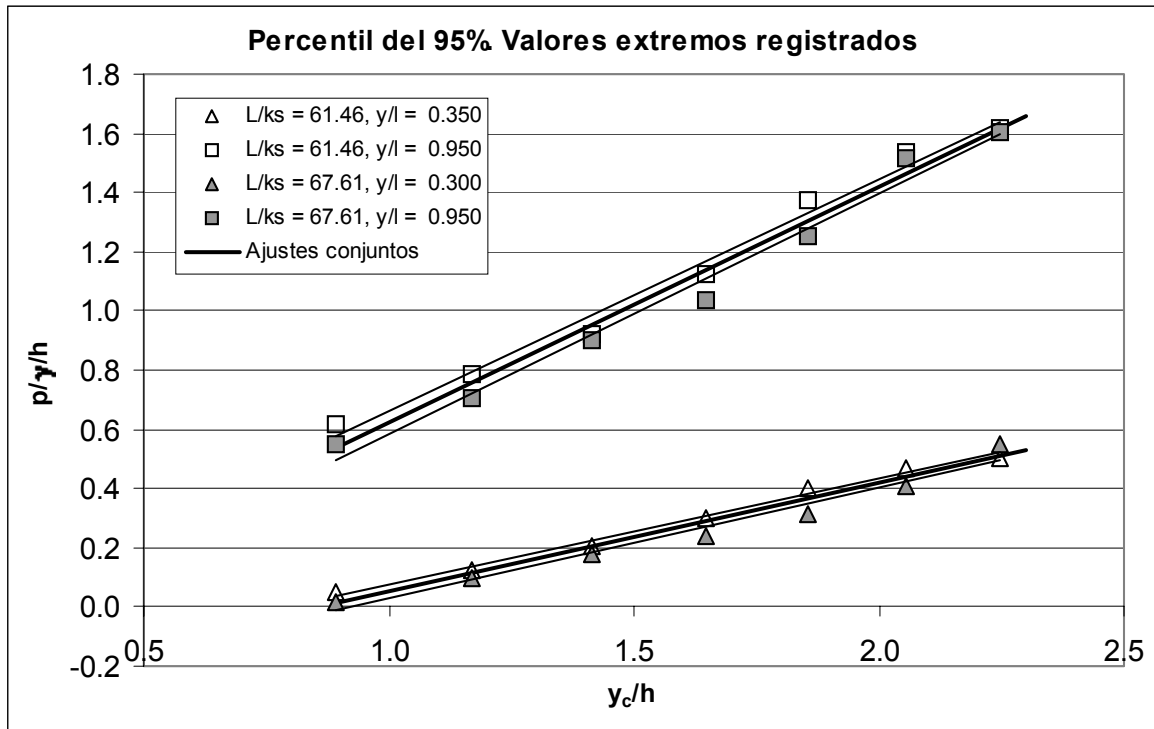


Figura 4.119. Comparación de los valores extremos de los percentiles del 95% obtenidos, sobre las contrahuellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$, en función del caudal circulante.

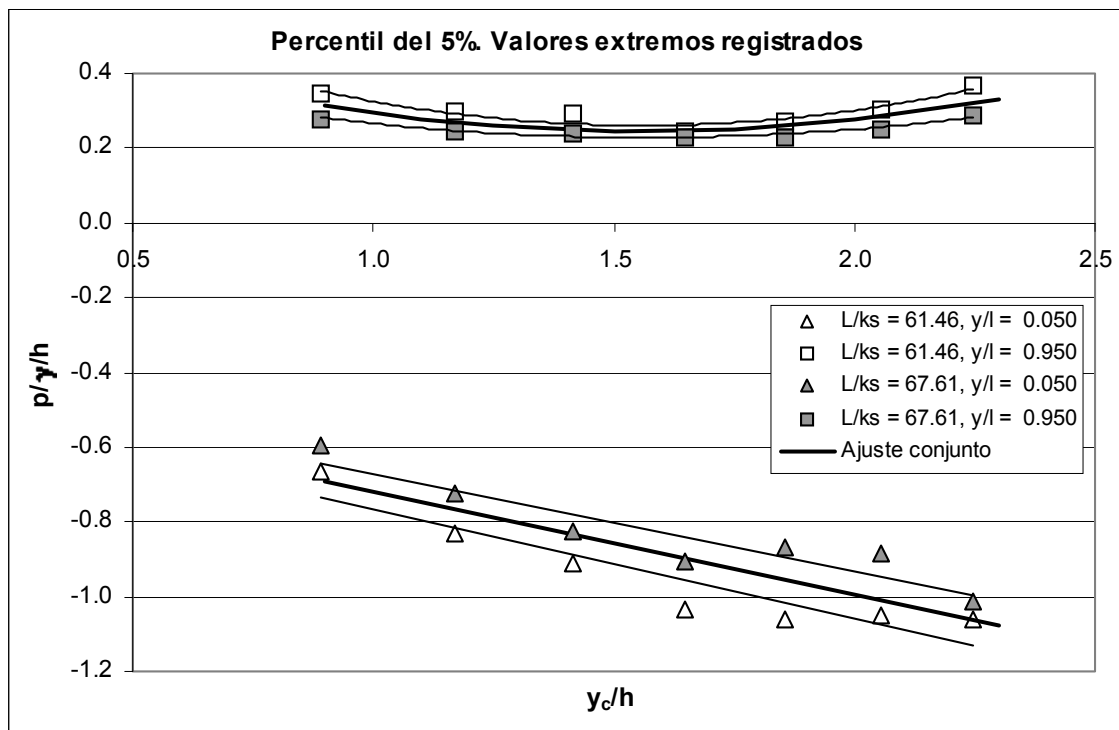


Figura 4.120. Comparación de los valores extremos de los percentiles del 5% obtenidos, sobre las contrahuellas de los dos escalones analizados $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 61.46$, en función del caudal circulante.

En la Tabla 15 del apartado 3.2. del Anejo 2, se detallarán los intervalos de confianza del 95% de cada uno de los coeficientes mostrados en la tabla anterior.

4.2.2.1.2. Aplicación del modelo

Se ha propuesto un modelo (expresiones (4.146) y (4.147)) que permite analizar la distribución de la presión que un caudal, en el rango $1.1 < y_c/h < 2.3$, establecerá sobre la contrahuella de un escalón ubicado en la zona de flujo rasante completamente desarrollado de un aliviadero escalonado, diseñado con peldaños que definen una pendiente $h/l = 1.25$. Para su aplicación se sugiere proceder como sigue:

1. Se elegirán los coeficientes A y B correspondientes al estadístico que se pretenda analizar, y que corresponden a las ecuaciones (4.146) y (4.147). Dichos coeficientes se detallan en la Tabla 4.27.
2. Se analizará el escalón, según convenga, como máximo o mínimo de la onda estacionaria de presión que se ha mostrado en el anterior apartado 3.2.3. De esta manera se define el parámetro C , con los coeficientes α , β y γ de la ecuación (4.150) (Tabla 4.26). Así puede obtenerse el estadístico normalizado.
3. Por último se deberán estimar los valores extremos del estadístico para deshacer su estandarización. Las expresiones propuestas se detallan en la Tabla 4.29.

De esta manera se han estimado las familias de curvas de la presión media, desviación típica y percentiles del 95% y del 5%, para un escalón representativo de un valle ($L/k_s = 61.46$) y otro de un pico ($L/k_s = 67.61$) de la onda estacionaria de presiones. Se presenta la comparación de estas estimaciones con los correspondientes estadísticos obtenidos de los propios registros experimentales de presión (Figura 4.121 a la Figura 4.128).

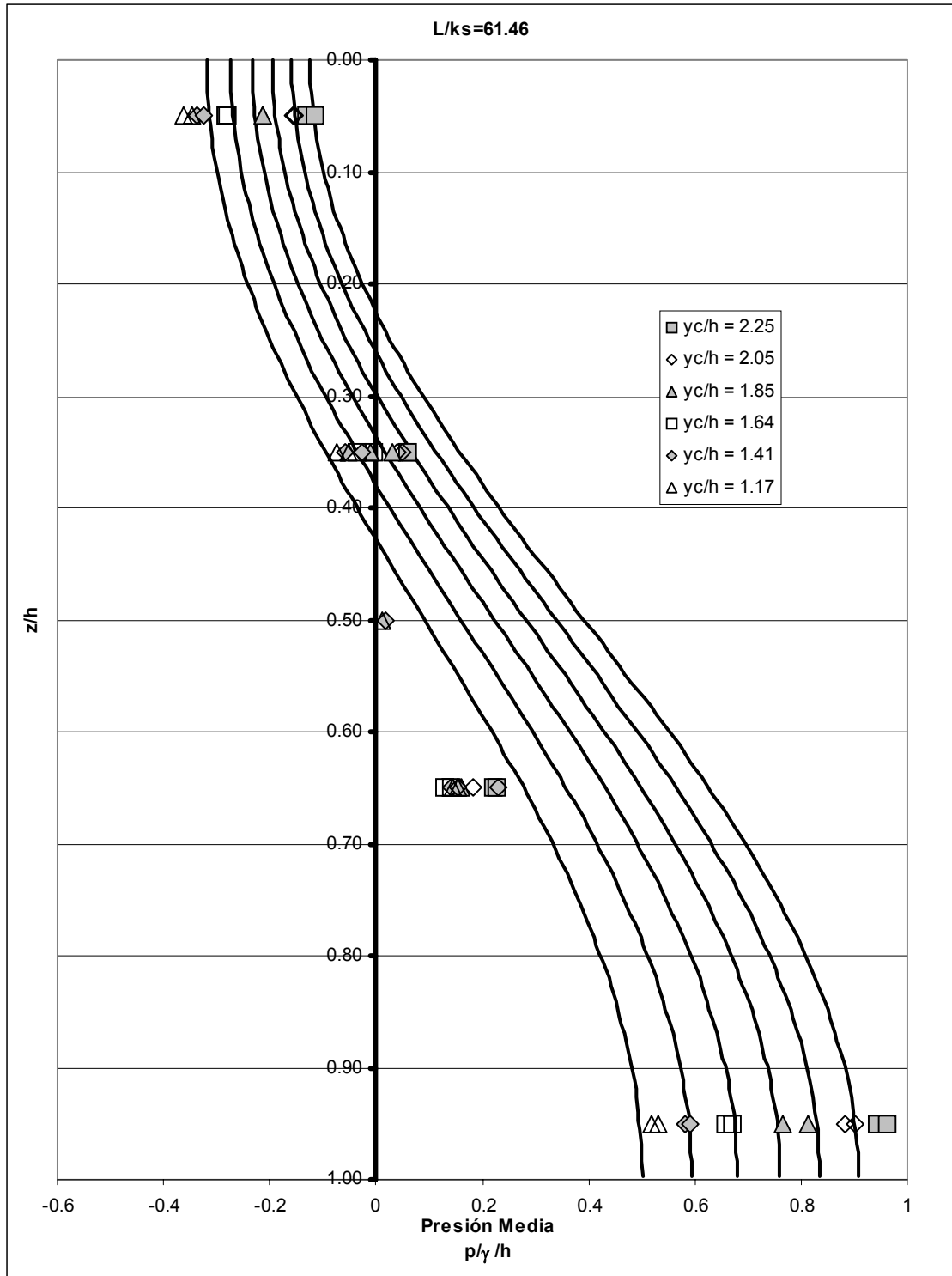


Figura 4.121. Perfiles ajustados para la presión media, en el peldaño $L/k_s = 61.46$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con los registros experimentales.

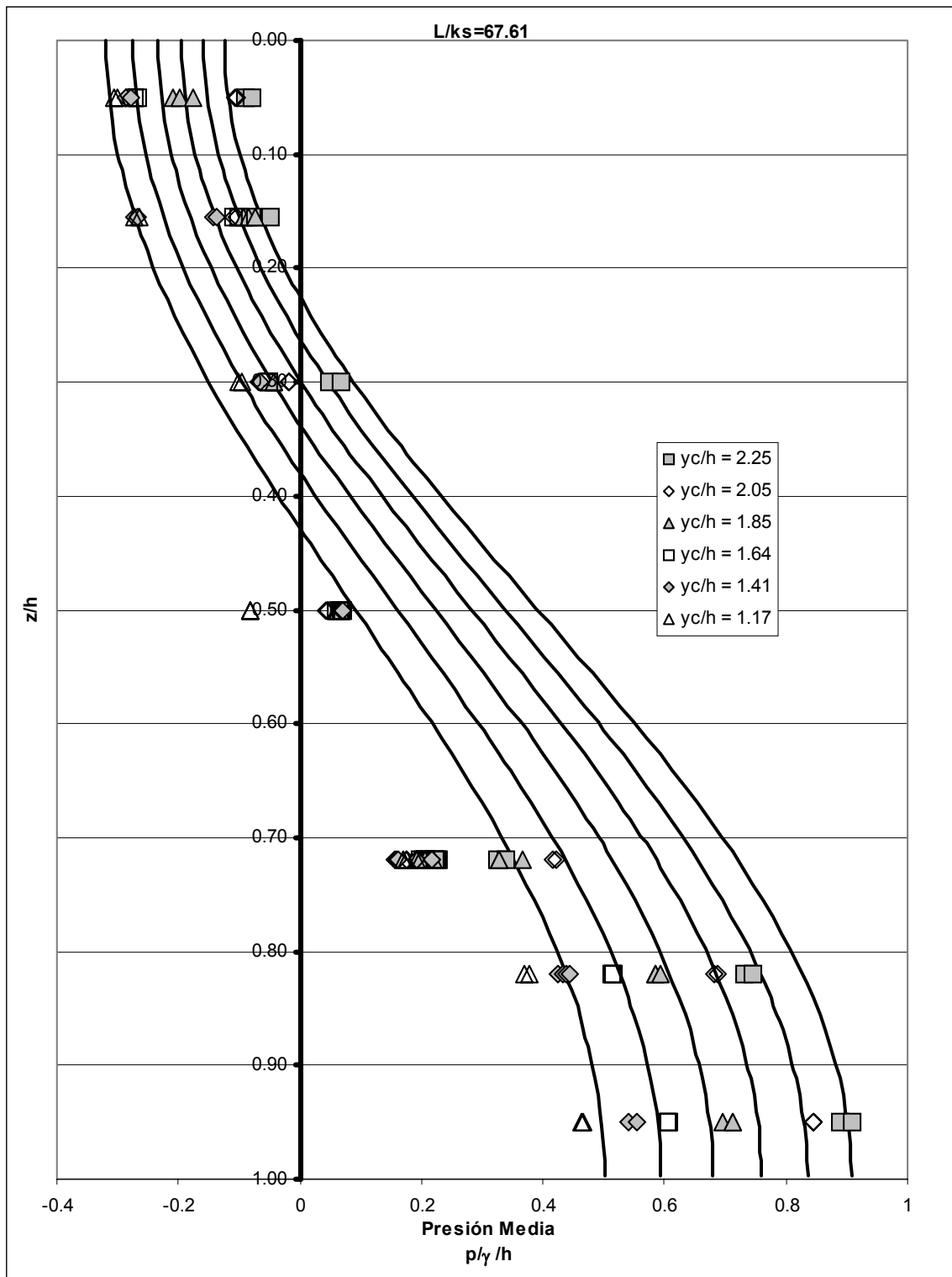


Figura 4.122. Perfiles ajustados para la presión media, en el peldaño $L/k_s = 67.61$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con los registros experimentales.

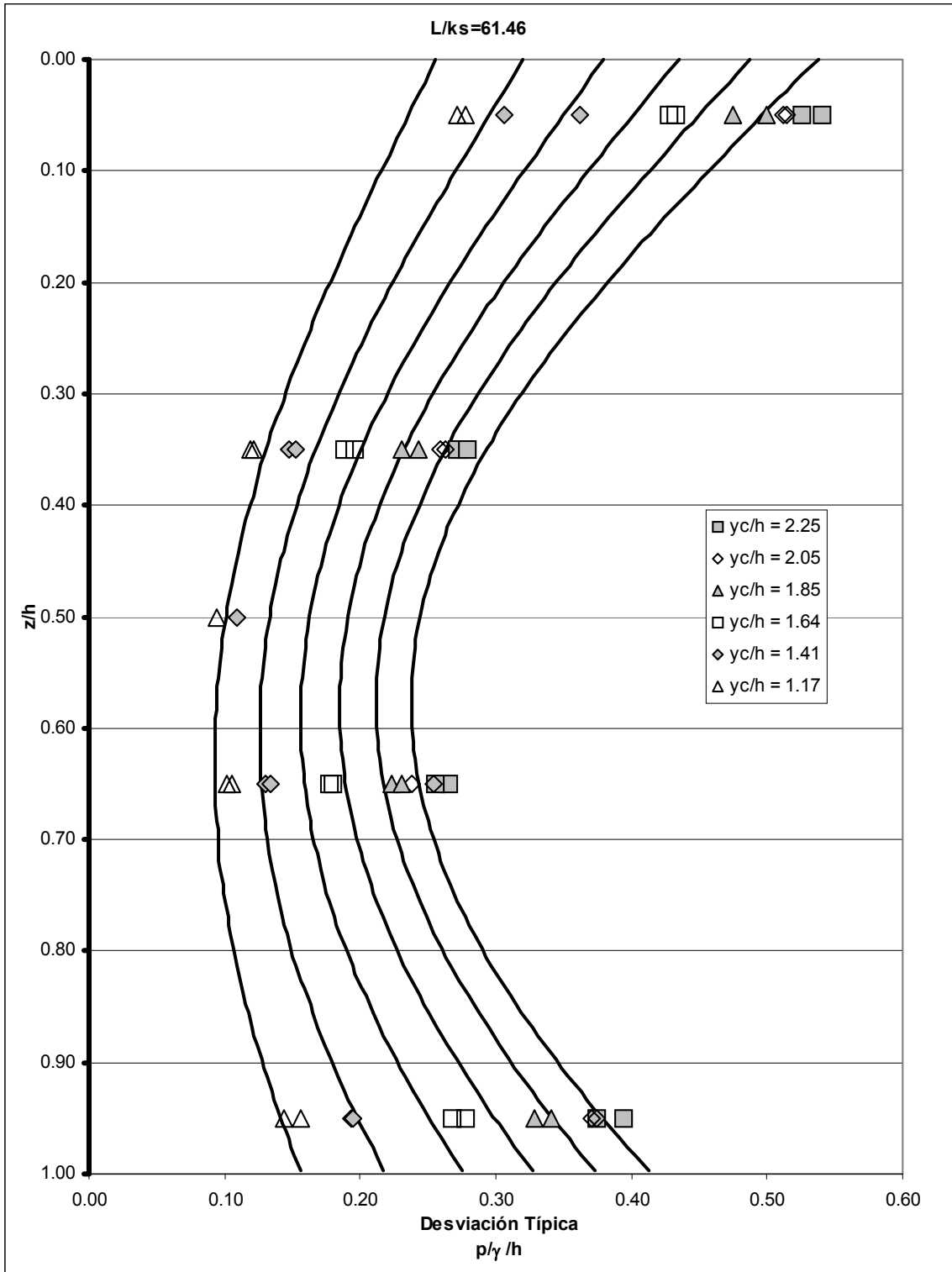


Figura 4.123. Perfiles ajustados para la desviación típica, en el peldaño $L/k_s = 61.46$ correspondiente a un ajuste senoidal. Comparación con los registros experimentales.

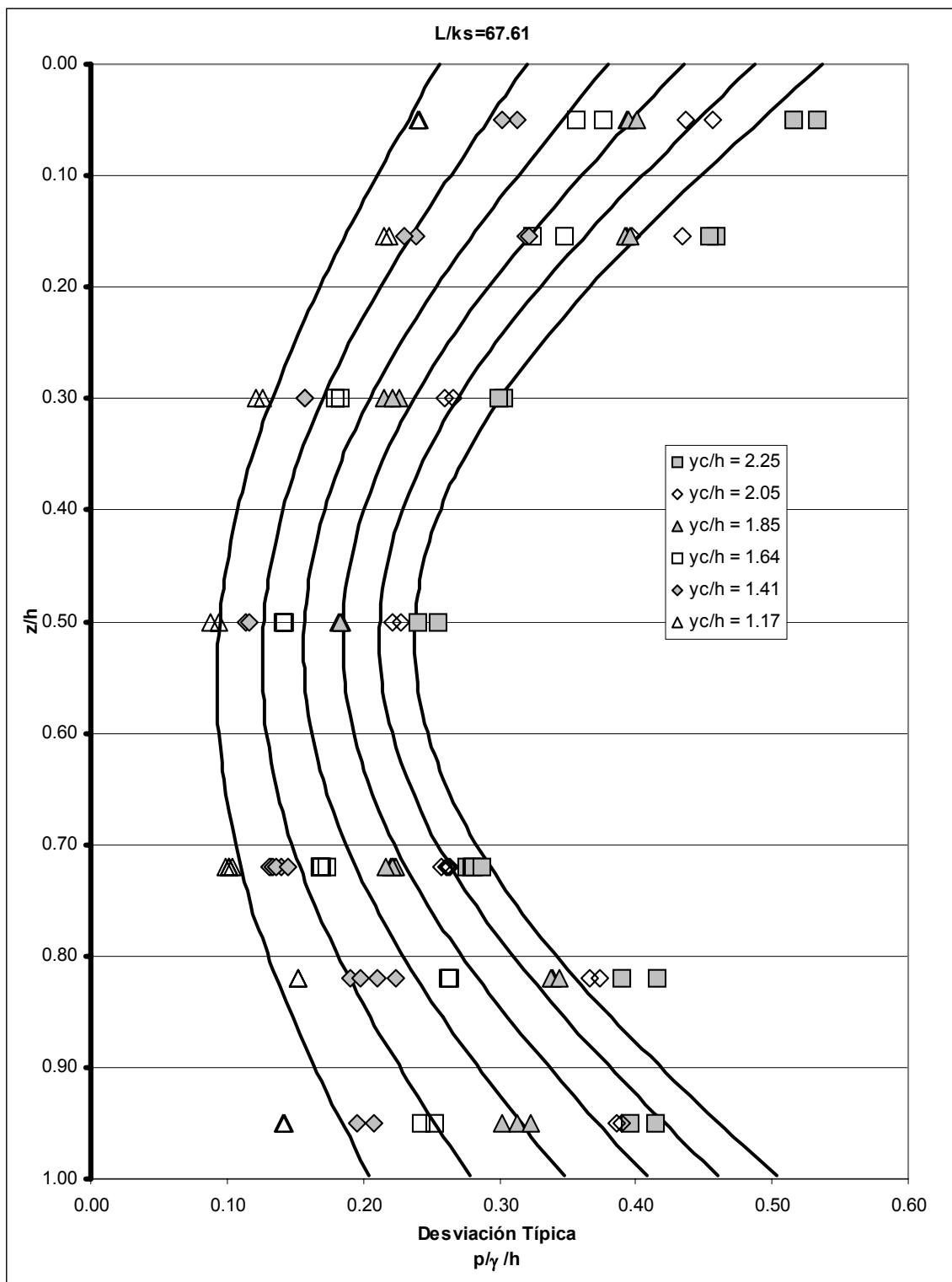


Figura 4.124. Perfiles ajustados para la desviación típica, en el peldaño $L/k_s = 67.61$ correspondiente a un ajuste senoidal. Comparación con los registros experimentales.

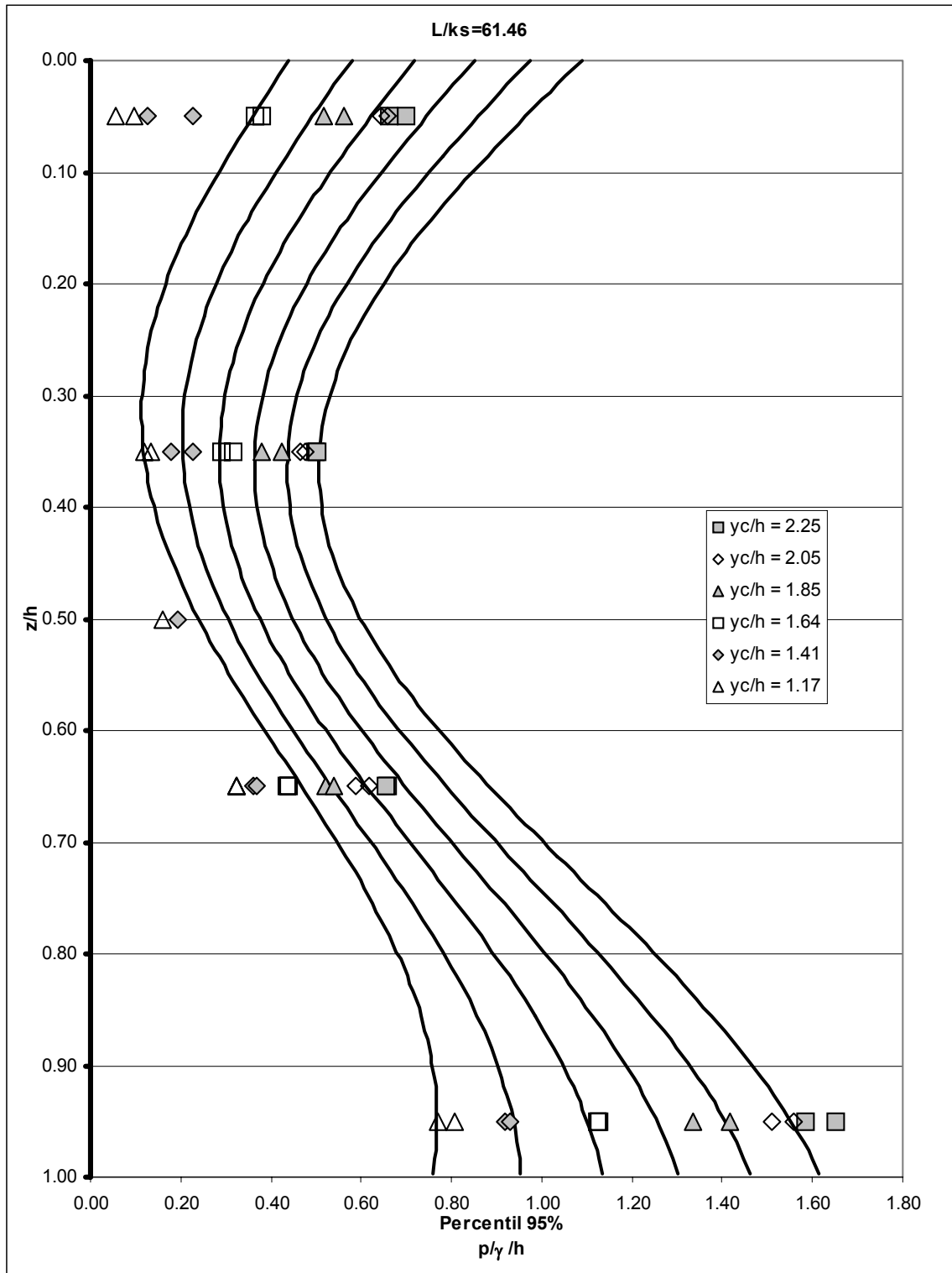


Figura 4.125. Perfiles ajustados para el percentil del 95%, en el peldaño $L/k_s = 61.46$ correspondiente a un ajuste senoidal. Comparación con los registros experimentales.

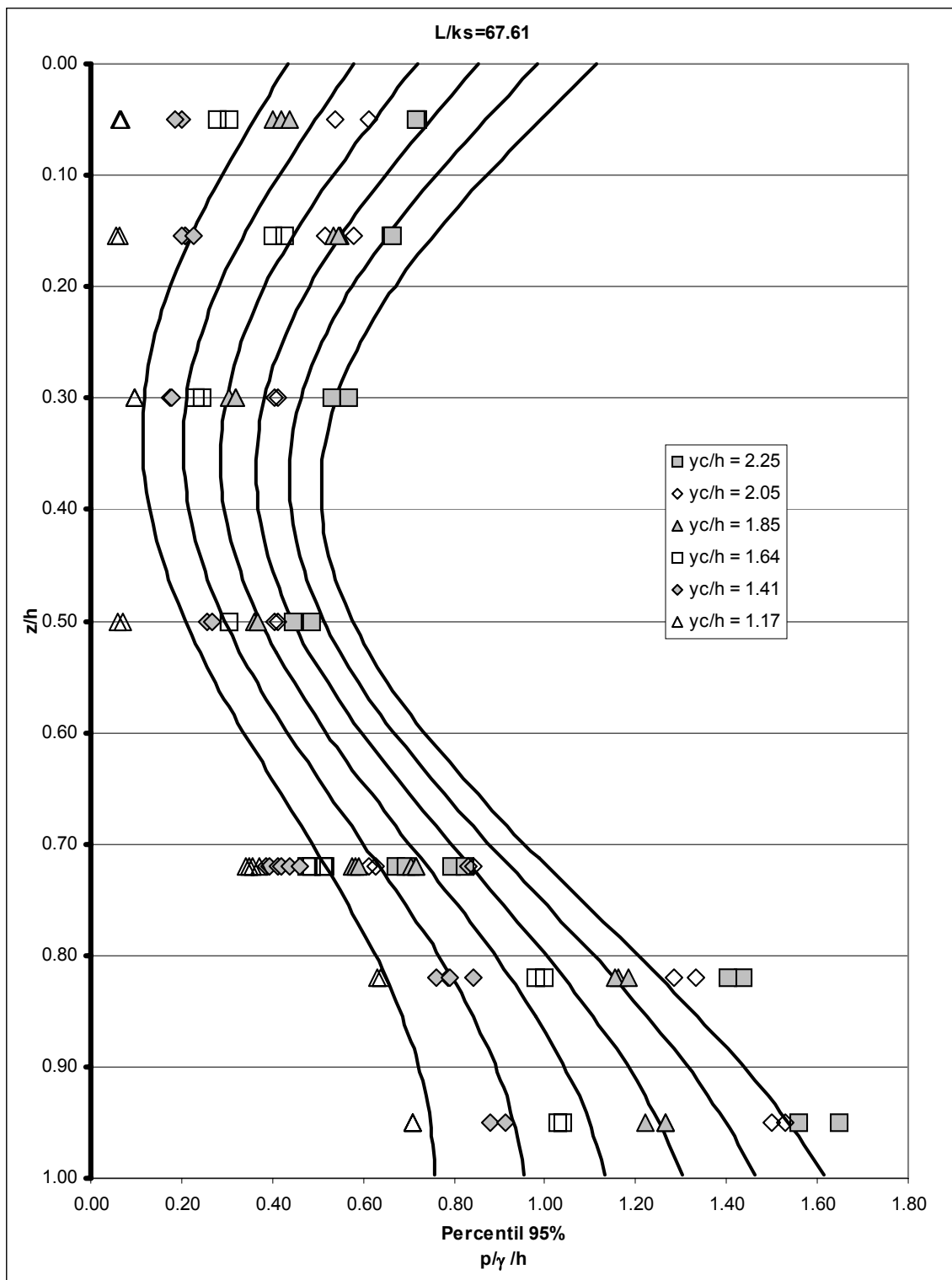


Figura 4.126. Perfiles ajustados para el percentil del 95%, en el peldaño $L/k_s = 67.61$ correspondiente a un ajuste senoidal. Comparación con los registros experimentales.

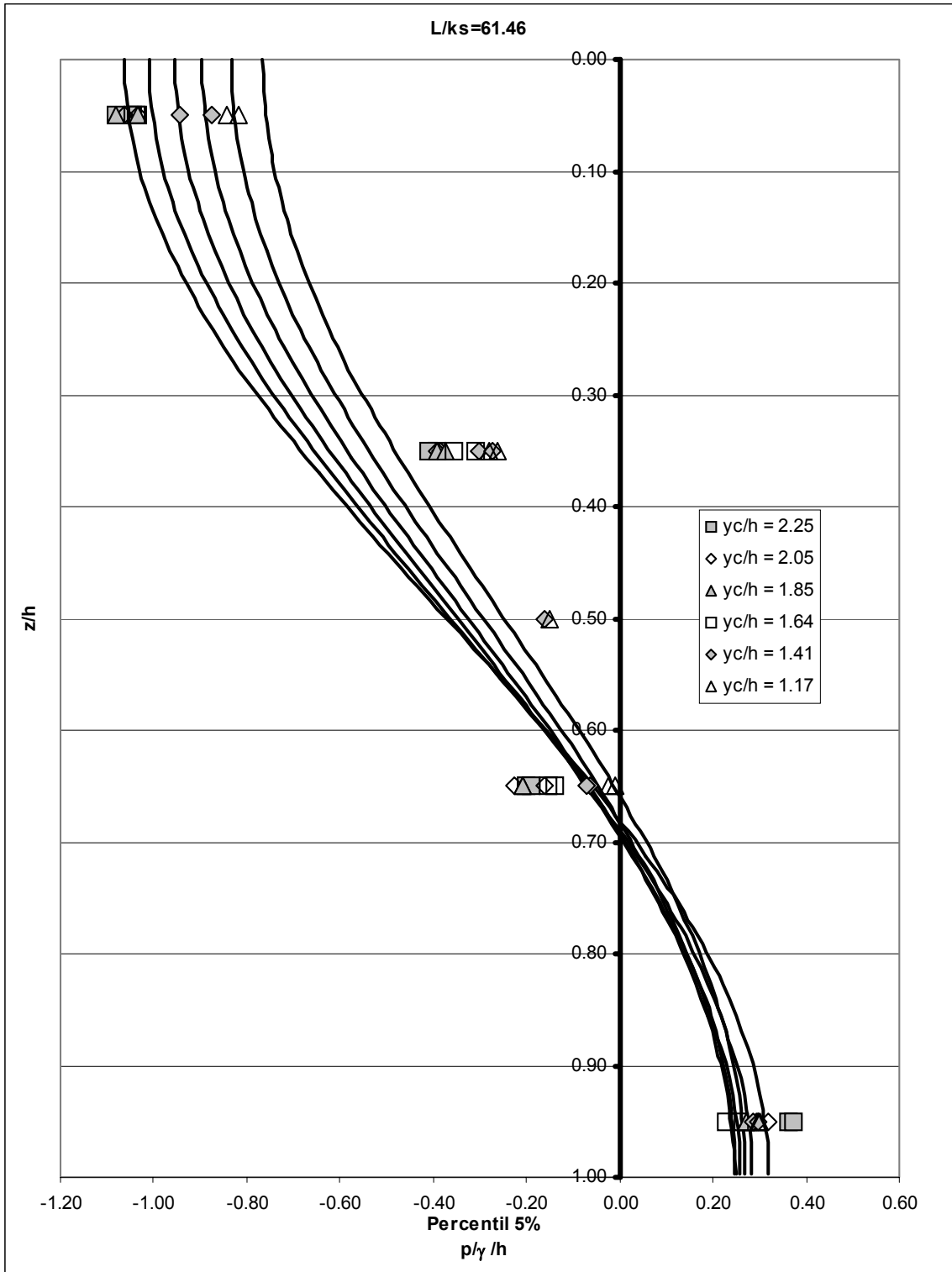


Figura 4.127. Perfiles ajustados para el percentil del 5%, en el peldaño $L/k_s = 61.46$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con los registros experimentales.

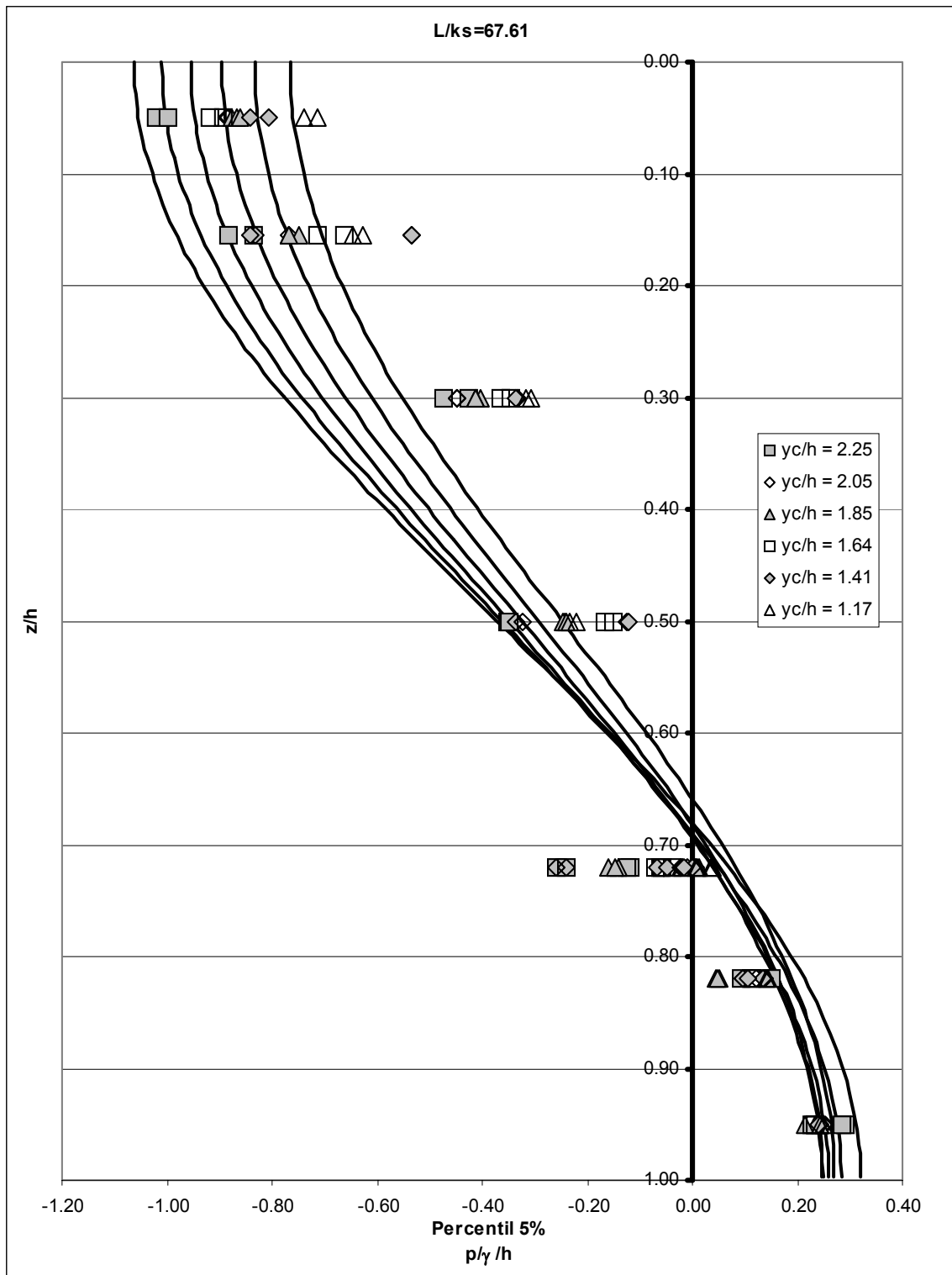


Figura 4.128. Perfiles ajustados para el percentil del 5%, en el peldaño $L/k_s = 67.61$ correspondiente a un ajuste cosenoidal. Comparación con los registros experimentales.

4.2.2.2. Resumen

Se ha analizado un modelo para la estimación de la distribución de la presión sobre la contrahuella de un peldaño de un aliviadero escalonado, con una pendiente alrededor de 1v:0.8h, funcionando en régimen rasante, plenamente establecido, para un rango de caudales $1.1 < y_c/h < 2.3$. Con dicho modelo, se caracteriza la presión que el flujo ejerce sobre las caras verticales de los peldaños, a partir de cuatro estadísticos básicos: presión media, su desviación típica y los percentiles del 95% y del 5% que permitirán estimar los valores extremos.

El desarrollo de este modelo se basa en la normalización de los estadísticos a analizar, en función de los correspondientes valores extremos, según la ecuación (4.83). De esta manera se transforman dichos estadísticos en nuevas variables dentro del rango 0 a 1.

Se propone un modelo de tipo trigonométrico (apartado 4.2.2.1): cosenoidal (expresión (4.146)) para la presión media y percentil del 5%, y senoidal (ecuación (4.147)) para la desviación típica y el percentil del 95%. El primero consta de dos parámetros y el segundo de tres. Todos ellos se determinan en la Tabla 4.26 y Tabla 4.27. El tercer coeficiente (C) del modelo senoidal, permite discernir el comportamiento de un escalón según corresponda a un valle o un pico de la onda estacionaria de presión que se establece sobre los centros de simetría de los escalones a lo largo de la rápida en régimen rasante plenamente establecido (apartado 3.2.3), así como simular la posición del mínimo relativo sobre la contrahuella, en la distribución de los estadísticos correspondientes a la desviación típica y al percentil del 95%.

En la siguiente tabla se resumen las principales características del modelo estudiado.

<i>Tabla 4.30. Características de los perfiles de presión, que se han ajustado sobre la contrahuella de un peldaño de un aliviadero escalonado.</i>
<i>Modelo Trigonométrico</i>
Presión media y percentil del 5% ajustados a un patrón cosenoidal, con dos coeficientes, mientras que la desviación típica y el percentil del 95% se ajusta mejor a un patrón senoidal de tres parámetros.
En el caso de la desviación típica y percentil del 95%, permite distinguir el comportamiento de la presión según sea un valle o un pico de la citada onda estacionaria. Ello es posible gracias al establecimiento del parámetro C según sea un escalón u otro.
Permite simular la posición de los mínimos relativos presentes en los perfiles de los estadísticos correspondientes a la desviación típica y al percentil del 95%.

5. Unificación de los modelos trigonométricos

Los modelos trigonométricos establecidos, tanto sobre la huella (ecuación (4.94), para todos los estadísticos analizados) como la contrahuella (expresión (4.146) para la presión media y el percentil del 5%, y la (4.147) para el caso de la desviación típica y el percentil del 95%), pueden reformularse con una única expresión, a saber:

$$[P_{\text{estadístico}}]_{\text{normalizado}} = A \cos\left(\xi \frac{\pi}{2C \cdot n_1} - n_2\right) + B \quad (4.160)$$

Donde los diversos parámetros dependerán, en general, de si se está analizando la huella o la contrahuella, del tipo de peldaño y del estadístico que se esté estudiando. En la Tabla 4.31 y la Tabla 4.32 se indican los respectivos valores según se esté hablando de la cara horizontal o vertical de un escalón. A partir de los valores fijados en dichas tablas se podrán obtener los valores de los estadísticos normalizados.

Tan solo quedará, pues, deshacer la normalización de las estimaciones realizadas de los estadísticos. En la Tabla 4.33 se resumen las expresiones que se propusieron en su momento para ello.

Tabla 4.31. Valores que adquieren los parámetros de la expresión (4.160) sobre las huellas de un aliviadero escalonado, en presas de HCR.

Variable ξ	n_1	n_2	A	B	Estadístico	Tipo de escalón	2C (ecuación (4.97))		
							α	β	γ
y/l	1	0	1/2	1/2	Media, Desviación típica y Percentil del 95%	Valle	-0.043	0.184	0.420
						Pico	0.013	0.074	0.474
					Percentil del 5%	Valle	-0.117	0.424	0.265
						Pico	-0.107	0.428	0.254

Tabla 4.32. Valores que adquieren los parámetros de la expresión (4.160) sobre las contrahuellas de un aliviadero escalonado, en presas de HCR.

Variable ξ	n_1	n_2	A	B	Estadístico	Tipo de escalón	2C (ecuación (4.150))		
							α	β	γ
z/h	2	$\pi/2$	-1	1	Desviación típica	Valle	0.057	-0.244	0.837
						Pico	0.053	-0.217	0.736
			$\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{4C}\right)-1}$	$\frac{-1}{\sin\left(\frac{\pi}{4C}\right)-1}$	Percentil del 95%	Valle	-0.049	0.213	0.135
						Pico	0.001	0.043	0.231
	1/2C	0	-1/2	1/2	Media y Percentil del 5%	Valle	-	-	-
						Pico	-	-	-

Tabla 4.33. Resumen de las expresiones propuestas para deshacer la normalización (expresión (4.83)) de los estadísticos.

Huella	Tabla 4.13	Página 4-59
Contrahuella	Tabla 4.29	Página 4-108

6. Presiones negativas sobre los peldaños

Un aspecto importante a tener en cuenta, vinculado a la durabilidad del hormigón con el que se ejecutan este tipo de estructuras, es el de caracterizar la existencia de presiones negativas sobre los peldaños. Ya ha sido corroborada la existencia de dichas succiones, no sólo al analizar la evolución de las presiones a lo largo del aliviadero –ver apartados 3.2.3 y 3.2.5– sino, más concretamente, cuando se han estudiado como se distribuyen las presiones sobre la huella y contrahuella de un escalón –ver apartado 4–.

6.1. Región afectada por presiones negativas

Los modelos propuestos, tanto sobre la cara horizontal como la vertical de los escalones permite analizar la región de los peldaños que puede encontrarse sometida a presiones negativas. Se consideró como criterio de partida que en los registros temporales analizados, el porcentaje de tiempo con presiones negativas sobre el total del registro debía ser, al menos, del 5% (percentil del 5%) para considerarlo significativo.

6.1.1. Huella

En la huella de los escalones el único estadístico que toma valores negativos es el percentil del 5%. En la Figura 4.94 y la Figura 4.95 se puede apreciar como la región afectada por los valores negativos depende del caudal circulante. Los puntos donde dicho percentil vale 0 (puntos de cruce de las curvas de dicho estadístico con el eje de abscisas) delimitan dicha zona.

Se buscan los puntos de la huella, $y/l \in [0,1]$, que verifiquen la relación:

$$\frac{0 - (P_{Perc5\%})_{\min}}{(P_{Perc5\%})_{\max} - (P_{Perc5\%})_{\min}} = D = \frac{1}{2} \left(\cos \left(\frac{y}{l} \frac{\pi}{2C} \right) + 1 \right) \quad (4.161)$$

Puede observarse que para un cierto caudal y_c/h las variables D y $2C$ son conocidas, a partir de las expresiones (4.92) y (4.93) (el parámetro D) y a partir de la Tabla 4.18 o la Tabla 4.31 (el parámetro $2C$). En la Figura 4.129 se muestran los límites de la región en la que se dan presiones negativas sobre las huellas de los peldaños en función del caudal circulante y del tipo de peldaño. Así, dado el caudal (i. e. $y_c/h = 2.0$) la zona de huella que estará sometida a presiones negativas corresponderá a la delimitada entre las curvas representadas en el gráfico (i. e. $y/l \in [0.469, 0.821]$ para $L/k_s = 63.51$ ó $y/l \in [0.496, 0.868]$ para $L/k_s = 66.69$).

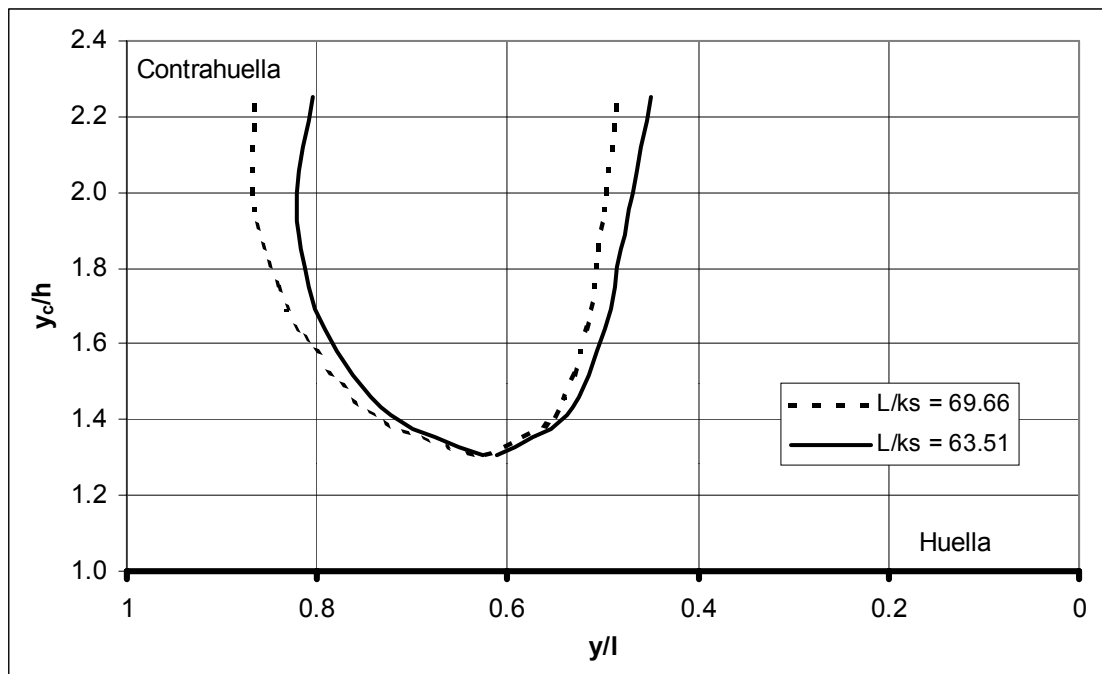


Figura 4.129. Límites de la región en la que se dan presiones negativas sobre la huella, en función del caudal y del tipo de peldaño.

Del análisis del anterior gráfico, puede concluirse que:

- La huella de los escalones se ve sometida a presiones negativas para caudales superiores a $y_c/h = 1.3$, en ambos tipos de peldaño, correspondiendo en tal caso a un pequeño entorno alrededor de $y/l \approx 0.6$, para ambos casos.
- La región afectada por dichas presiones negativas se hace tanto mayor cuanto mayor es el caudal circulante, aunque su incremento es menor para caudales elevados.
- Si bien la longitud de dichos intervalos es muy similar para ambos tipos de peldaños ensayados, en los escalones representativos de un pico de presiones ($L/k_s = 69.66$) se aprecia una ligera tendencia a desplazarse, dicha región, hacia aguas arriba de la huella.

Cabe recordar que en la Figura 4.94 y la Figura 4.95 se muestra que el valor mínimo del percentil del 5% es aproximadamente $p/\gamma h = -0.25$, dándose este valor en el entorno de $y/l = 0.6$ y para el máximo caudal estudiado $y_c/h = 2.25$.

6.1.2. Contrahuella

Puede realizarse en este caso un análisis análogo al desarrollado sobre las huellas. Sobre las contrahuellas se registraron presiones negativas en el entorno de la arista exterior, incluso para el menor de los caudales (Figura 4.127 y Figura 4.128). Lo que se buscará, pues, será la el punto sobre la contrahuella en que la distribución del percentil del 5% pase de valor negativo a positivo. Este punto definirá el intervalo $[0, z/h]$ en el cual en algún momento existirán presiones negativas. Dicho punto debe verificar la expresión:

$$\frac{0 - (P_{Perc5\%})_{\min}}{(P_{Perc5\%})_{\max} - (P_{Perc5\%})_{\min}} = D = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{z}{h} \pi \right) \right) \tag{4.162}$$

Dado un cierto caudal y_c/h , la variable D podrá determinarse utilizando las expresiones (4.158) y (4.159). En la Figura 4.130 se muestran los límites de los intervalos $[0, z/h]$ de la región en la que se dan presiones negativas sobre las contrahuellas de los escalones en función del caudal circulante. Debido a que el modelo de distribución del percentil del 5% es independiente del tipo de peldaño, se comprende que también lo será dicha región. Así, dado el caudal (i. e. $y_c/h = 2.0$) la región de la contrahuella que estará sometida a presiones negativas corresponderá a la definida entre las curvas representadas en el gráfico (i. e. $z/h \in [0, 0.691]$).

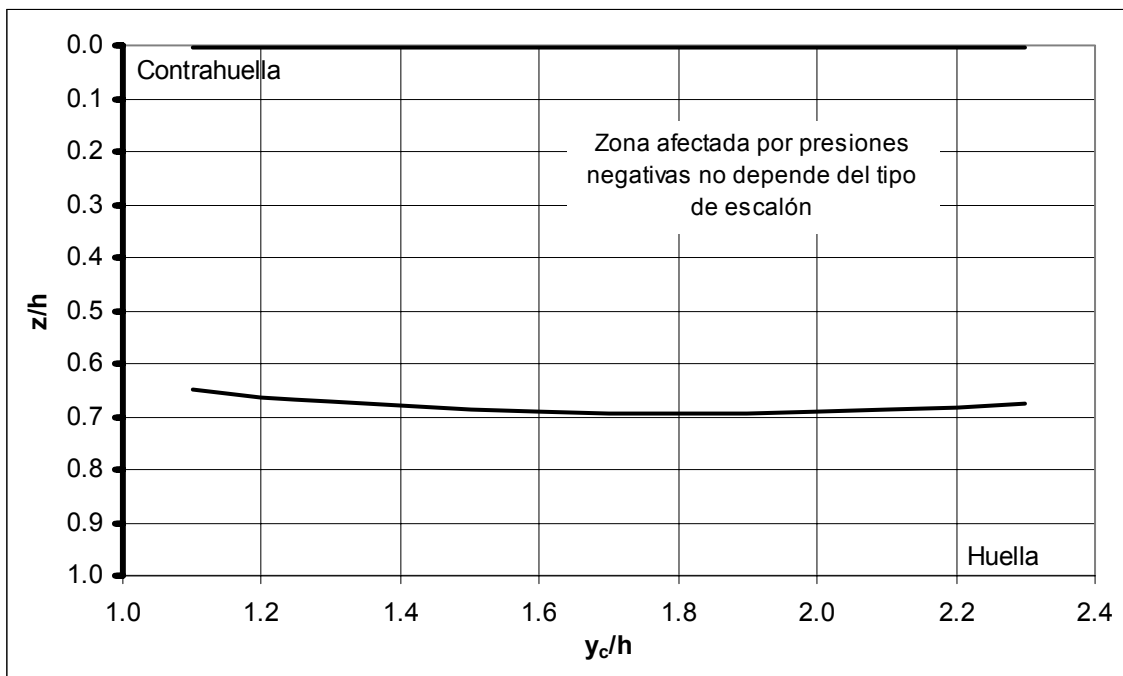


Figura 4.130. Límites de la región en la que se dan presiones negativas sobre la contrahuella, en función del caudal y del tipo de peldaño.

De la observación del anterior gráfico pueden extraerse los siguientes comentarios:

- La proporción de contrahuella sometida a presiones negativas es mayor que en las caras horizontales, quedando no afectada por dichas succiones únicamente la zona más cercana a la huella inmediatamente aguas abajo.
- La zona en cuestión es prácticamente constante con el caudal e independiente del tipo de peldaño que se pretenda analizar, quedando definida aproximadamente por el intervalo $z/h \in [0, 0.7]$.

Cabe recordar que en la Figura 4.127 y la Figura 4.128 se muestra que el mínimo valor del percentil del 5% es aproximadamente $p/\gamma h = -1.1$, dándose este valor junto a la arista exterior de la contrahuella y para el máximo caudal ensayado $y_c/h = 2.25$.

6.2. Porcentaje de tiempo con presiones negativas

Se ha analizado el porcentaje de tiempo respecto del total de duración de un registro experimental, en el que se midieron presiones negativas en cada punto de los perfiles de presión. Los resultados se muestran en los gráficos de la Figura 4.131 a la Figura 4.133. El análisis se ha llevado a cabo previamente al filtrado de los valores inferiores al 5%.

Tal y como ya ha sido descrito anteriormente, la existencia de unos vórtices en el interior de la celda delimitada por la cara vertical y horizontal de un peldaño y el flujo rasante superior, girando en sentido horario –para un observador situado en el margen derecho del aliviadero–, es una de las características más importantes del comportamiento hidráulico de este tipo de estructuras. Dichos vórtices se encuentran confinados en la celda descrita. El grado de confinamiento dependerá de su interacción con el flujo rasante superior. La movilidad de la superficie de separación entre el flujo principal y los vórtices repercute en la dinámica de los mismos: cuando dicha superficie se separa de la arista de un escalón los vórtices adyacentes tenderán a ocupar el espacio que es liberado; por el contrario cuando la tendencia del flujo principal es a aproximarse a dicha arista, ocupa una porción de la celda interior que confina con mayor intensidad los vórtices que permanentemente siguen girando. El primer caso corresponderá a caídas en la presión, mientras que el segundo a presiones mayores. Así, parece lógico pensar en que el primer proceso descrito propiciará la existencia de presiones negativas. De cualquier manera, no toda la superficie del peldaño (tanto horizontal como vertical) debe comportarse uniformemente en este sentido, como puede intuirse de los perfiles de presión estimados tanto sobre las huellas como las contrahuellas, en los que se detectaron dos regiones de comportamiento bien diferenciado, como se ha mostrado en el anterior apartado 4.2.

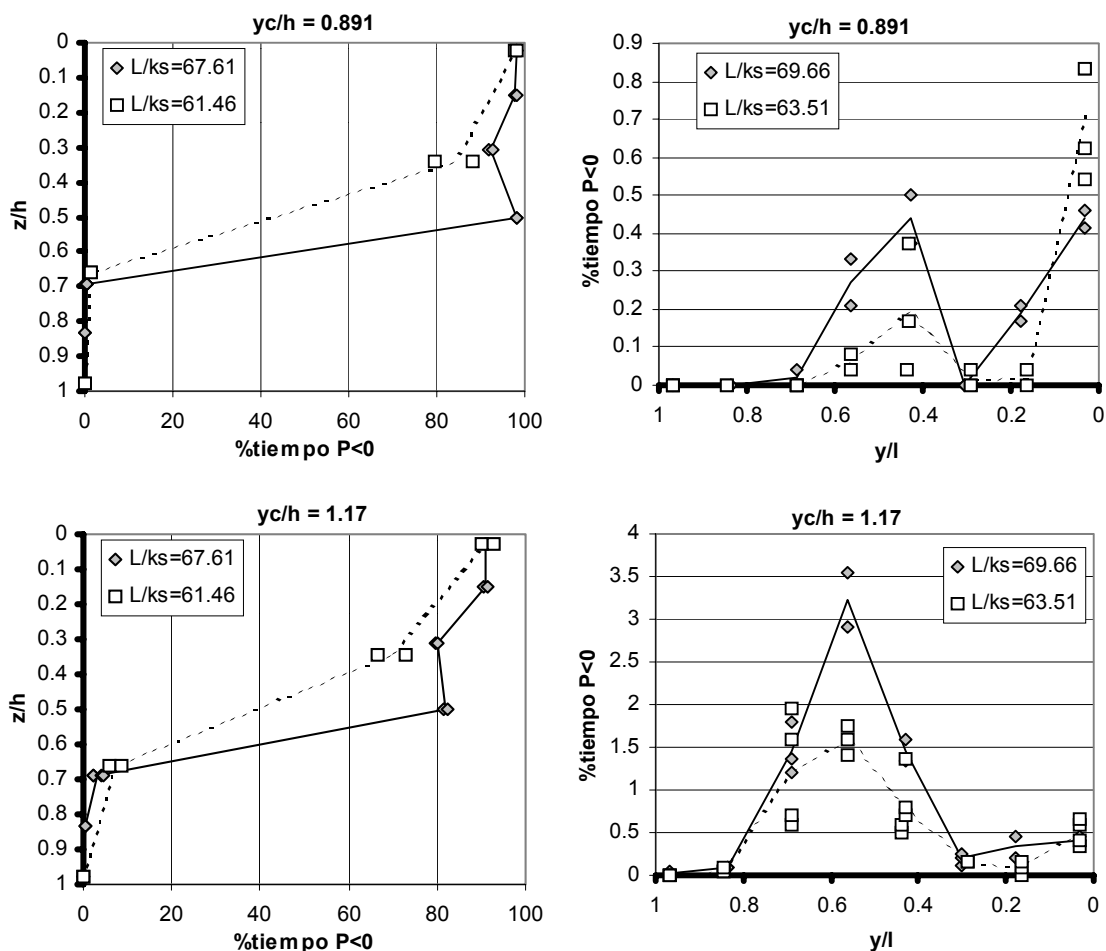


Figura 4.131. Distribución del % del tiempo que la presión es negativa sobre la huella y contrahuella de dos peldaños distintos.

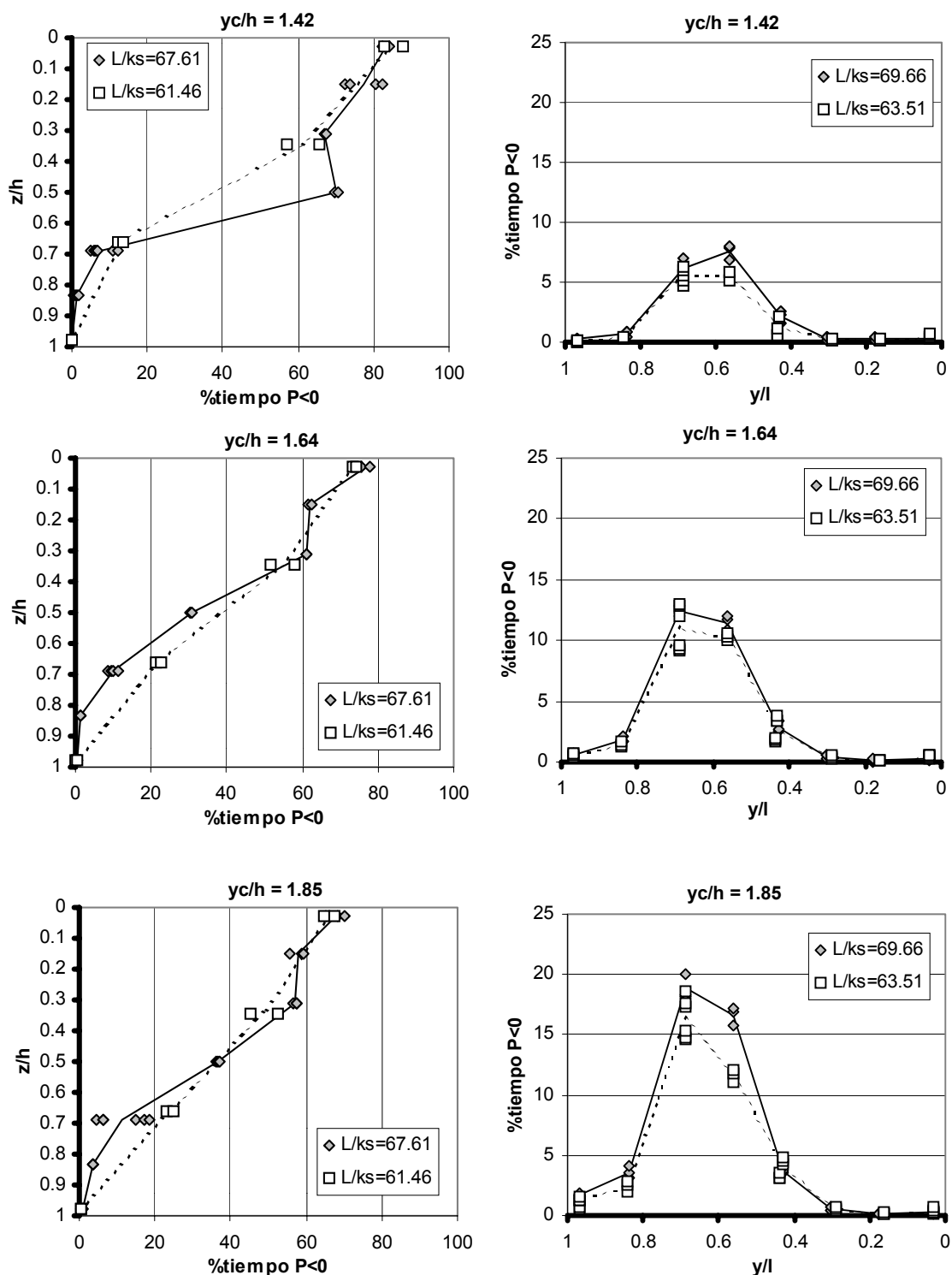


Figura 4.132. Distribución del % del tiempo que la presión es negativa sobre la huella y contrahuella de dos peldaños distintos.

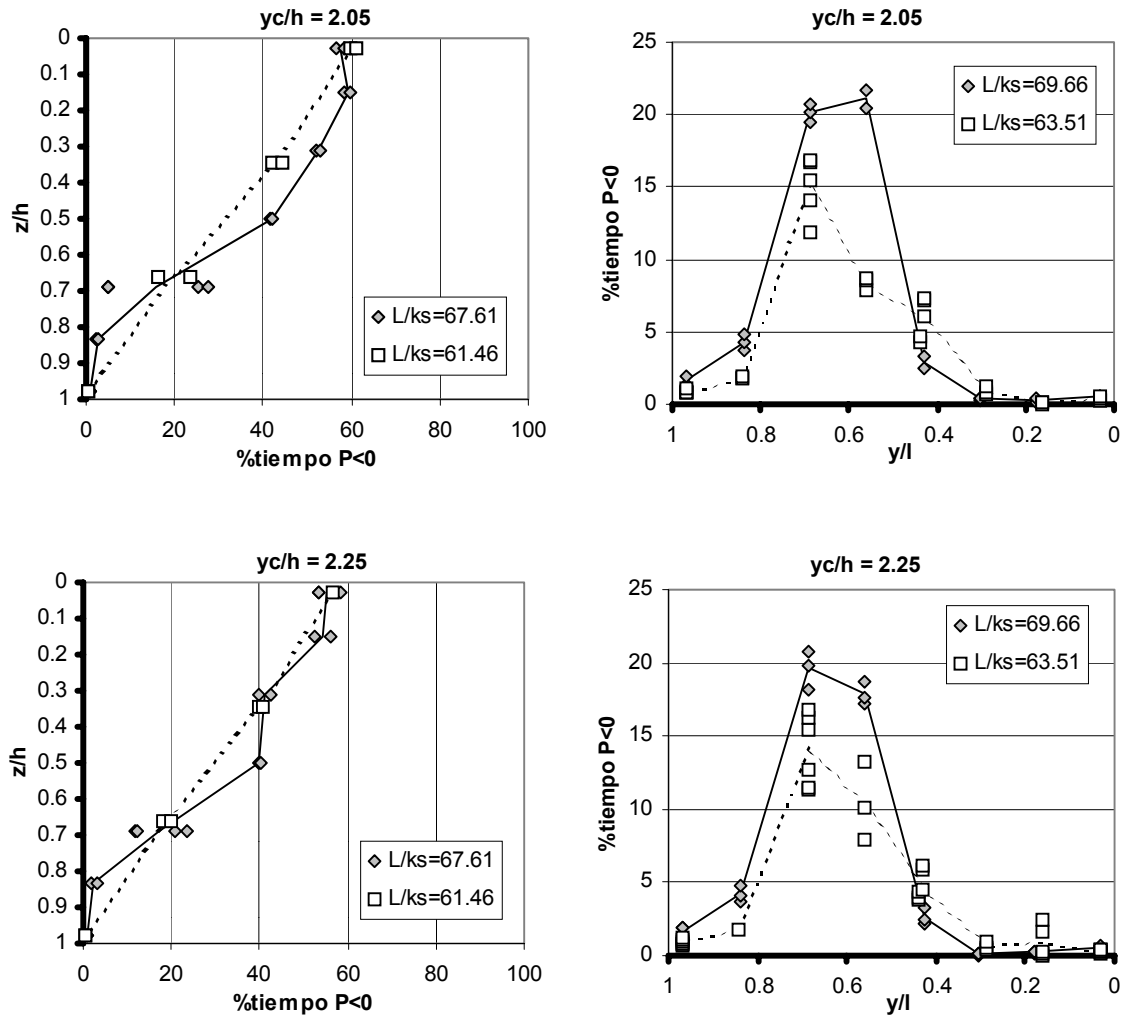


Figura 4.133. Distribución del % del tiempo que la presión es negativa sobre la huella y contrahuella de dos peldaños distintos.

De la observación de los anteriores gráficos puede apreciarse que:

- Sobre la contrahuella el porcentaje de tiempo con presiones negativas muestra una cierta tendencia a disminuir al aumentar el caudal. Igualmente, es interesante destacar los elevados porcentajes de tiempo en que la presión es negativa.
- Sobre la huella en cambio, se percibe que el porcentaje de tiempo con presiones negativas aumenta al aumentar el caudal circulante. Son de destacar los bajos porcentajes de tiempo en que se dan dichas succiones. Así, para los dos menores caudales analizados ($y_c/h = 0.891$ e $y_c/h = 1.17$) el porcentaje de tiempo con presiones negativas no es significativo (inferior al 5%).
- En general, la huella y contrahuella correspondientes a un peldaño situado en un máximo de la onda estacionaria de presión presentan un mayor porcentaje de tiempo sometidas a presiones negativas que en el caso de un peldaño situado en un mínimo de dicha onda.
- Para caudales bajos, próximos o algo inferiores al valor mínimo que asegura la presencia del flujo rasante, las características del campo de presiones son diferentes a las propias del flujo rasante. En el apartado 4.2.1.1 ya se puso en evidencia que el caudal $y_c/h = 0.891$ presenta este comportamiento diferenciado. Observamos que este mismo caudal, Figura 4.131, también muestra un comportamiento singular cuando se estudia la persistencia temporal de presiones negativas sobre la huella. La mayor presencia relativa de presiones negativas en el extremo aguas abajo de la huella puede estar vinculada al impacto de la lámina aguas arriba de dicha zona (fenómeno propio del flujo no rasante) y la presencia de un flujo de elevada velocidad aguas abajo. Es este flujo de alta velocidad el posible causante de la mencionada presencia de presiones negativas.

7. Discusión de los resultados

7.1. Evolución de la presión a lo largo del aliviadero

Tal como fue discutido en el apartado 5 del estado del conocimiento, en la bibliografía consultada únicamente los trabajos de CEMAGREF (1991), Tozzi (1992) y Iwao Ohtsu et al. (1997) presentan medidas a lo largo del vertedero. A continuación se comentan los resultados de dichos autores, adaptándolos para una mejor comparación con los obtenidos en el presente trabajo.

7.1.1. Comparación con los resultados de Tozzi (1992)

Tozzi (1992) lleva a cabo dos series de medidas mediante piezómetros simples sobre el eje de simetría, en un punto ubicado a 4 mm de la arista exterior del modelo tanto sobre la huella como la contrahuella. En la Tabla 1.10 del capítulo 1 se muestran dichos puntos de medida, y en los gráficos de la Figura 1.45 del mismo capítulo 1 los resultados obtenidos en dicho trabajo.

A pesar de que la tendencia natural a mostrar mayores presiones cuanto mayor sea el caudal circulante es respetada por los resultados de Tozzi, se observarán ciertas diferencias respecto los resultados mostrados en la presente investigación, que se intentarán justificar.

En primer lugar, apréciase como, en cualquiera de los mencionados gráficos de la Figura 1.45 del capítulo 1, es difícil concluir un claro comportamiento ondulante de la evolución de la presión a lo largo del aliviadero. Ello puede ser debido a que los escalones en los que se llevaron a cabo las medidas no eran, por lo general, escalones contiguos sino que, en el modelo con la menor altura de escalón ($h = 1.67 \text{ cm}$), éstos llegaban a estar separados hasta por 20 escalones. A pesar de ello, un aspecto que sí parece evidente a la vista de los resultados, es que en ningún caso se observa tendencia a la estabilización de las presiones a lo largo de la rápida.

Otro aspecto interesante a destacar es el distinto comportamiento de las presiones en la zona no aireada. En esta zona los valores que se muestran son sensiblemente inferiores a los que aparecen hacia aguas abajo, en contra de lo obtenido en esta tesis. Más aún, es en la zona completamente aireada, y hacia abajo de la misma, en donde puede distinguirse una cierta tendencia al aumento de las presiones. Este comportamiento podría ser debido a efectos de escala, puesto que todos los puntos que presenta para valores de L/k_s superiores a 150 (ver la Tabla 1.10 del estado del conocimiento y la Figura 1.45 del mismo capítulo 1) corresponden a las medidas realizadas sobre un modelo con escalones de altura (h) 1.67 cm, por lo que el tamaño de los piezómetros utilizados relativo al del escalón será muy distinto al de los otros tres modelos con peldaños de alturas 3.33 cm, 5 cm y 10 cm, con lo que se entiende que el comportamiento de los Piezómetros, sobre todo en el modelo de escalones más pequeños, debió ser sensiblemente distinto al de los otros casos.

Mención a parte merecen los resultados mostrados por Tozzi sobre las contrahuellas de los escalones. En ellas, la posición que deben adquirir los tubos piezométricos hace que una succión sobre el punto de medida, por pequeña que sea, provocara el descebado del tubo con la aparición de burbujas de aire que podrían invalidar la lectura del piezómetro. Éste, aparte del efecto de escala citado en el párrafo anterior, podría ser el motivo del comportamiento un tanto caótico de dichas medidas sobre la contrahuella.

7.1.2. Comparación con los resultados de CEMAGREF (1991)

En CEMAGREF (1991), las medidas de presiones que se muestran corresponden a tomas sobre el centro de simetría de los peldaños, tanto en las huellas como las contrahuellas, llevadas a cabo mediante sensores de tipo piezorresistivo de 19 mm de diámetro, con un rango de medida de -1000 mm a $+1000 \text{ mm}$, con un error del 0.2% del fondo de escala, y una frecuencia de adquisición de 25 muestras por segundo. De esta manera se comprende que los resultados plasmados en el citado trabajo deben ser directamente comparables con los obtenidos en esta investigación.

En los gráficos de la Figura 4.134 a la Figura 4.139 se muestran los resultados de las medidas llevadas a cabo por CEMAGREF (1991) comparados con los obtenidos en el presente trabajo. Los tres primeros (Figura 4.134 a la Figura 4.136) corresponden a las medidas en el centro de simetría de las huellas mientras que los tres últimos (Figura 4.137 a la Figura 4.139) muestran las pertinentes comparaciones entre los registros obtenidos en el centro de simetría de las contrahuellas.

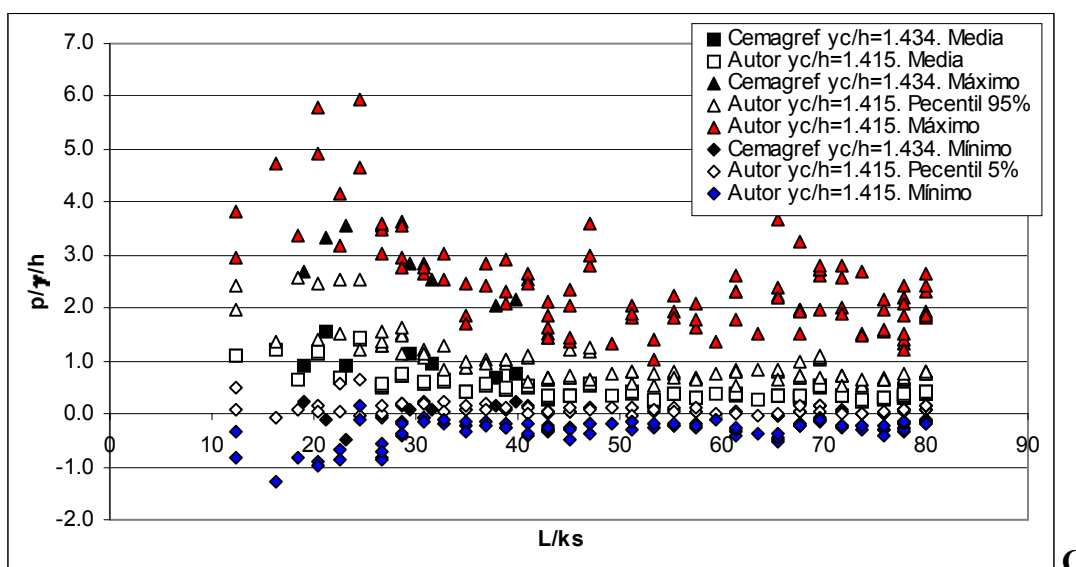
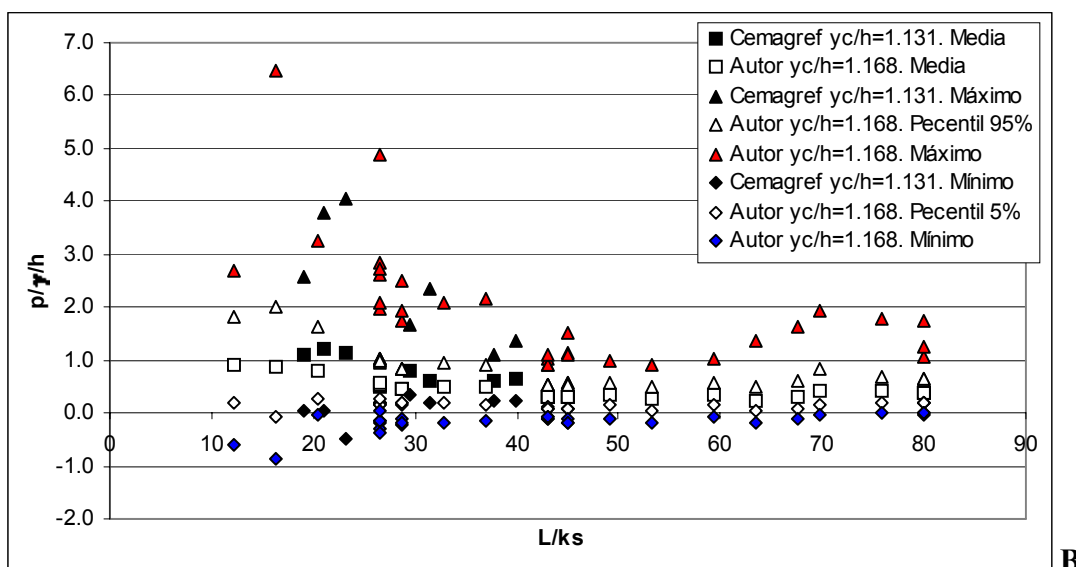
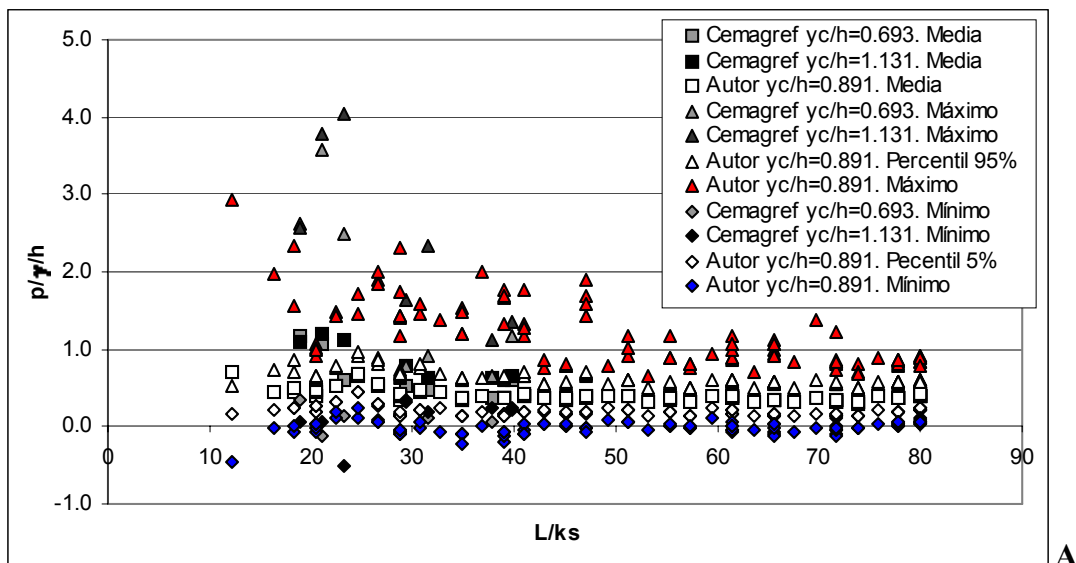


Figura 4.134. Comparación con los resultados mostrados en CEMAGREF (1991). Punto de medida: centro de simetría de la huella.

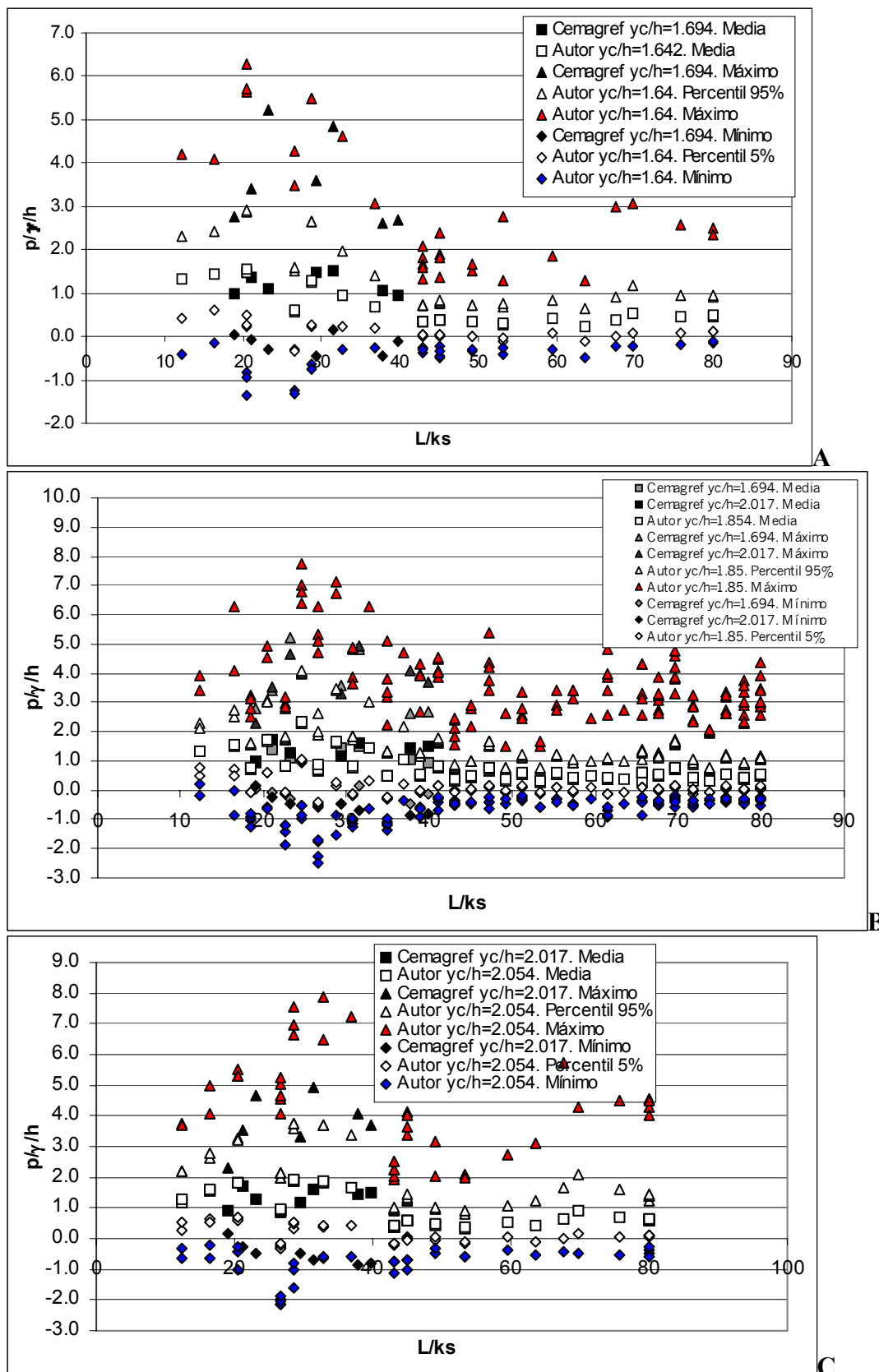


Figura 4.135. Comparación con los resultados mostrados en CEMAGREF (1991). Punto de medida: centro de simetría de la huella.

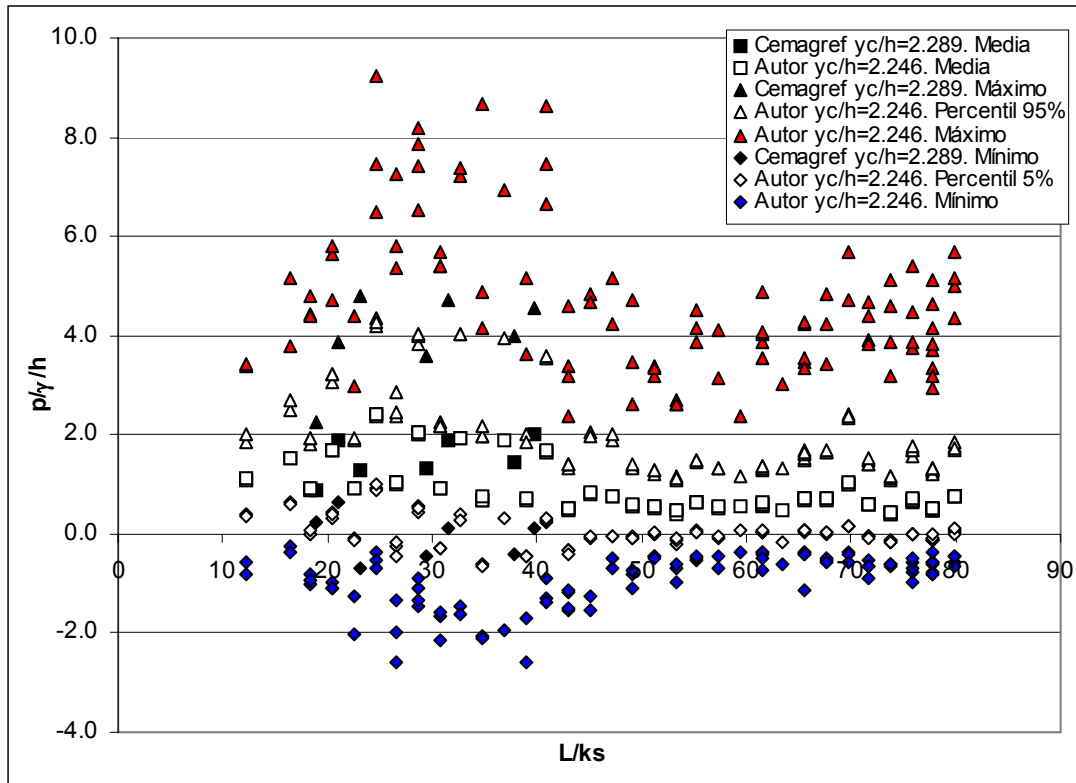


Figura 4.136. Comparación con los resultados mostrados en CEMAGREF (1991). Punto de medida: centro de simetría de la huella.

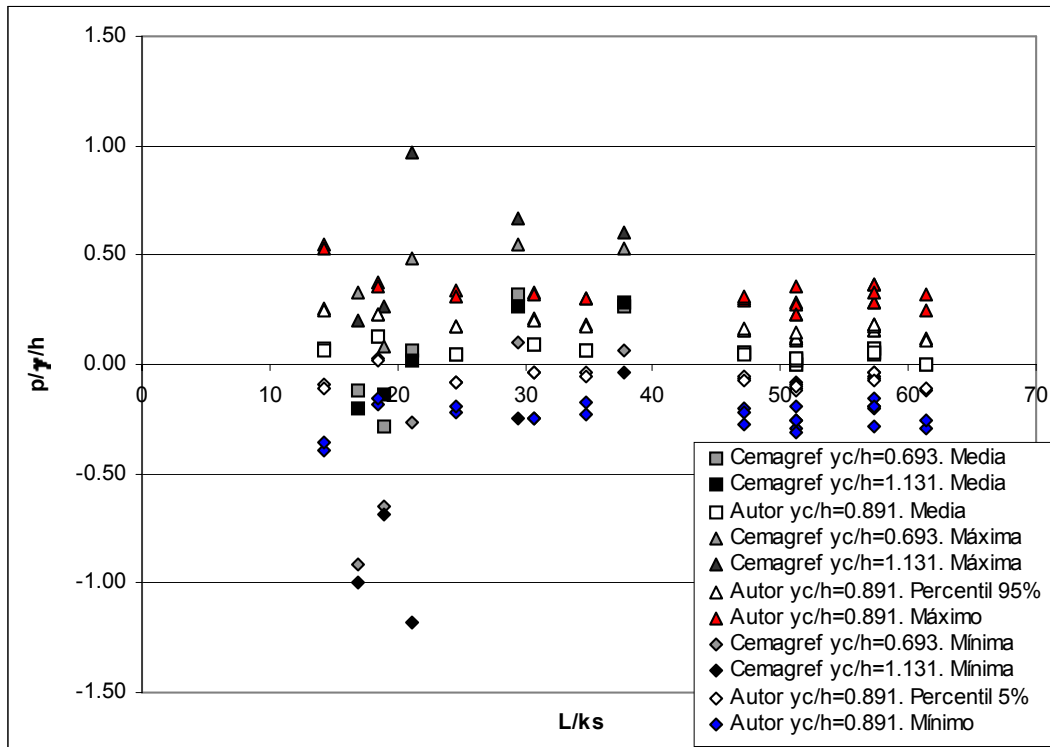


Figura 4.137. Comparación con los resultados mostrados en CEMAGREF (1991). Punto de medida: centro de simetría de la contrahuella.

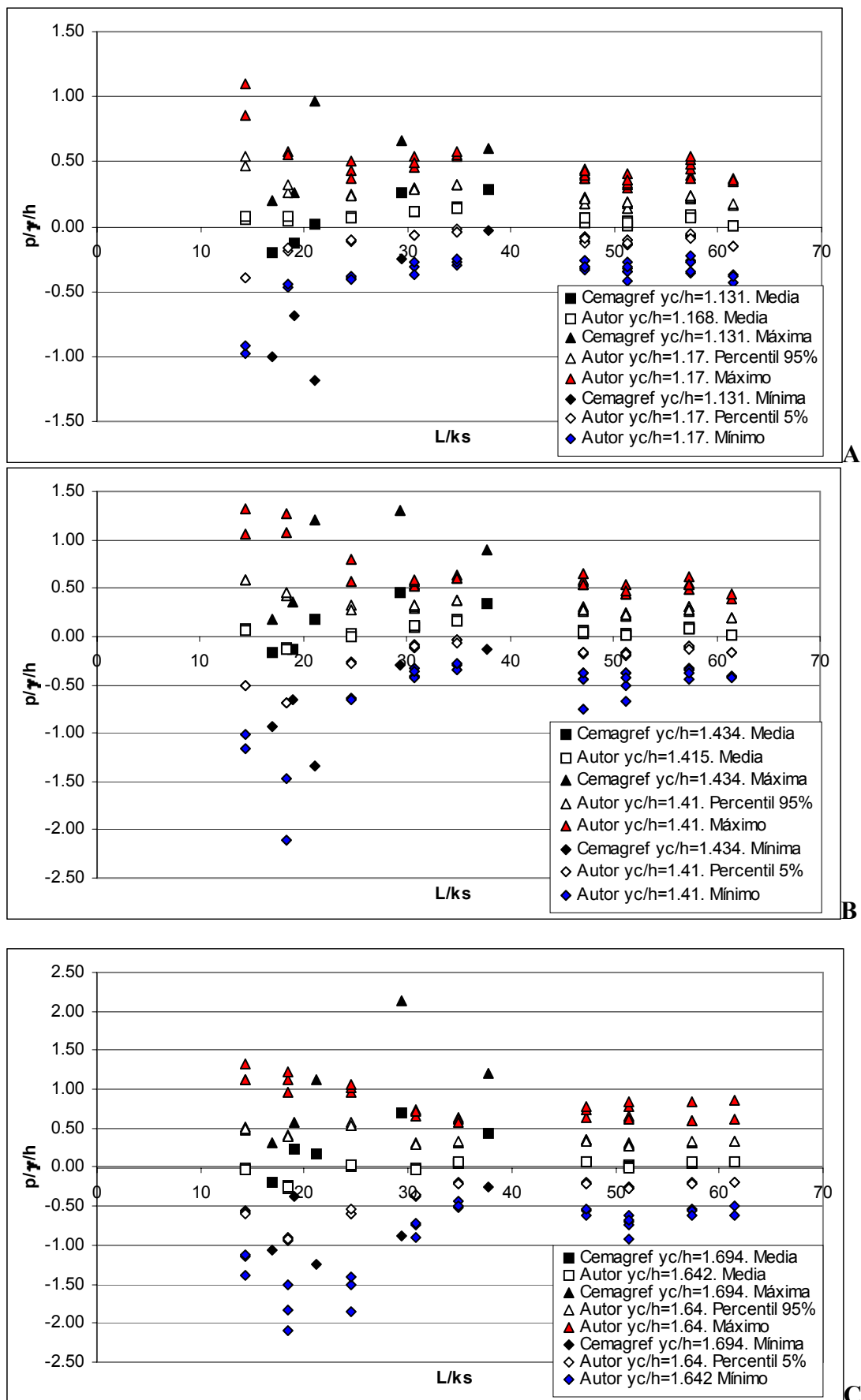


Figura 4.138. Comparación con los resultados mostrados en CEMAGREF (1991). Punto de medida: centro de simetría de la contrahuella.

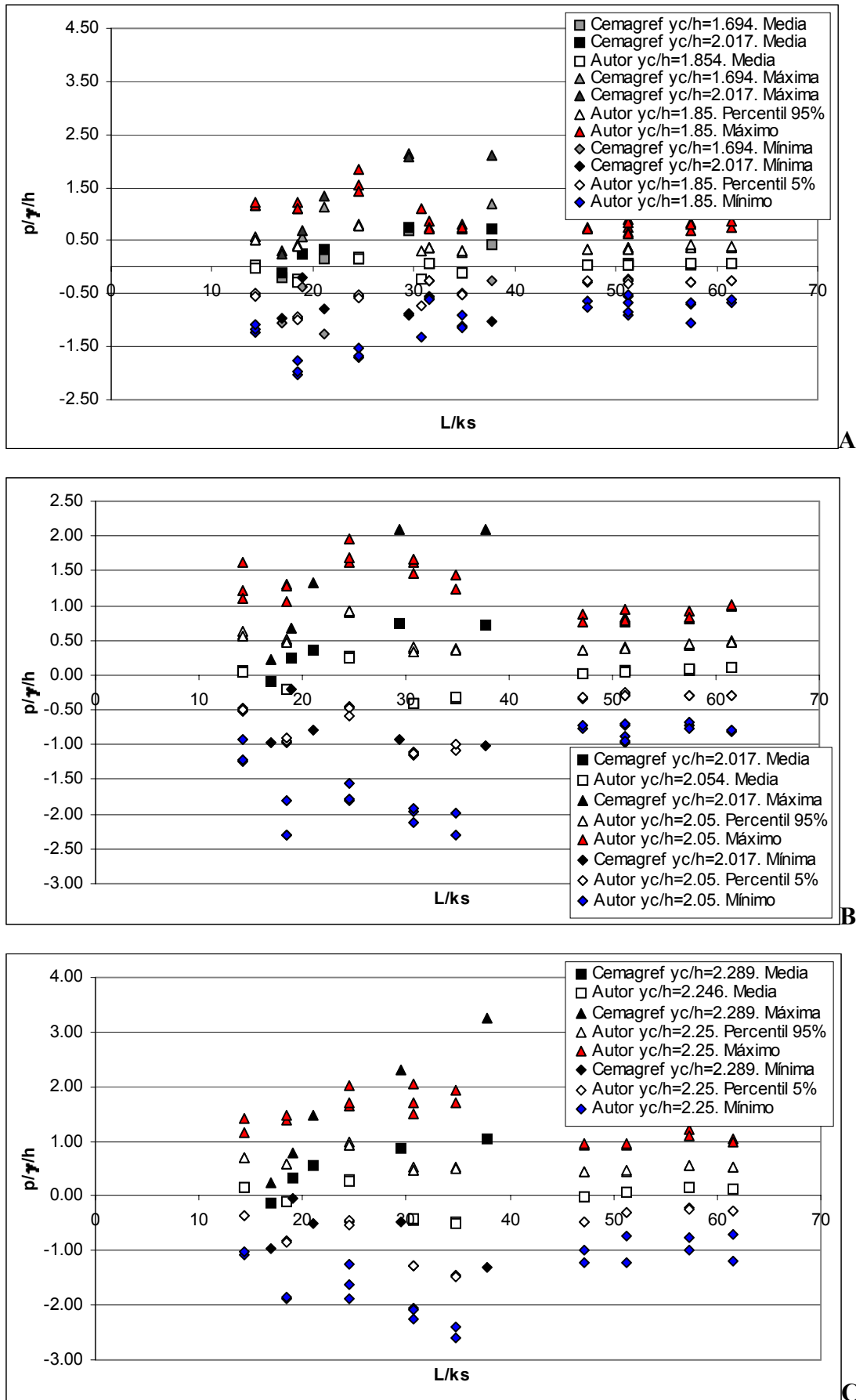


Figura 4.139. Comparación con los resultados mostrados en CEMAGREF (1991). Punto de medida: centro de simetría de la contrahuella.

El modelo sobre el que CEMAGREF estima las presiones presenta una altura de 1.04 m sobre su pié, con una transición lisa según un típico perfil Bradley y 12 escalones idénticos de 0.060 m, lo que fija el rango de L/k_s entre 19 y 40 en las huellas y entre 17 y 38 en las contrahuellas. Ello establece la primera diferencia importante con el modelo desarrollado en esta investigación, en la que se han presentado medidas para L/k_s entre 10 y 80. Este aspecto es muy importante pues, para caudales elevados –por encima de y_c/h igual a 1.64–, CEMAGREF dispone de no más de tres puntos de medida aguas abajo del punto de inicio de aguas blancas, con los que no será factible analizar la posible tendencia al flujo ondulante estacionario hacia aguas abajo del aliviadero.

De cualquier manera, es interesante destacar que sobre las huellas, al comparar el comportamiento de los registros realizados en ambos estudios, se observa que las presiones medias muestran valores parecidos. En la zona de aguas blancas se confirman también las presiones elevadas y el carácter oscilatorio, a lo largo de la rápida, de las mismas. Si además se analizan las presiones máximas y mínimas de CEMAGREF (1991), destaca el hecho de que se mantiene el comportamiento oscilatorio y se mueven entre los valores máximos y los percentiles del 95%, y los mínimos y los percentiles del 5% respectivamente, presentados anteriormente en este trabajo.

Si, por otro lado, se comparan los resultados obtenidos sobre la contrahuella, CEMAGREF (1991) muestra para las presiones medias y las máximas, valores crecientes hacia aguas abajo, mientras que las mínimas presiones presentan valores decrecientes en el mismo sentido (crecientes en valor absoluto). Todo ello frente a un comportamiento oscilante a lo largo de la rápida. Se observará como los valores de dichos extremos –sobre todo en cuánto a las presiones mínimas– presentados por CEMAGREF (1991) son similares a los presentados en esta tesis.

7.1.3. Comparación con los resultados de Iwao Ohtsu et al. (1997)

En Iwao Ohtsu et al. (1997) se presentan también medidas sobre la arista exterior de los peldaños a lo largo de los modelos ensayados.

Tal y como ha sido ya indicado en el apartado 5.1 del capítulo 1, no se dispone de suficiente información acerca de como fueron obtenidas dichas medidas, ni de las características geométricas de sus modelos reducidos, para poder comparar de una manera directa sus resultados con los presentados anteriormente por el autor. A pesar de ello, si se observa el comportamiento de los resultados de Iwao Ohtsu et al. (1997) que se ha plasmado en la Figura 1.46 del capítulo 1, podrán percibirse algunas coincidencias interesantes:

- Los escalones más aguas arriba (zona no aireada o no completamente aireada) reflejan presiones mayores que los peldaños situados más aguas abajo. Este fenómeno se apreció también en los resultados de CEMAGREF (1991) del apartado 7.1.2 anterior.
- Una vez se ha establecido el flujo completamente desarrollado (zona de aguas blancas), las presiones pasan a mostrar un comportamiento oscilante que puede estar mostrando la irregularidad de la superficie de separación entre el flujo rasante principal y el vórtice interior.

7.2. Perfiles de presión sobre los escalones

En el estado del conocimiento se han detallado los resultados obtenidos por diversos autores que han trabajado esta cuestión. Las referencias en las que se muestran dichos trabajos son: Tozzi (1992), Elviro (1993) y Frizell (1991a, 1991b y 1992).

7.2.1. Comparación con los resultados de Frizell (1991a, 1991b y 1992)

Las medidas presentadas por Frizell y que pueden analizarse en la Figura 1.47 del capítulo 1 corresponden a una rápida de pendiente 1v:2h. Se analizan dos casos, el primero sobre escalones con su huella horizontal y el segundo con su huella inclinada 15° hacia aguas abajo respecto la horizontal. Si además se tiene en cuenta que los resultados corresponden a un caudal muy superior ($y_c/h = 6.37$) a los ensayados por el autor (hasta $y_c/h = 2.25$), se comprenderá que en este caso tan sólo se buscará una comparación de tendencias en los resultados.

Así en los resultados de Frizell se observan las mismas dos regiones que se han descrito en el anterior apartado 4.2.1 del presente capítulo, aproximadamente la mitad exterior del peldaño correspondiente a una zona de impacto del flujo y por tanto de presiones mayores que en la mitad interior del mismo que corresponde a una zona de separación del vórtice atrapado por el contorno.

Las principales diferencias estriban en dos aspectos a destacar:

- Los resultados de Frizell no presentan presiones negativas significativas en la parte interior del peldaño. Este fenómeno podría estar indicando la existencia de unos vórtices, atrapados entre el peldaño y el flujo rasante superior, girando con una intensidad menor que la que presentan en un aliviadero con mayor pendiente.
- Por otro lado, la zona más próxima a la arista exterior muestra una caída brusca de la presión, hecho que sólo se constata en los resultados obtenidos por el autor para los caudales mayores, pero en absoluto tan bruscamente. Este hecho debe corresponder al efecto que provoca sobre el flujo unos escalones con la huella el doble de larga que la contrahuella, a diferencia de la relación existente en el presente trabajo en la que la cara vertical de los peldaños es 1.25 veces la longitud de la horizontal. En el primer caso la zona de impacto sobre la huella del flujo rasante principal se produce algo más adentro de la huella que en el segundo caso, provocando acto seguido una separación del flujo en la propia cara horizontal del peldaño, traduciéndose este fenómeno en la caída brusca de la presión en la zona próxima a la arista. Cuando la huella es más corta que la cara vertical (como es el caso estudiado en esta tesis) el flujo rasante no dispone de tanta longitud para manifestar dicho efecto y la caída no se producirá de una, manera tan abrupta.

7.2.2. Comparación con los resultados de Tozzi (1992)

Tozzi (1992) también estimó como se distribuye la presión sobre la contrahuella de dos escalones. Estas medidas las llevó a cabo mediante la utilización de transductores de presión.

Se ha procedido a comparar sus resultados con los mostrados en este trabajo, teniendo en cuenta que:

- Tozzi mide los perfiles de presión en las contrahuellas de escalones situados en posiciones muy diferentes a las analizadas en este trabajo. Al disponer de una estructura de tamaño mayor que las utilizadas por Tozzi, se creyó conveniente medir dichos perfiles sobre dos escalones situados más aguas abajo que los utilizados por el citado autor, a fin de que se encontraran en una zona donde el flujo está completamente desarrollado.
- Los puntos de medida que establece Tozzi se encuentran en la mitad superior de la contrahuella. No se ha podido contrastar, pues, los perfiles que se han presentado anteriormente en la mitad inferior.
- Se apreciará que los caudales que se comparan no coinciden exactamente, difiriendo en el peor de los casos de $y_c/h = 0.988$ en Tozzi (1992) a un valor de $y_c/h = 0.891$ en este trabajo. Esta diferencia significaría, en un modelo como el ensayado (ancho 0.60 m y peldaños de altura 0.10 m), un caudal de unos 8 l/s que si bien, debe repercutir en registros distintos, en términos generales éstos deberían mostrar un comportamiento comparable.
- Las estructuras ensayadas por Tozzi para la obtención de estos perfiles de presión sobre las contrahuellas se ejecutaron con una pendiente 1v:0.75h, mientras que el desarrollado por el autor presenta una pendiente 1v:0.8h.

Todo ello podría justificar las posibles diferencias en los valores absolutos de las medidas presentadas en ambos trabajos. En los gráficos de la Figura 4.140 se comparan dichos resultados. Nótese como los dos caudales intermedios muestran comportamientos aceptablemente similares en ambos casos, aunque con una clara tendencia a mostrar presiones negativas mayores en valor absoluto los obtenidos por el autor. La discrepancia es más acusada en los dos caudales extremos, y particularmente en la zona más cercana a la arista interior del peldaño, que como ha sido mostrado en el apartado 4.2.2, se corresponde con una zona de presiones positivas.

A la vista, pues, de dicho contraste podría concluirse que se confirman las tendencias de los perfiles de presiones presentados sobre la mitad superior de las contrahuellas e incluso que, en su justa medida, los valores mostrados en esa zona muestran una concordancia aceptable.

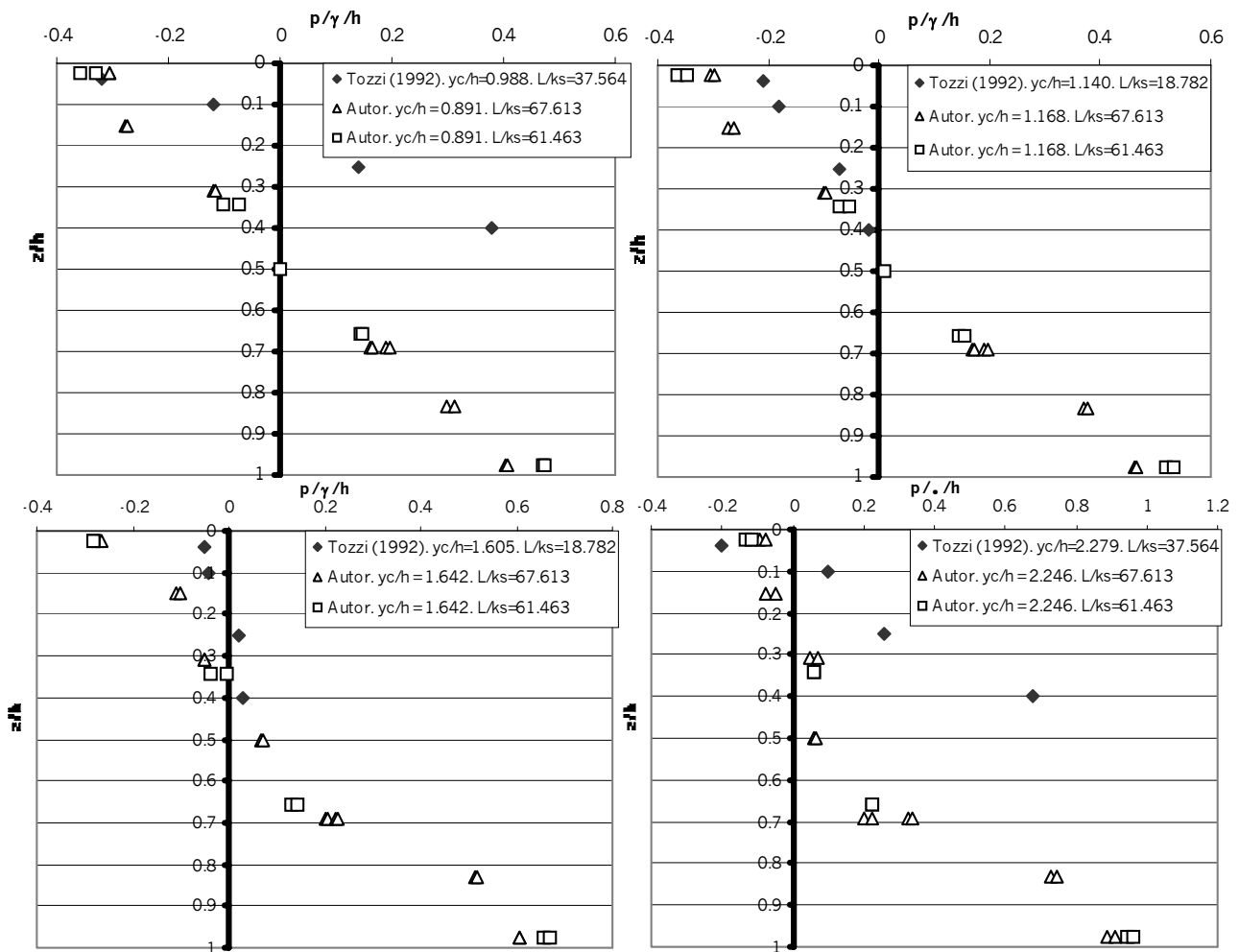


Figura 4.140. Perfiles de presión media registrados por Tozzi (1992) sobre la contrahuella de dos escalones ($L/k_s = 37.564$ y 18.782 de su modelo con $k_s = 3$ y 6 cm respectivamente).

7.2.3. Comparación con los resultados de Elviro y Mateos(1993)

En la Figura 1.48 del capítulo 1 se encuentran los perfiles de presión medidos por Elviro y Mateos sobre la huella y contrahuella de un escalón del modelo reducido del aliviadero de la presa de la Puebla de Cazalla. Las medidas realizadas por estos autores se hicieron sobre escalones que presentan aspectos diferentes a los utilizados en esta tesis. Estos son: en un caso la arista exterior redondeada y en otro caso esta misma arista eliminada pasando de la huella a la contrahuella con un bisel a 45° .

Sobre las huellas se constata un comportamiento muy similar en cuanto a los perfiles de la presión media respecto a los mostrados en el anterior apartado 4.2.1. A pesar de ello, los valores de Elviro y Mateos correspondientes a los máximos, si bien también reflejan la zona de impacto en la mitad aguas abajo de la huella y la posterior caída de presiones hacia la mitad interior del mismo, son sensiblemente superiores a los obtenidos por el autor. Mención aparte merece los perfiles mostrados por los citados investigadores en cuanto a las presiones mínimas. Se sigue observando la tendencia a la existencia de presiones negativas, incluso en la zona cercana a la arista interior del escalón, y más aún, en esta zona es donde presentan las mayores presiones negativas. Esta discrepancia quizás podría ser explicada por el biselado existente en el escalón, debido a que modifique el comportamiento del flujo rasante principal y a su vez el del vórtice interior.

Por lo que se refiere al comportamiento de las presiones sobre las contrahuellas es, igualmente, muy similar para todos los estadísticos presentados en el apartado 4.2.2 del presente capítulo. A pesar de ello se observan algunas diferencias: el percentil del 95% mostrado en esta tesis presenta la existencia de un mínimo relativo alrededor de $z/h = 0.40$, fenómeno que no se aprecia en los resultados de Elviro y Mateos; en cuanto al percentil de 5%, en esta tesis se han obtenido valores positivos cerca de la huella inferior, hecho que no se observa en los registros de los dos citados autores. En cambio, el perfil de las presiones medias sí muestra un comportamiento muy similar en ambos trabajos, observándose valores negativos en la zona exterior de la contrahuella y positivos a medida que se acerca a la huella inferior.

