

**EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE VELOCIDAD α Y β
DEL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA
UNIVERSIDAD EAFIT**

FRANKLIN HERNANDO GUTIÉRREZ ACEVEDO

PROYECTO DE GRADO

Asesor: Juan Felipe Ochoa

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD EAFIT

Departamento de Ingeniería Civil

Medellín

2011

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Medellín, marzo31 de 2011

AGRADECIMIENTOS

La presente tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas, leyendo, opinando, corrigiendo, teniendo paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

Agradezco a Dios y a mi familia por el apoyo incondicional.

Agradezco al profesor Juan Felipe Ochoa por la paciencia, por la dirección y corrección de este trabajo. Al profesor Rodrigo Osorio por su paciencia ante mi inconsistencia. A los profesores Juan Hernando Cadavid y Jesús Alberto Pérez sugerentes del tema principal de esta tesis y, por ultimo pero no menos importante al técnico de laboratorio Milton Cesar Marín por sus inagotables esfuerzos en el proceso de puesta a punto de los equipos para la obtención de los datos.

CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
1.INTRODUCCIÓN	10
2.OBJETIVOS	11
2.1OBJETIVO GENERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
3.MARCO TEÓRICO	12
3.1NOTA HISTORICA	12
3.2 FLUJO DE CANALES ABIERTOS	16
3.3 DISTRIBUCION DE VELOCIDADES EN UN SECCIÓN DEL CANAL	19
3.3.1 Velocidad Máxima	19
3.3.2 Velocidad Media	20
3.3.3 Velocidad Mínima.....	20
3.4 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DISTRIBUCION DE VELOCIDAD	20
3.5 TEORÍA DE CAPA LÍMITE	22
3.6 NÚMERO DE FROUDE	23
3.7 RELACIONES DE α y β	24
4.METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	26
4.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL MONTAJE	26
4.2 VISION GENERAL.....	28
4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES.....	34
4.4 METODOLOGÍA DEL PROCESAMIENTO DE DATOS	36
4.5 LIMITACIONES DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	36
5.RESULTADOS.....	37
6.CONCLUSIONES.....	64
7.RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS DATOS EXPERIMENTALES.....	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Isotacas en canales abiertos de diferentes secciones transversales	17
Figura 2. Distribución de velocidades en un canal rectangular.....	19
Figura 3. Esquema del canal de pendiente variable de la Universidad EAFIT.....	27
Figura 4. Robot de localización tridimensional y computador para el control numérico....	27
Figura 5. Canal de pendiente variable	28
Figura 6. Montaje para las mediciones	29
Figura 7. Correntómetro HydroMate modelo OSS-PC1, cable de enlace y hélice.	29
Figura 8. Hélices del equipo.....	30
Figura 9. Esquema de las mediciones de las velocidades puntuales en el canal	31
Figura 10. Ecuaciones de calibración para el correntómetro.....	32
Figura 11. Equipo de toma y transferencia de datos	33
Figura 12. Relación entre velocidad media calculada con geometría y con correntómetro	37
Figura 13. Relación entre velocidad media calculada con geometría y con correntómetro	38
Figura 14. Medición de las rugosidades del fondo del canal	40
Figura 15. Gráfico y ecuación de la relación entre número de Froude y α con fondo liso ..	42
Figura 16. Gráfico y ecuación de la relación entre número de Froude y β con fondo liso ..	43
Figura 17. Gráfico y ecuación de la relación entre número de Froude y α con fondo rugoso	43
Figura 18. Gráfico y ecuación de la relación entre número de Froude y β con fondo rugoso	44
Figura 19. Isotacas para caudal 9 l/s en fondo liso y en fondo rugoso	45
Figura 20. Isotacas para caudal 8 l/s en fondo liso y en fondo rugoso	46
Figura 21. Isotacas para caudal 7 l/s en fondo liso y en fondo rugoso	47
Figura 22. Isotacas para caudal 6 l/s en fondo liso y en fondo rugoso	48
Figura 23. Isotacas para caudal 5 l/s en fondo liso y en fondo rugoso	49
Figura 24. Relación de los coeficientes α y β con ϵ para todos los valores de la malla	52
Figura 25. Relación de los coeficientes α y β con ϵ sin valores cercanos a la pared.....	54
Figura 26. Relación de los coeficientes α y β con ϵ solo con valores centrales	56
Figura 27. Relación entre velocidad media y α para fondo liso	58
Figura 28. Relación entre velocidad media y β para fondo liso	58
Figura 29. Relación entre velocidad media y velocidad máxima para fondo liso	59
Figura 30. Relación entre velocidad media y α para fondo rugoso	61
Figura 31. Relación entre velocidad media y β para fondo rugoso.....	61

Figura 32. Relación entre velocidad media y velocidad máxima para fondo rugoso 62

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores aproximados de los coeficientes α Y β (Kolupaila, 1956)	22
Tabla 2. Resumen de la campaña 1 de recolección de datos	37
Tabla 3. Resumen de la campaña 2 de recolección de datos	38
Tabla 4. Resumen de las condiciones básicas para la experimentación	39
Tabla 5. Resultados considerando la teoría de capa límite.....	40
Tabla 6. Comparación porcentual entre resultados por diferentes métodos	41
Tabla 7. Número de Froude para cada caudal y profundidad.....	42
Tabla 8. Resumen de los cálculos de α y β por diferentes métodos con todos los valores de la malla.....	51
Tabla 9. Relaciones entre las velocidades y los valores de M con todos los valores de la malla	52
Tabla 10. Resumen de los cálculos de α y β por diferentes métodos sin valores cercanos a la pared	53
Tabla 11. Relaciones entre las velocidades y los valores de M sin valores cercanos a la pared.....	54
Tabla 12. Resumen de los cálculos de α y β por diferentes métodos solo con valores centrales	55
Tabla 13. Relaciones entre las velocidades y los valores de M solo con valores centrales .	56
Tabla 14. Relaciones entre las velocidades y los coeficientes α y β para fondo liso	57
Tabla 15. Relaciones entre las velocidades media y máxima para fondo liso	59
Tabla 16. Relaciones entre las velocidades y los coeficientes α y β para fondo rugoso.....	60
Tabla 17. Relaciones entre las velocidades media y máxima para fondo rugoso.....	62

RESUMEN

Para estimar el valor de los coeficientes de corrección de energía y momentum del canal del laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, se realizó una revisión de las diferentes expresiones presentadas desde los años 50's hasta la información más pertinente y actual sobre el tema.

A partir de esta consulta del estado del arte, se pusieron a punto los equipos de traslación y toma de datos del canal de laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, donde se tomaron datos de velocidades puntuales en diferentes puntos de la sección del canal para diferentes caudales.

Utilizando la aplicación computacional MATLAB, mediante el comando `contourf`, se interpolaron los datos y diagramaron los gráficos de las Isotacas que corresponden a las líneas de igual velocidad, con el objeto de conocer la distribución de velocidad en el canal para los caudales presentados en éste trabajo.

Con estos resultados se determinó la forma de distribución de velocidad para el canal, la influencia de la rugosidad del fondo del canal y se estimaron matemáticamente los coeficientes de corrección de velocidad para las ecuaciones de energía y momentum, comparándolos con los valores calculados con las fórmulas presentadas en la literatura.

Entre los valores encontrados de los coeficientes de corrección de velocidad para el canal de hidráulica de la Universidad EAFIT, y los valores calculados utilizando expresiones de la literatura, se evidenció una diferencia de 2% en promedio (Ver anexo).

ABSTRACT

To estimate the energy and momentum correction coefficients from the hydraulics laboratory channel at EAFIT University, a review was done of the various expressions presented since early 50's to the most relevant and current information on the subject.

From this determination of state of art, the equipments and data acquisition system were put in place at the channel hydraulics laboratory of the University EAFIT, where velocity data point taken at different points in the section of the channel for different discharges.

These data allowed to determine by interpolation in MATLAB graphics of the isovels corresponding to the lines of equal velocity in order to know the distribution of velocity in the channel for different flow rates.

With these results the form of velocity distribution for the channel and the influence of the roughness of the channel bottom were determined and the velocity correction coefficients were mathematically estimated for the equations of energy and momentum, compared with the values calculated with the formulas presented in the literature.

1. INTRODUCCIÓN

En un canal abierto la distribución de velocidades se ve afectada por el efecto del esfuerzo de cizalladura que ejerce el fluido en circulación con las paredes del canal, así como con la superficie del aire que lo rodea. Esto origina, que no sea uniforme la forma de la distribución de velocidades y se presente una variación vertical y transversal de las velocidades puntuales a través de la sección. Desde los estudios de Henri Bazin, se ha encontrado que en canales de laboratorio la distribución de la velocidad en la vertical “por fuera de la zona del perfil donde la fricción del fondo no tiene influencia” puede representarse adecuadamente mediante funciones de tipo potencial o logarítmica.

El cálculo práctico del flujo de masa en términos del caudal (Q) no utiliza la integración en el área de la distribución de velocidad, sino una velocidad media representativa de las velocidades puntuales. Por ésta razón, las magnitudes del flujo de energía y de momentum varían ligeramente tras considerar una distribución de la velocidad o por el contrario toman un valor constante, con lo cual se genera la necesidad de considerar valores de ajuste para los flujos de energía y de momentum. Se determinan mediante los denominados coeficientes de corrección de energía cinética, α (Coriolis) y momentum β (Boussinesq).

El estudio experimental ha determinado, que para canales muy anchos estos coeficientes toman con el valor de 1, mientras que en canales pequeños estos valores aumentan.

Para el canal del laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, es significativo determinar el valor de los coeficientes mencionados, para fines docentes y de investigación. Los profesores y los estudiantes podrán contar con valores que permitirán ajustar los cálculos teóricos a las mediciones experimentales; y así mejorar los resultados de los cálculos que impliquen el uso de los coeficientes de corrección de velocidad α y β en cualquier proyecto de investigación o práctica que requiera utilizar carga cinética o momentum.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar experimentalmente los valores de los coeficientes de distribución de velocidad de energía α (Coriolis) y momentum β (Boussinesq), para el canal de laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar la información existente o estado del arte sobre la determinación experimental de los coeficientes de distribución de velocidad de energía α (Coriolis) y momentum β (Boussinesq).
- Determinar las distribuciones de velocidad para diferentes caudales en el canal de laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT.
- Comparar los valores de los coeficientes de distribución de velocidad de energía α (Coriolis) y momentum β (Boussinesq), a partir de la medición directa de las velocidades; con los obtenidos mediante expresiones teóricas y de otras investigaciones.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 NOTA HISTÓRICA¹

El estudio de velocidades en una sección de canal ha sido tratado con un gran interés a lo largo de la historia. Entre los autores y estudios relacionados sobre el tema se destacan:

Leonardo da Vinci (Italia, 1452 – 1519): observó una diferencia de velocidad del agua en los alineamientos de los ríos, siendo más veloz mientras más lejos estuviera de las paredes, deduciendo que era debido al rozamiento que efectuaban las paredes al agua.

También estudió la velocidad del agua en el fondo y en la superficie del río, llegando a la conclusión que el agua tiene más alta velocidad en la superficie que en el fondo debido a que en la superficie la resistencia del aire es más pequeña que la resistencia que ofrece la tierra que es mucho más pesada.

B. Zandrini: Se le atribuye ser el primer investigador que intentó resolver experimentalmente el problema de las velocidades en una sección de canal; mediante mediciones directas. Para ello utilizó un cuadrante, llegando a la conclusión que la velocidad del agua aumentaba con la profundidad.

Edme Mariotte: Realizó un experimento utilizando un doble cable flotador con una esfera de superficie y otra de profundidad, observó que el flotador superior desarrollaba una velocidad mayor que el flotador que estaba a una mayor profundidad. Fue el primer experimento que demostró que el agua tiene una menor velocidad en el fondo.

Henry de Pitot: Creador del tubo Pitot que sirve para calcular la presión total, suma de la presión estática y de la presión dinámica. Consiste en una sonda con una abertura en el extremo situado contra la corriente, en esta abertura se forma un punto de remanso

¹Rouse,H;Ince,S(1953) – History of hydraulics

donde la presión final es nula y la velocidad también es nula. A partir de este invento la distribución de velocidades fue estudiada de una manera completa.

Pitot observó que la zona de máxima velocidad está situada inmediatamente debajo de la superficie y que las capas contiguas al fondo son las más lentas.

Pierre Louis Georges Du Buat: A partir de experimentos en canales pequeños pudo deducir un aumento uniforme de la velocidad teniendo en consideración valores V_s en el fondo, hasta un valor V_o en la superficie.

R. Wotman: Inventó el famoso molinete de Woltman que consiste en un molinete que gira en función de la velocidad del agua. El dedujo que la ley de distribución de velocidades puede ser representada por una parábola de eje vertical, cuyo vértice corresponde a la zona de velocidad nula.

Henry Philibert Gaspard Darcy y Henri Emile Bazin: de ellos se consideran los trabajos más importantes en esta materia, sobresaliendo de los investigadores anteriores.

Estos investigadores determinaron la distribución de velocidades sobre secciones mediante tubos de Pitot y uniendo los puntos de igual velocidad se obtuvieron curvas llamadas Isotacas, cuya forma demuestra la influencia predominante de las paredes y fondo sobre dicha distribución.

Bazin estudió la distribución de velocidad en cauces de ancho ilimitado y limitado, estableciendo en este último que la velocidad máxima no se encontraba en la superficie sino por debajo de ella.

Bazin fue el primero que dio el parámetro de las parábolas y afirmó una distribución de velocidades según parábolas de eje horizontal.

Se suceden luego una gran cantidad de investigadores que desarrollan ecuaciones de distribución de velocidades de diverso orden.

Se debe destacar que desde la primera mitad del siglo XIX aparecen trabajos importantes sobre coeficientes de distribución de velocidades, resaltando la escuela de Francia: Ecole des Ponts et Chaussées de donde vendrán los trabajos más relevantes, siendo en la actualidad aún utilizados. Subrayándose los siguientes trabajos:

Gaspard Gustave de Coriolis: Su trabajo buscaba corregir las ecuaciones de remanso, para ello se basó en el principio Trabajo – Energía, su ecuación difiere de las ecuaciones de Belanger y Vouthier en la forma del último término, el cual manifiesta su ponencia de que la distribución de velocidades a través de una sección tenía que tomarse en cuenta dentro de esa cantidad.

$$\Delta z = \frac{P}{A} (aV + bV^2) \Delta x - \int \frac{V^3 dA}{2gQ} \quad (3.1.)$$

El coeficiente de Coriolis redujo el término de la integral a $\alpha V^2 / 2g$ (donde V es velocidad media) y buscó su evaluación, llegando a la conclusión que esa magnitud era alrededor de 1,40.

Su trabajo fue duramente criticado por Vauthier que publicó un trabajo donde intentaba probar que Coriolis estaba equivocado en las siguientes afirmaciones:

- Tratar α como una constante.
- Considerar que α disminuiría en magnitud mientras V aumentaba.
- Darle a alfa una magnitud en torno a 1,40.

Joseph Boussinesq presentó un trabajo en el cual integraba las ecuaciones del movimiento para el caso de muy bajos cambios en la sección.

Se observa que Boussinesq concebía una relación de cantidad de movimiento más que una energía como lo hacía Coriolis.

Como resultado de esto, el coeficiente de Coriolis α para flujo de energía cinética fue reemplazado por el más pequeño coeficiente de la cantidad de movimiento (indicado hoy por el símbolo β):

$$1 + \eta = \beta = \int \frac{v^2 dA}{AV^2 A} \quad (3.2.)$$

Se mostró que $\alpha = 1 + 3\eta$ variaba de 1,08 para secciones rectangulares a 1,14 para secciones circulares. Se origina también una discusión sobre dichos valores semejante a la presentada por Vauthier al coeficiente de Coriolis.

3.2 FLUJO EN CANALES ABIERTOS²

Se entiende por canal abierto un conducto por el cual fluye el agua con una superficie libre.

Los canales abiertos pueden ser naturales o artificiales dependiendo de la participación del ser humano a la hora de la creación del mismo. Por tanto, los canales naturales son aquellos creados de una forma natural como son los ríos y arroyos, mientras que los canales artificiales son creados por los seres humanos.

Se han realizado estudios que han demostrado que en canales muy anchos, la distribución de velocidades en la distribución central es la misma que existiría en un canal rectangular de ancho infinito. Es decir, que en canales muy anchos las paredes del canal no tienen ninguna influencia y por tanto el flujo en esta región central puede considerarse bidimensional.

Se han de tener en cuenta las siguientes propiedades y conceptos de los canales abiertos con el fin de aproximarse a un mayor conocimiento:

Geometría del canal: los canales según su geometría se clasifican en prismáticos, cuando son construidos con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante y en no prismáticos que son todos los demás.

Los canales artificiales se diseñan con modelos de formas geométricas como trapecios, rectángulos y triángulos dependiendo de las necesidades del canal y del espacio donde estará ubicado.

El trapecio es la forma más común para canales con bancas en tierra sin recubrimiento, dado que ofrecen las pendientes necesarias para garantizar la estabilidad de los taludes. El rectángulo es utilizando normalmente cuando los canales son construidos con materiales estables.

²Chow, V.T.(1959).Open channel hydraulics.

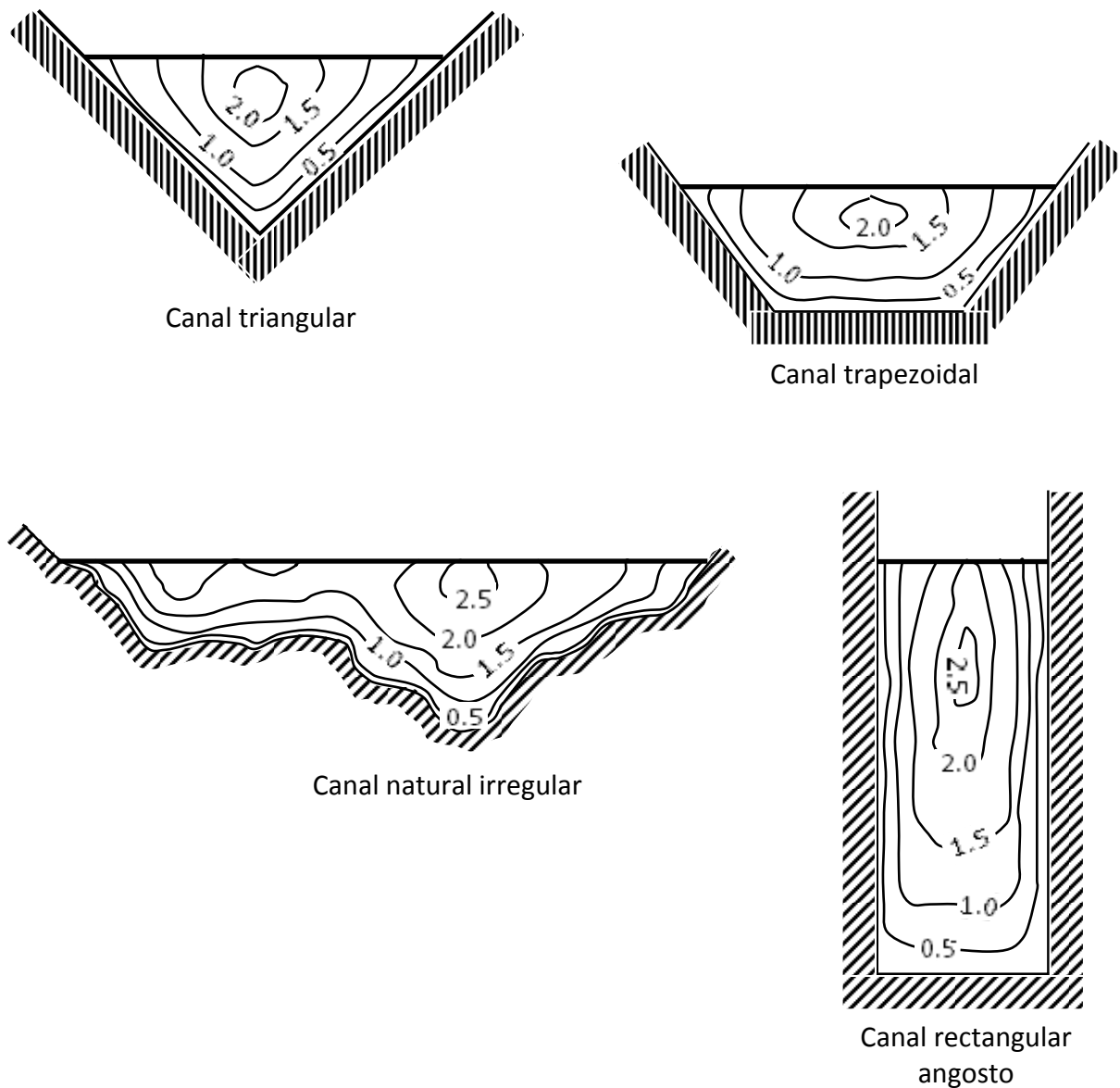


Figura 1. Isotacas en canales abiertos de diferentes secciones transversales

Todos los canales están sometidos a elementos que conforman propiedades geométricas de los mismos, estos elementos son importantes a la hora de realizar un cálculo de flujo. A continuación se tratan las definiciones de los elementos de un canal antes mencionados:

Profundidad de flujo: se entiende por profundidad de flujo la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección de canal hasta la superficie.

Nivel: es la elevación desde un nivel de referencia hasta la superficie libre.

Ancho superficial T: es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

Área mojada: es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.

Perímetro mojado: es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.

Radio hidráulico R_H : es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado. La ecuación es la siguiente:

$$R_H = \frac{A}{P} \quad (3.3.)$$

Profundidad hidráulica D: es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie. La ecuación es la siguiente:

$$D = \frac{A}{T} \quad (3.4.)$$

3.3 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UNA SECCIÓN DE CANAL³

En un canal las velocidades no son uniformes debido a la presencia de superficie libre y de las paredes del canal que modifican la velocidad del mismo. Dentro del flujo de un canal se encuentra diferentes velocidades que a continuación se desglosan.

3.3.1 Velocidad máxima: La velocidad máxima de un canal normalmente se da entre 0,05 y 0,25 veces la profundidad de la superficie, no obstante, esta velocidad máxima puede variar por factores como la rugosidad y la presencia de curvas dentro del canal. Por el contrario, factores como el viento tiene muy poco impacto en la velocidad del agua, porque el aire tiene las moléculas muy separadas en comparación con un líquido y en consecuencia ofrece un esfuerzo de cizalladura pequeño con el agua.

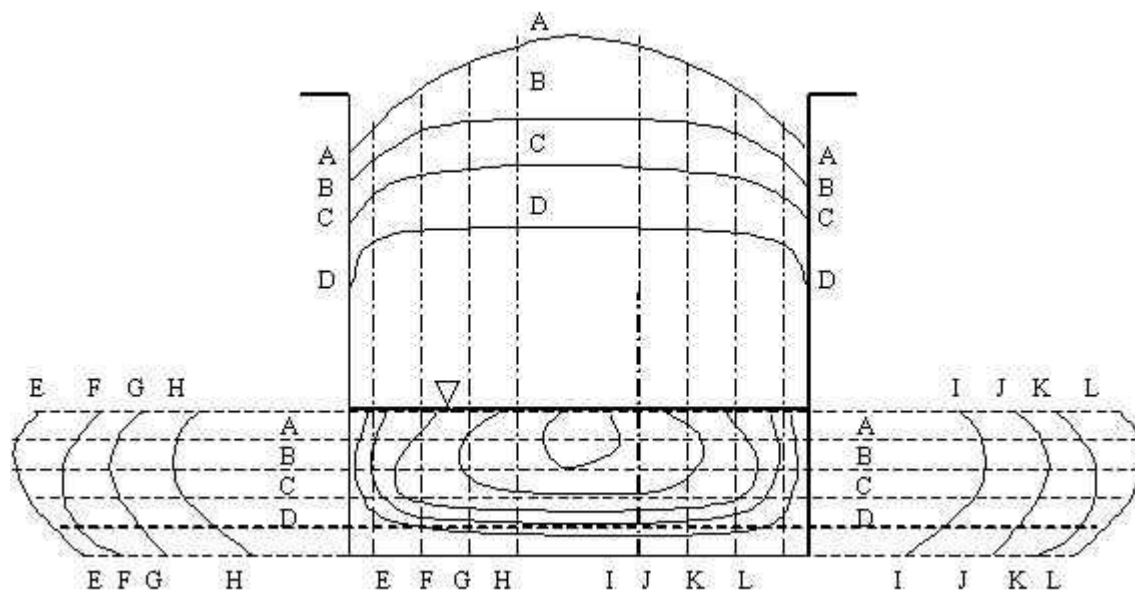


Figura 2. Distribución de velocidades en un canal rectangular

³Chow, V.T.(1959).Open channel hydraulics.

En la figura anterior se indican con letras y números las posiciones de líneas de igual velocidad o Isotacas, mostrando la tendencia de mayor velocidad en el centro del canal y velocidad reducida en las cercanías de las paredes y el fondo por la acción de las fuerzas de arrastre originadas por la rugosidad del canal.

3.3.2 Velocidad media: Para calcular la velocidad media en una sección transversal, el canal se divide en una serie de líneas verticales. Las velocidades medias en las verticales se determinan midiendo la velocidad a 0,6 de la profundidad en cada vertical o midiendo a 0,2 y 0,8 para tomar un promedio de los valores más confiables.

Por tanto la velocidad media de toda la sección es igual al caudal total dividido por el área completa.

3.3.3 Velocidad mínima: La velocidad mínima de un canal generalmente se obtiene en las proximidades de las paredes y en el fondo del canal.

Las paredes ejercen una fricción sobre el fluido lo cual reduce su velocidad. El agua que está en contacto directo con el fondo del canal se mueve con mucha más lentitud que el resto, llegando a terminar la curva de velocidad en cero.

3.4 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD

Para determinar el *coeficiente de Coriolis* se considera la expresión para energía cinética:

$$E_K = \frac{1}{2} m V^2, \text{ donde } m \text{ es la masa y } V \text{ es la velocidad del fluido.}$$

En relación con el tiempo t :

$$\frac{E_K}{t} = \frac{1}{2} \frac{m V^2}{t}; \text{ reemplazando } m = \rho \forall \text{ se tiene } \frac{E_K}{t} = \frac{1}{2} \frac{\rho \forall V^2}{t}, \text{ donde } \rho \text{ es la densidad del fluido y } \forall \text{ es el volumen.}$$

Luego, sustituyendo $\frac{\forall}{t} = Q$ la expresión queda $\frac{E_K}{t} = \frac{1}{2} \rho Q V^2$, donde Q es el caudal.

Como $Q = VA$, reemplazando se tiene $\frac{E_K}{t} = \frac{1}{2} \rho V^3 A$; el término de la velocidad puede

enunciarse en forma de función v , o en forma de velocidad media $\bar{V}$; utilizando la velocidad media $\bar{V}$, es necesario introducir un factor de corrección de velocidad; éste factor o *coeficiente de Coriolis* α , se obtiene igualando las expresiones:

$$\frac{1}{2} \rho \int v^3 dA = \alpha \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 A, \text{ despejando; } \alpha = \frac{\int v^3 dA}{\bar{V}^3 A} \approx \frac{\sum v^3 \Delta A}{\bar{V}^3 A} \quad (3.5.)$$

Análogamente, para encontrar el *coeficiente de Boussinesq* β , se comienza con la expresión de *momentum* $p = mV$, donde m es la masa y V es la velocidad del fluido.

En relación con el tiempo t :

$\frac{P}{t} = \frac{mV}{t}$; reemplazando $m = \rho \forall$ se tiene $\frac{P}{t} = \frac{\rho \forall V}{t}$, donde ρ es la densidad del fluido y $\forall$ es el volumen.

Luego, sustituyendo $\frac{\forall}{t} = Q$ la expresión queda $\rho Q V = \rho V^2 A$, donde $Q = VA$ es el caudal y A es el área. El término de la velocidad puede enunciarse en forma de función v , o en forma de velocidad media $\bar{V}$; utilizando la velocidad media $\bar{V}$, es necesario introducir un factor de corrección de velocidad por *momentum*; éste factor o *coeficiente de Boussinesq* β , se obtiene igualando las expresiones:

$$\rho \int v^2 dA = \beta \rho \bar{V}^2 A, \text{ despejando; } \beta = \frac{\int v^2 dA}{\bar{V}^2 A} \approx \frac{\sum v^2 \Delta A}{\bar{V}^2 A} \quad (3.6.)$$

Los valores α Y β pueden obtenerse de otras formas, una de ellas mediante aproximación de los coeficientes, cuando se conocen por medición directa la magnitud de la velocidad en diferentes puntos de una sección a cada punto se le considera un área de influencia ΔA_1 , por tanto la magnitud de la velocidad media como la de los coeficientes α Y β , se pueden determinar por incrementos finitos de forma aproximada.⁴

En la tabla 1 se muestran valores reales de los coeficientes para algunos canales.

Tabla 1. Valores aproximados de los coeficientes α Y β (Kolupaila, 1956)⁵

Canales	Valor de α			Valor de β		
	Min.	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.
Canales regulares, canaletas y vertederos	1.10	1.15	1.20	1.03	1.05	1.07
Corrientes naturales y torrentes	1.15	1.30	1.50	1.05	1.10	1.17
Ríos bajo cubiertas de hielo	1.20	1.50	2.00	1.07	1.17	1.33
Valles de ríos, inundados	1.50	1.75	2.00	1.17	1.25	1.33

3.5 TEORÍA DE CAPA LÍMITE⁶

La velocidad cerca del fondo de un canal se puede calcular mediante las expresiones:

$$U_* = \frac{K(v_2 - v_1)}{\ln(z_2 / z_1)} \quad U = \frac{U_*}{K} \ln \frac{(z)}{K_s} \quad (3.7.)$$

Siendo z_0 la altura de las rugosidades del fondo, $K_s=30z_0$; v_1 y v_2 las velocidades contiguas al fondo; z_1 y z_2 las alturas correspondientes a las velocidades v_1 y v_2 .

U es la velocidad final en el fondo a una altura z .

⁴Chow, V.T.(1959).Open channel hydraulics.

⁵J. J. Stoker, "Water waves".

⁶Julien, Pierre. Erosion and Sedimentation.

3.6 NÚMERO DE FROUDE⁷

La relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, representa el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo. Esta relación da lugar al número de Froude definido por la expresión:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gl}} \quad (3.8.)$$

Donde V es la velocidad media del flujo; g es la aceleración de la gravedad y l es una longitud característica.

Considerando que $V = \frac{Q}{A}$, donde Q es el caudal y A es el área de la sección transversal del

canal; el número de Froude se enuncia como:
$$F = \frac{Q}{by^{3/2}\sqrt{g}} \quad (3.9.)$$

Donde y es la profundidad del flujo y b es el ancho del canal.

⁷Cadavid, Juan Hernando. Hidráulica de Canales: Fundamentos.

3.7 RELACIONES DE α y β

Recapitulando; el coeficiente de Coriolis, α : es la relación que hay entre la energía cinética que realmente lleva el flujo en una sección dada y la energía cinética en el supuesto que la velocidad sea constante e igual a la velocidad media en la misma sección.

El coeficiente de Boussinesq, β expresa la relación entre la cantidad de movimiento real que hay en una sección dada y la cantidad de movimiento suponiendo que la velocidad se reparte uniformemente en toda la sección.

O'Brien y Jonhson(1934) idearon una solución gráfica, mediante la utilización de planímetro se mide el área dentro de cada curva de igual velocidad. Al tomar la velocidad indicada por cada curva de igual velocidad como v , se construye una curva de v^3 versus la correspondiente área en el planímetro.⁸

Esta curva se puede representar mediante la integral $\sum v \Delta A$, una vez se obtienen las cantidades se pueden resolver las integrales y obtener los coeficientes.

La ecuación para hallar los coeficientes de forma aproximada sería la siguiente:

$$\mu = \frac{V_m}{\bar{V}} - 1 \quad (3.10.)$$

$$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3 \quad (3.11.)$$

$$\beta = 1 + \mu^2 \quad (3.12.)$$

Donde V_m es la velocidad máxima y $\bar{V}$ la velocidad media del flujo.

Usando el criterio de Manning, se reemplaza $\mu = ng^{1/2} R_H^{-1/6}$, siendo n es el coeficiente de Manning; g la aceleración de la gravedad y R_H el radio hidráulico.

⁸Chow, V.T.(1959).Open channel hydraulics.

Estas ecuaciones se obtuvieron suponiendo una distribución logarítmica de velocidades. Suponiendo una distribución lineal de velocidades se tiene:

$$\alpha = 1 + \mu^2 \quad (3.13.)$$

$$\beta = 1 + \frac{\mu^2}{3} \quad (3.14.)$$

“Algunos autores han propuesto el uso del coeficiente de *momentum* para reemplazar el coeficiente de *energía* aún en cálculos basados en el principio de energía. Esto no es correcto. El que el coeficiente de energía o coeficiente de *momentum* sea utilizado depende de si se está aplicando el principio de energía o el principio de *momentum*. Los dos coeficientes se deducen independientemente de diferentes principios básicos. Ninguno de ellos es errado ni ninguno puede reemplazarse por el otro. Ambos deben utilizarse en el sentido correcto.” (Chow, V.T.1959)

Se han realizando muchas pruebas experimentales para hallar la relación de los coeficientes α y β .

Cobb(1968), recomendó que α aumenta linealmente con el coeficiente de rugosidad de Manning de acuerdo a Hulsing et al.(1966), y a partir de experimentos posteriores se planteó que:⁹

$$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667 \quad (3.15.)$$

Jaeger(1949,1968) demostró que α depende del coeficiente de fricción solo si se considera flujo uniforme. También, una relación entre la dispersión de energía y la distribución de velocidad fue discutida. Mazumder(1971) restringió sus consideraciones a flujo subcrítico. Ambos coeficientes, α y β se expresaron como una función de μ mediante polinomios de orden tres, de los cuales se aproximó para $\mu < 1.65$ son:

$$\alpha = e^{0.96\mu} \quad \beta = e^{0.48\mu} = \sqrt{\alpha} \quad (3.16.)$$

⁹Li,Hager(1991) - Correction coefficients for uniform channel flow.

4. METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

4.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL MONTAJE

La localización exacta de la hélice del correntómetro en cada una de las repeticiones en la toma de datos, se logró utilizando el robot de localización tridimensional del canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica permitiendo el control de movimiento de un sensor de velocidad para mediciones de variables en diversas secciones de flujo generadas en el canal. El equipo cuenta con software de control de movimiento en tiempo real UMI 500, tarjeta de control UNIDEX 500 y amplificadores de potencia BA10 marca AEROTECH, además cuenta con la posibilidad de generar secuencias de movimiento basadas en programación de maquinas CNC en código G, éste robot fue diseñado y construido por el técnico de laboratorio Milton Cesar Marín Marín.

Los valores de las velocidades se obtuvieron con un medidor de corriente o molinete que es un dispositivo constituido por una hélice, la cual gira al estar en contacto con una corriente de agua; el número de revoluciones es proporcional a la velocidad de la corriente.

El impulso y control del caudal de agua se logró usando una motobomba marca Hidromac modelo GB2A con motor Siemens de 9 HP de potencia; el monitoreo de las revoluciones de la bomba y lecturas de caudales se lograron con el software LabView.

El canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT está construido con paredes y fondo lisos (en vidrio), mide 7.92 m de longitud, 0.47 m de alto y 0.30 m de ancho.

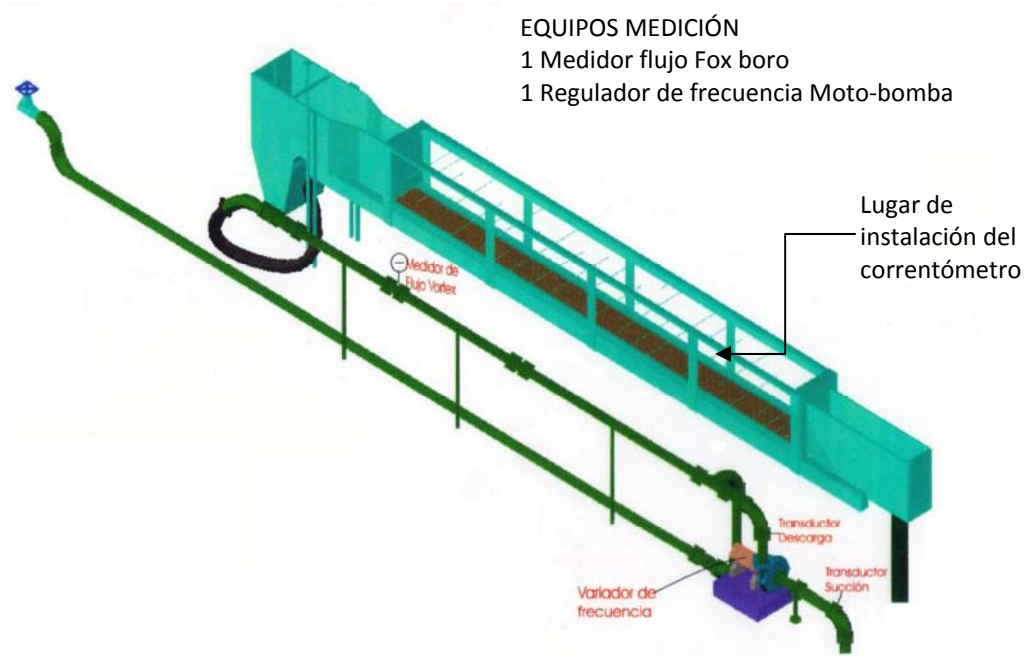


Figura 3. Esquema del canal de pendiente variable de la Universidad EAFIT



Figura 4. Robot de localización tridimensional y computador para el control numérico

Sobre el canal están instalados unos rieles que sirven de guía y soporte al robot de localización tridimensional, éste a su vez está equipado con unas mordazas que sostienen el asta de sujeción de la hélice del correntómetro.

El robot de localización tridimensional está conectado por medio de cables al un tablero de control numérico y éste a su vez está conectado a un computador con los programas necesarios para el correcto desempeño del robot.

4.2 VISIÓN GENERAL

El escenario para este estudio fue el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT y el equipo utilizado corresponde al medidor de flujo tipo Vortex marca Foxboro de 4", un sistema de toma y transferencia de datos y un localizador tridimensional (robot) en el cual se instaló un molinete de eje horizontal.



Figura 5. Canal de pendiente variable

En la figura 6 se observa el vidrio que conforma las paredes y el fondo del canal de pendiente variable.

Para todas las mediciones de velocidades, el canal de pendiente variable se mantuvo en posición horizontal, es decir, con pendiente 0%; en cuanto al régimen de flujo se optó por el subcrítico para obtener una profundidad suficiente para diagramar una malla de

velocidades con suficientes datos para interpolarlos, por lo anterior, la profundidad del flujo se determinó con un control hidráulico aguas abajo consistente en una compuerta tipo vertedero.

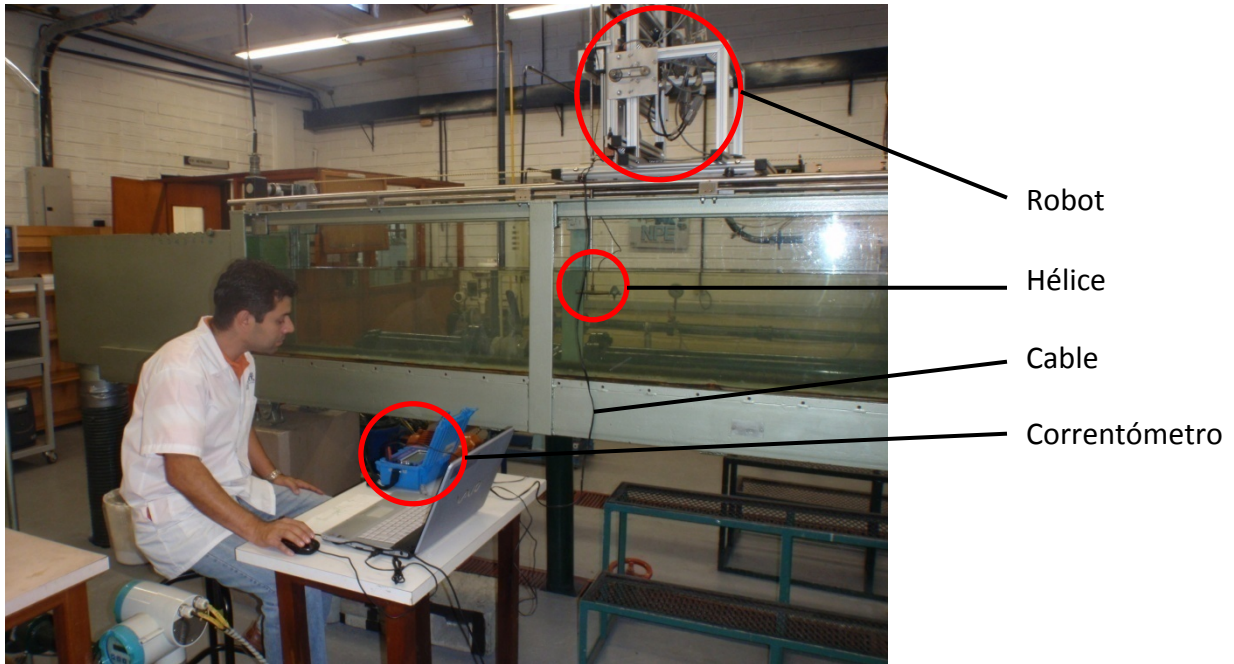


Figura 6. Montaje para las mediciones

En la figura se aprecia el correntómetro conectado a la hélice por un cable, que a la vez está fijado al localizador tridimensional (robot).



Figura 7. Correntómetro HydroMate modelo OSS-PC1, cable de enlace y hélice.

El correntómetro está compuesto por cuatro partes básicas que son: contador de pulsos de pantalla táctil; varilla graduada; hélice y cable de conexión entre la hélice y el contador.

La primera etapa en el proceso experimental consistió en identificar el comportamiento conjunto de todos los equipos a utilizar en el proceso de medición, para de esta forma identificar dificultades y otras situaciones de la etapa experimental. El rango de caudales analizado varió entre 5-20 lt/s, y permitió identificar que los mejores caudales para llevar a cabo la toma de los datos corresponden al rango de (5 - 9) [l/s] tras realizar un análisis de los valores de las velocidades, que consistió en la comparación de la velocidad media de la sección calculada a partir de la lectura de caudal entregada por el medidor y el valor de la velocidad registrado por el correntómetro para el rango de pulsos descritos por la hélice utilizada en las mediciones (Ver Anexos, primera campaña de toma de datos). Tras realizar diferentes evaluaciones de las hélices disponibles para el correntómetro se optó por seleccionar la hélice 3, dada la estabilidad de las cuantías de pulsos entregados por el equipo.



Figura 8. Hélices del equipo

El diámetro de las hélices es de 5 cm, pensando en hacer un barrido lo más exacto posible en la vertical, se determinó hacer mediciones cada 2 cm; y después de analizar datos preliminares se simplificó la toma de datos en la horizontal cada 5 cm; entonces se conformó una malla de medición de 6 filas y 6 columnas en promedio, en algunos casos la

mallas se limitó a 5 filas por el descenso de la profundidad debido a la disminución del caudal.

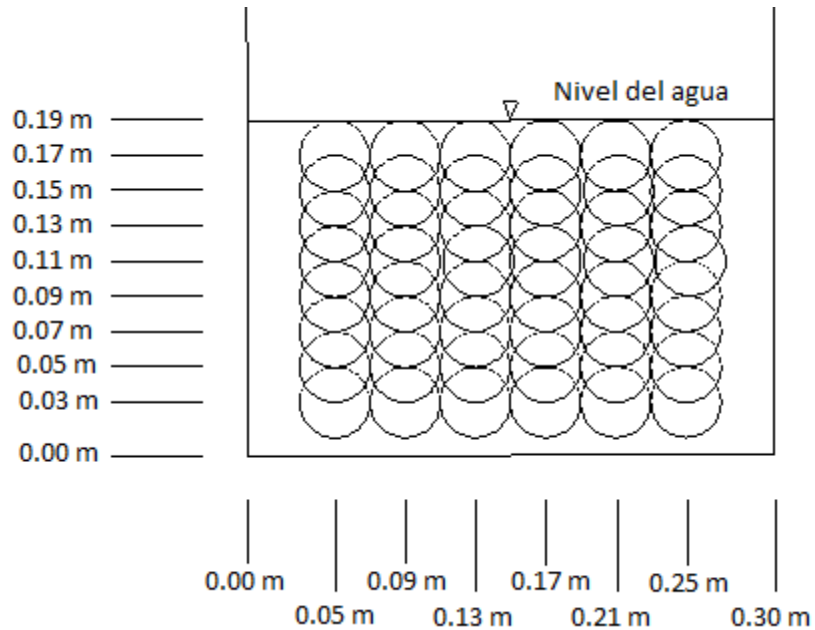


Figura 9. Esquema de las mediciones de las velocidades puntuales en el canal

En la figura anterior se describe gráficamente las posiciones ocupadas por la hélice para todas las mediciones, se consideró prudente no hacer mediciones muy cerca a las paredes y fondo por seguridad del equipo de medición.

El valor de la velocidad del flujo en m/s se obtiene tras reemplazar según el caso la lectura de los pulsos por segundo en las siguientes fórmulas:

Los parámetros de calibración (o fórmula) para una hélice tiene la siguiente forma básica:

(donde n = pulsos por segundo de la hélice y V = velocidad del agua)

$$\begin{array}{l} n < 0.99 \\ V = 0.1374 n + 0.0828 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 0.99 < n < 8.12 \\ V = 0.1429 n + 0.0774 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} n > 8.12 \\ V = 0.1510 n + 0.0116 \end{array}$$

Fórmula de tres etapas

Si la calibración de la hélice tiene una fórmula de dos etapas:

$$\begin{array}{l} n < 4.21 \\ V = 0.1374 n + 0.0828 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} n > 4.21 \\ V = 0.1510 n + 0.0255 \end{array}$$

A continuación, introduzca los datos como:

$$\begin{array}{l} n < 4.21 \\ V = 0.1374 n + 0.0828 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 4.21 < n < 4.21 \\ V = 0.1374 n + 0.0828 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} n > 4.21 \\ V = 0.1510 n + 0.0255 \end{array}$$

Fórmula de dos etapas

Si la calibración de la hélice es lineal y tiene una fórmula de una sola etapa:

$$\begin{array}{l} \text{Para cualquier } n \\ V = 0.1374 n - 0.0828 \end{array}$$

A continuación, introduzca los datos como:

$$\begin{array}{l} n < 5.00 \\ V = 0.1374 n - 0.0828 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} 5.00 < n < 5.00 \\ V = 0.1374 n - 0.0828 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} n > 5.00 \\ V = 0.1374 n - 0.0828 \end{array}$$

Fórmula de una etapa

Figura 10. Ecuaciones de calibración para el correntómetro



Figura 11. Equipo de toma y transferencia de datos

Una vez determinados el rango de caudales y el equipo específico a utilizar, se procedió a la toma de datos para el rango de caudales previamente identificado. Posteriormente para cada caudal seleccionado se realizaron tres mediciones de la velocidad, las cuales fueron promediadas para obtener una sola serie de datos para cada caudal; proceso que se realizó en una condición de flujo con el fondo del canal en acrílico y otro recubriendo el fondo del canal con un manto asfáltico. De esta forma se realizaron un total de 1487 mediciones, de las cuales se consideraron representativas 1212 mediciones para la determinación de los coeficientes de corrección de la velocidad en un rango específico de caudales.

Adicionalmente, con el propósito de apoyar otro trabajo de grado realizado de forma simultánea (Escalante, Salazar; 2009), se realizó el mismo procedimiento de medición a la salida de un resalto hidráulico con el objeto de identificar únicamente los valores de α y β .

A los valores de las velocidades se les hizo un nuevo tratamiento estadístico con el objeto de analizar algún efecto de la pared en la magnitud de los coeficientes de velocidad para luego proceder a dibujar las Isotacas y calcular los coeficientes α y β (mediante forma discreta y continua) propios del canal de laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT para diferentes caudales modificando la condición de lisura del fondo del canal.

Finalmente, se analizarán las distribuciones de velocidad obtenidas y las relaciones entre α y β con diferentes expresiones disponibles en la literatura.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Para lograr una medición sistemática se adoptó una rutina explicada a continuación:

- i. Como primera medida se verifica el buen funcionamiento de la bomba, teniendo especial cuidado que esté llena de agua o purgada, de no ser así, se procede a cebarla con una manguera conectada a la red de agua de EPM, seguido de esto se examinan todas las partes del correntómetro empezando por el estado de las baterías del monitor de la salida de datos, luego con la lubricación del eje de la hélice y por último se verifica la posición totalmente horizontal o pendiente 0 del canal.
- ii. Si existe duda de la lubricación del eje del correntómetro, se procede a desarmarlo y llenarlo con aceite de la siguiente forma:
 - a. Para llenar la cámara de lubricante, se afloja la tuerca del eje con la llave especial del equipo.
 - b. Se retira el conjunto del eje y se mantiene sostenido entre los dedos.
 - c. Conservando el cuerpo erguido se llena hasta $\frac{3}{4}$ de la capacidad del cuerpo con aceite filtrado suministrado por Hydrological Services para la pieza N° PYG-17.
 - d. Al introducir nuevamente el eje, el exceso de aceite se verá forzado a salir a través de la rosca fina alrededor del eje; se asegura la tuerca y se aprieta.
- iii. El correntómetro es montado en un eje que lo sujeta al robot de posicionamiento tridimensional del canal de pendiente variable; éste montaje se hace considerando la profundidad máxima que desarrollará el recorrido del motor indicado por el programa

utilizado para el movimiento, todo esto para evitar que la hélice se estrelle con el fondo del canal.

iv. Se da encendido a la motobomba del canal y se ajusta el caudal deseado para la toma de datos.

v. Para el caudal señalado en el control numérico de la motobomba del canal se mide la profundidad del agua lograda.

vi. Con la lectura de la profundidad se asigna la rutina programada en código G para el caso específico.

vii. Antes de dar marcha al robot se activa la corriente alimentadora de los drivers controladores de los servomotores.

viii. Se inicia la rutina programada en código G, seleccionada con los datos y procedimientos anteriores.

ix. En cada intervalo de medida se pausa la rutina durante 30 segundos para la estabilización del flujo circundante en la hélice, y así tomar un dato lo más constante posible.

x. Se activa el medidor de flujo o correntómetro, el cual hace un promedio de la velocidad en el punto de medida durante 30 segundos.

xi. Se consigna el dato en una tabla de Excel y se procede al avance hacia el otro punto de medida programado en la rutina.

4.4 METODOLOGÍA DEL PROCESAMIENTO DE DATOS

Para cada caudal se realizaron 108 mediciones con el objeto de promediar para obtener malla característica para cada caudal, para la condición del canal con fondo liso y con fondo rugoso (ver Anexos, Segunda campaña de toma de datos)

4.5 LIMITACIONES DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

El tamaño de la hélice no permitió tener acceso a datos de medida cercanos al fondo y paredes del canal, la menor distancia para ésta toma de datos fue de 3 cm, lo que resulta muy alejado de las paredes y fondo para observar en mayor detalle el fenómeno estudiado en éste trabajo.

La necesidad de lubricar el equipo después de 1 hora de inmersión continuada, introdujo en alguna medida un factor de error debido a que el posterior montaje de la hélice era imposible hacerlo idéntico al anterior, específicamente la alineación de la hélice con las paredes del canal.

Tanto las condiciones del tanque de carga del laboratorio, como el equipo utilizado para la determinación de la velocidad, se consideran puntos esenciales a considerar en trabajos futuros, puesto que la alimentación, no permite contar con un flujo permanente para grandes caudales y el equipo que mide la velocidad de alguna forma perturba las líneas de corriente afectando la medición.

5. RESULTADOS

El rango de caudales analizado varió entre 5-20 lt/s, y permitió identificar que los mejores caudales para llevar a cabo la toma de los datos corresponden al rango de (5 - 9) [l/s] tras realizar un análisis de los valores de las velocidades, que consistió en la comparación de la velocidad media de la sección calculada a partir de la lectura de caudal entregada por el medidor y el valor de la velocidad registrado por el correntómetro para el rango de pulsos descritos por la hélice utilizada en las mediciones (Ver Anexo 1, Primera campaña de toma de datos).

Tabla 2. Resumen de la campaña 1 de recolección de datos

Q [l/s]	V media [m/s] Q/A	V media [m/s] correntómetro
18,8	0,3581	0,2919
15,0	0,3030	0,2590
10,0	0,2287	0,2057
5,0	0,1373	0,1489

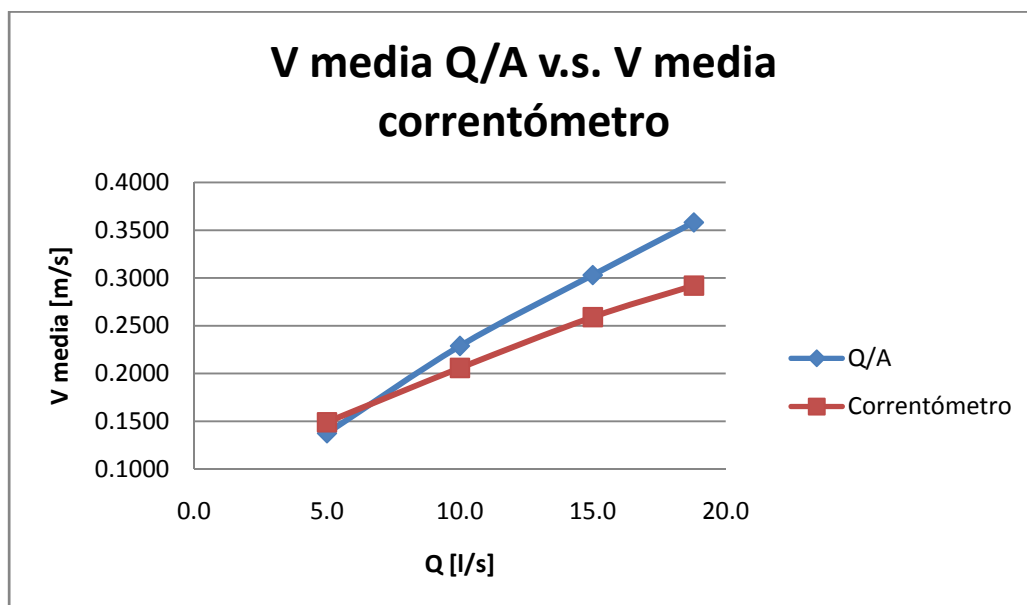


Figura 12. Relación entre velocidad media calculada con geometría y con correntómetro

Tabla 3. Resumen de la campaña 2 de recolección de datos

Q [l/s]	V media [m/s] Q/A	V media [m/s] correntómetro
15	0,3030	0,2590
13,5	0,2903	0,2434
12	0,2581	0,2258
10,55	0,2425	0,2151
10	0,2287	0,2057
8	0,1975	0,1943
6,5	0,1667	0,1769
5,0	0,1373	0,1489

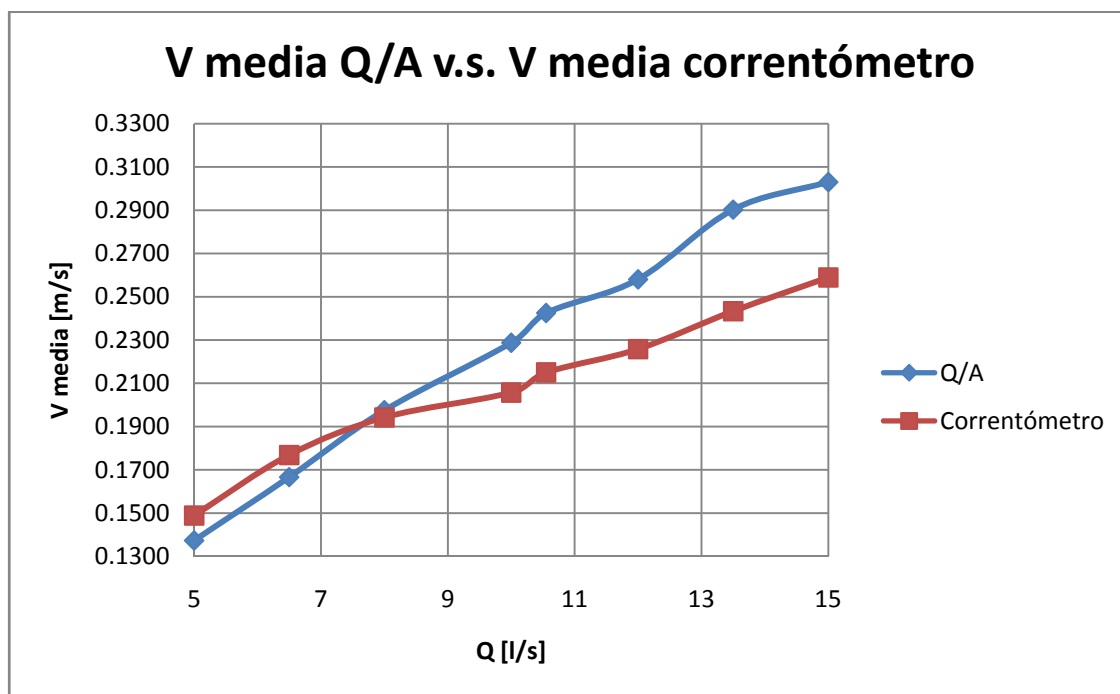


Figura 13. Relación entre velocidad media calculada con geometría y con correntómetro

Para un estudio juicioso de los posibles efectos de pared que existen en la experimentación, el cálculo de los coeficientes y todas las relaciones tratadas en este texto se dividieron en tres conjuntos de datos:

Con todos los valores de la malla: se toman en cuenta para los cálculos todos los valores puntuales medidos de las velocidades en la sección del canal.

Sin valores de pared: se omiten para los cálculos los valores inmediatamente vecinos a las paredes del canal.

Con valores centrales: solo se calculó con los datos de las velocidades puntuales en la franja central vertical de la sección del canal.

Para el caso de fondo rugoso se tomó el número de Manning característico del asfalto rugoso, superficie que se asemeja bastante al material utilizado para cambiar la rugosidad del fondo del canal.

Luego de realizar las mediciones de las velocidades puntuales en todos los casos propuestos se presenta la siguiente tabla que resume la configuración de las mediciones:

Tabla 4. Resumen de las condiciones básicas para la experimentación

	FONDO LISO ($s=0$; n de Manning= 0,010)					FONDO RUGOSO ($s=0$; n de Manning= 0,016)				
Q_0 [l/s]	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
Profundidad [m]	0,143	0,140	0,133	0,132	0,123	0,138	0,135	0,130	0,127	0,120
Punto de control	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Las Figuras 19 a 23 presentan los gráficos de las isotacas construidas a partir de los valores medidos para cada una de las configuraciones de medición definidas en la Tabla 4.

La Tabla 8 presenta los valores de los coeficientes de corrección de velocidad a partir de las ecuaciones que establecen su definición, así como los obtenidos mediante el uso de

otras metodologías disponibles que utilizan la velocidad media y la velocidad máxima del perfil de velocidades en la vertical.

En otro análisis, se consideró calcular la velocidad cerca del fondo con la teoría de capa límite, obteniendo el siguiente resultado:

Tabla 5. Resultados considerando la teoría de capa límite

CON TODOS LOS VALORES DE LA MALLA										
Expresión	FONDO LISO					FONDO RUGOSO				
	Caudal [l/s]									
	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
Cálculo de α y β a partir de valores discretos										
α	1,019	1,024	1,022	1,023	1,049	1,332	1,337	1,345	1,320	1,320
β	1,013	1,016	1,015	1,015	1,032	1,144	1,147	1,152	1,102	1,102

En ésta ocasión se calculó la velocidad cercana al fondo con la teoría de la capa límite en el caso de fondo rugoso, debido a que se midió la altura de las rugosidades en el laboratorio, resultando un promedio de 4 décimas de milímetro. Los datos experimentales están consignados en el Anexo 3.



Figura 14. Medición de las rugosidades del fondo del canal

Tabla 6. Comparación porcentual entre resultados por diferentes métodos

	CON TODOS LOS VALORES DE LA MALLA										PROMEDIO
	Según Chow										
α	1%	2%	2%	2%	5%	2%	3%	3%	2%	3%	3%
β	1%	2%	1%	1%	3%	2%	2%	2%	1%	2%	2%
	Según Chow usando el criterio de Manning										
α	5%	2%	2%	2%	1%	7%	6%	6%	8%	6%	4%
β	2%	0%	0%	0%	2%	2%	1%	2%	3%	2%	1%
	Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
α	3%	0%	1%	0%	2%	0%	1%	1%	0%	0%	1%
β	2%	1%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	0%	1%	1%
	SIN VALORES CERCANOS A LA PARED										
	Según Chow										
α	21%	22%	25%	24%	29%	70%	73%	70%	80%	83%	50%
β	19%	20%	23%	22%	25%	53%	55%	54%	62%	64%	40%
	Según Chow usando el criterio de Manning										
α	16%	18%	20%	19%	24%	70%	73%	71%	85%	89%	49%
β	17%	18%	21%	20%	24%	53%	55%	54%	64%	66%	39%
	Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
α	17%	19%	22%	21%	25%	55%	58%	55%	64%	67%	40%
β	17%	18%	21%	21%	23%	45%	47%	45%	53%	54%	34%
	SOLO CON VALORES CENTRALES										
	Según Chow										
α	24%	22%	25%	24%	31%	71%	72%	69%	79%	76%	49%
β	21%	20%	23%	22%	27%	54%	55%	53%	61%	59%	39%
	Según Chow usando el criterio de Manning										
α	20%	18%	21%	19%	26%	71%	73%	70%	84%	80%	48%
β	20%	18%	21%	20%	25%	54%	55%	53%	63%	60%	39%
	Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
α	20%	18%	22%	21%	26%	56%	57%	54%	62%	60%	40%
β	19%	18%	22%	20%	24%	46%	46%	44%	52%	50%	34%

En la tabla anterior se aprecia las diferencias en porcentaje entre las cuantías de los coeficientes de velocidad obtenidos a partir de valores discretos y los obtenidos mediante aplicación de las expresiones encontradas en la literatura.

Tabla 7. Número de Froude para cada caudal y profundidad

CON TODOS LOS VALORES DE LA MALLA										
Expresión	FONDO LISO					FONDO RUGOSO				
	Caudal [l/s]									
	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
Cálculo de α y β a partir de valores discretos con teoría de capa límite										
α	0.994	1.024	1.022	1.023	1.049	1.332	1.337	1.345	1.320	1.320
β	0.995	1.016	1.015	1.015	1.032	1.144	1.147	1.152	1.102	1.102
γ	0.143	0.140	0.133	0.132	0.123	0.138	0.135	0.130	0.127	0.120
Froude	0.088	0.080	0.074	0.064	0.057	0.092	0.083	0.076	0.066	0.059

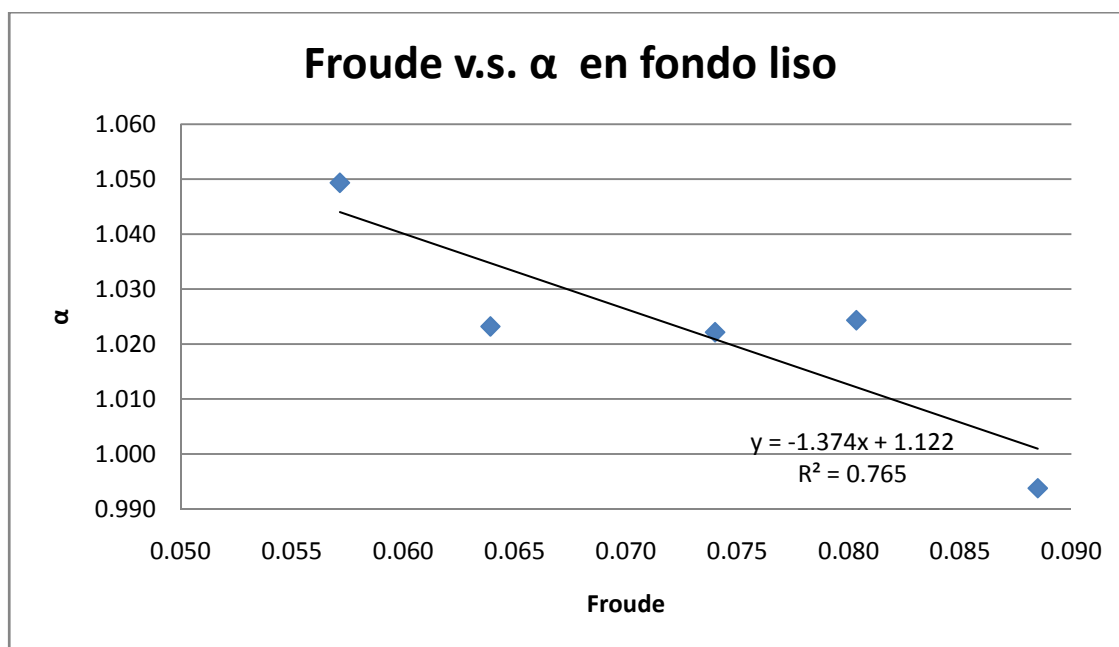


Figura 15. Gráfico y ecuación de la relación entre número de Froude y α con fondo liso

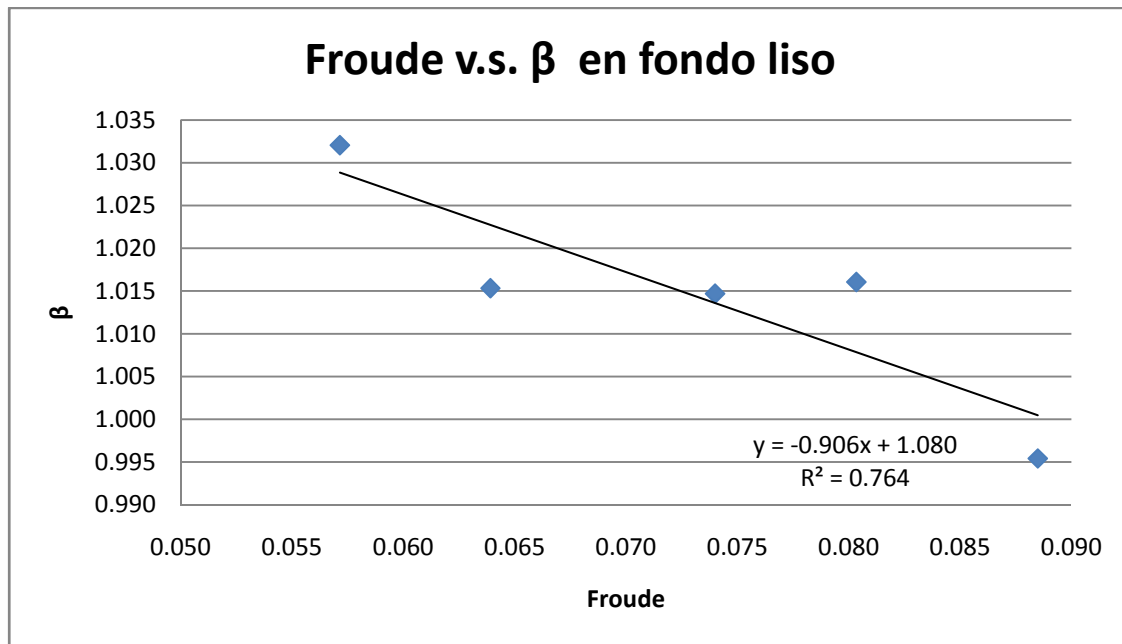


Figura 16. Gráfico y ecuación de la relación entre número de Froude y β con fondo liso

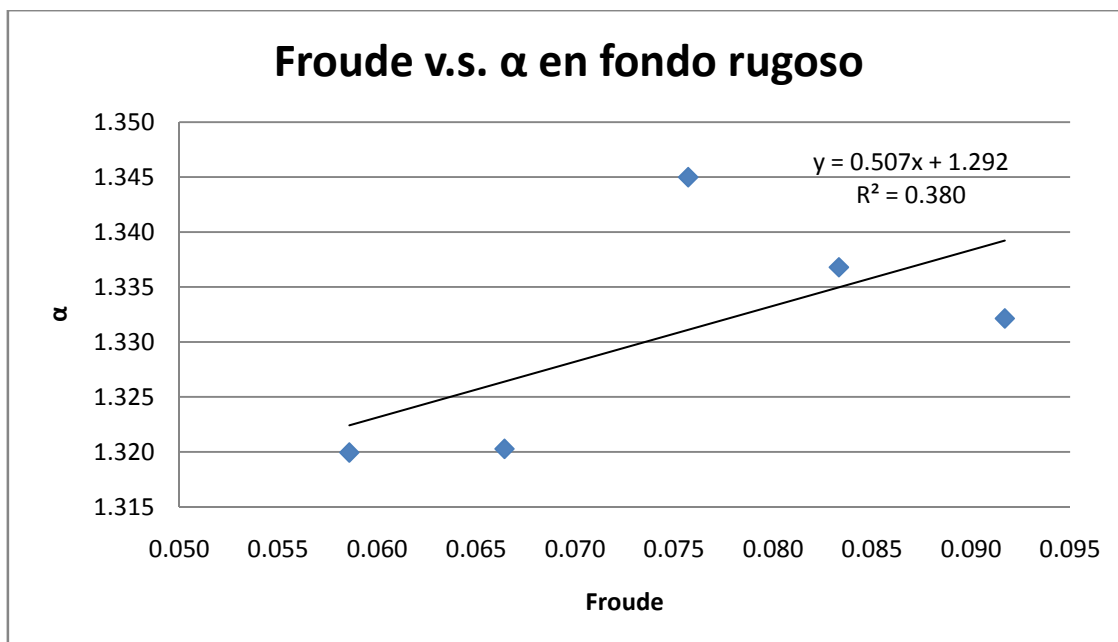


Figura 17. Gráfico y ecuación de la relación entre número de Froude y α con fondo rugoso

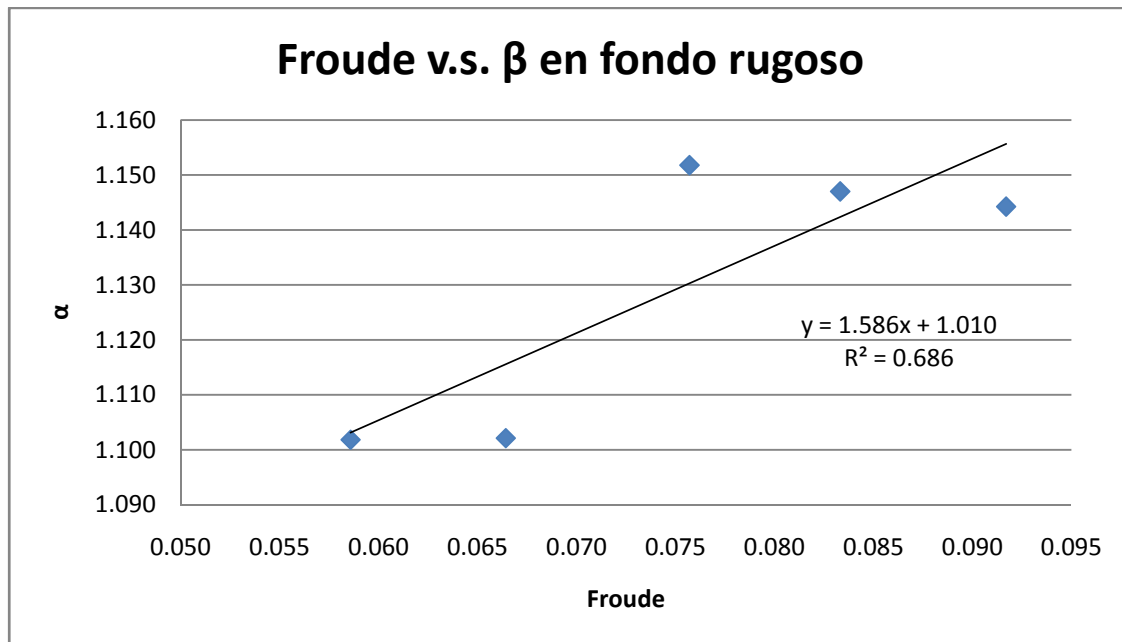


Figura 18. Gráfico y ecuación de la relación entre número de Froude y β con fondo rugoso

En las relaciones para el fondo liso se advierte la tendencia lineal de la relación funcional entre el número de Froude y los coeficientes de corrección de velocidad, que permiten sugerirlas en la aplicación dentro de los procedimientos de laboratorio dentro del rango de los valores de Froude. En las relaciones para el fondo rugoso, se observa una misma tendencia en ambos coeficientes pero que no se ajusta bien a una relación lineal como se observa en la figura.

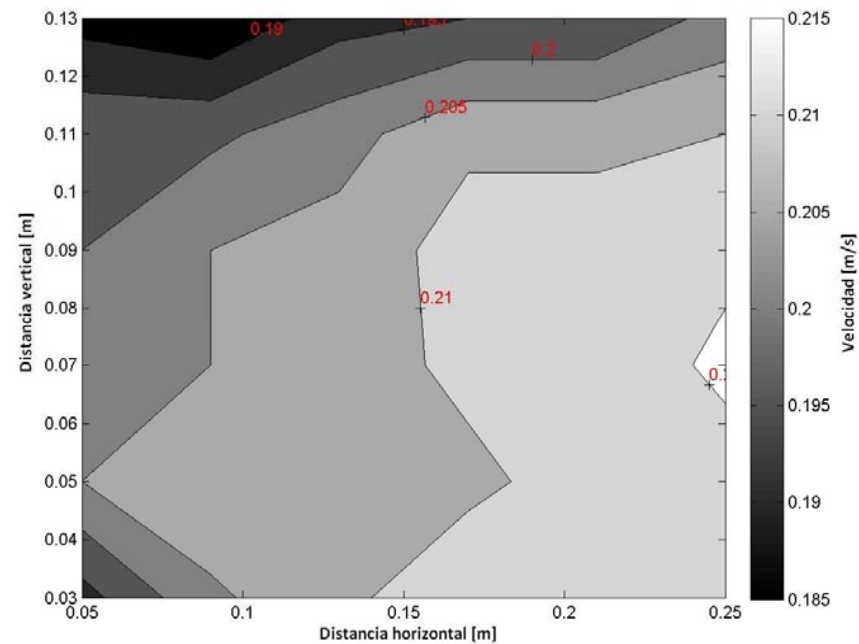
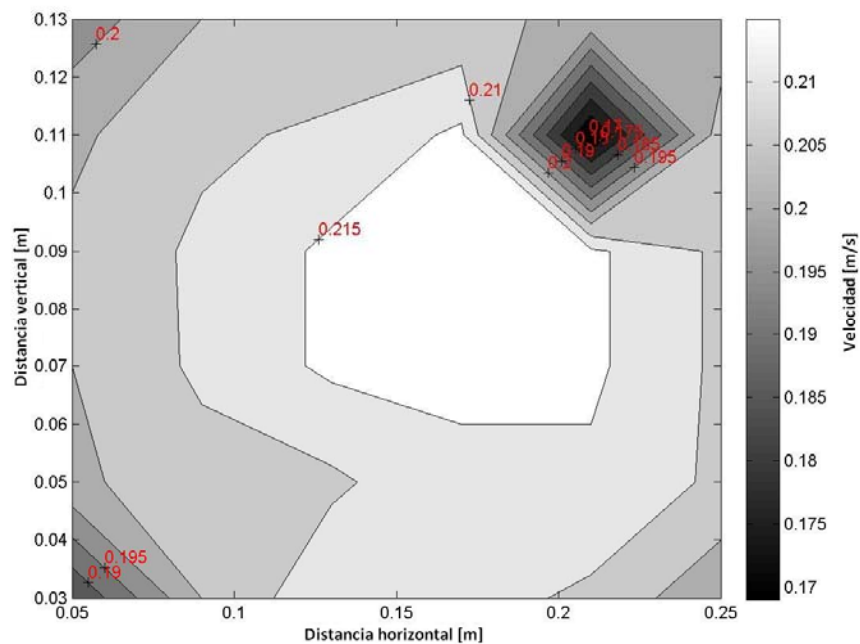


Figura 19. Isotacas para caudal 9 l/s en fondo liso y en fondo rugoso

En la figura del caso en fondo liso se aprecia una velocidad mayor en la zona central del canal en comparación con el caso de fondo rugoso, en la cual se observa una desviación del mayor valor hacia la pared.

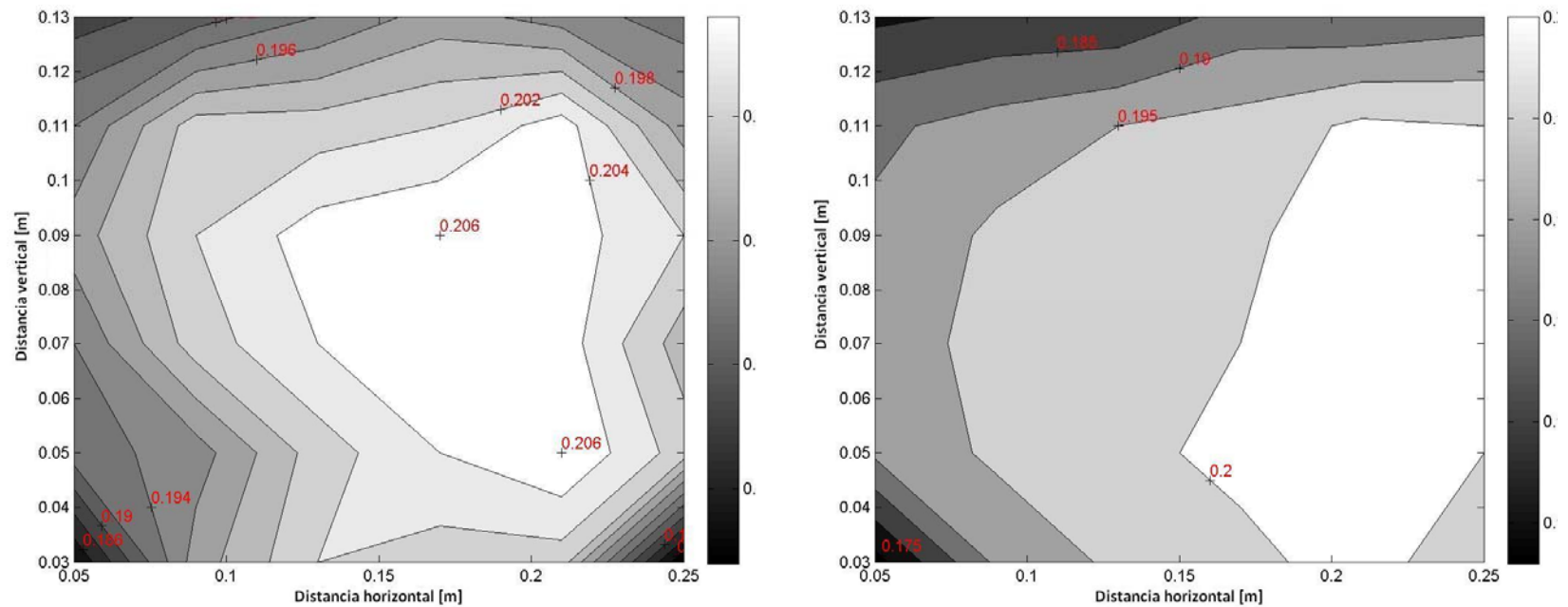


Figura 20. Isotacas para caudal 8 l/s en fondo liso y en fondo rugoso

En el cambio de rugosidad se percibe un desplazamiento de las áreas de mayor velocidad a la derecha de la sección transversal del canal en comparación con la grafica anterior.

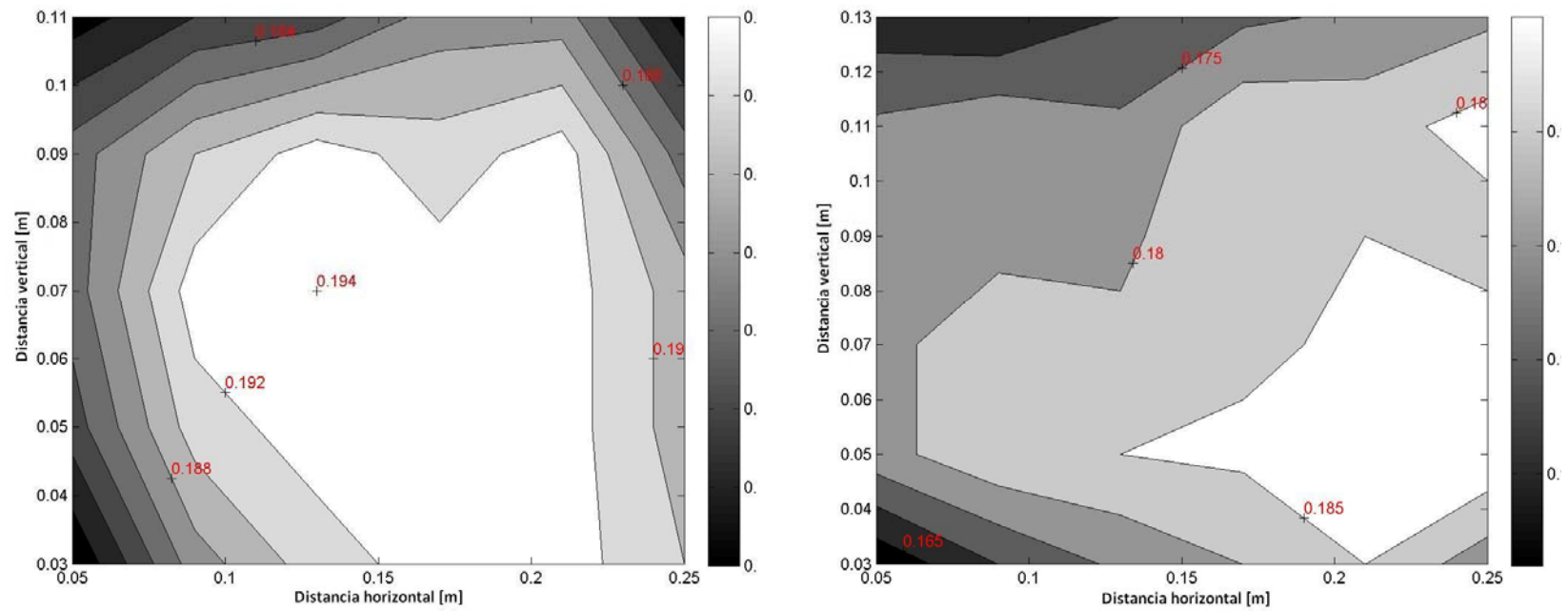


Figura 21. Isotacas para caudal 7 l/s en fondo liso y en fondo rugoso

En el caso de fondo liso se evidencia la simetría en la distribución de velocidades, en contraste con el caso de fondo rugoso, el flujo rápido se desplaza a la derecha de la sección transversal del canal.

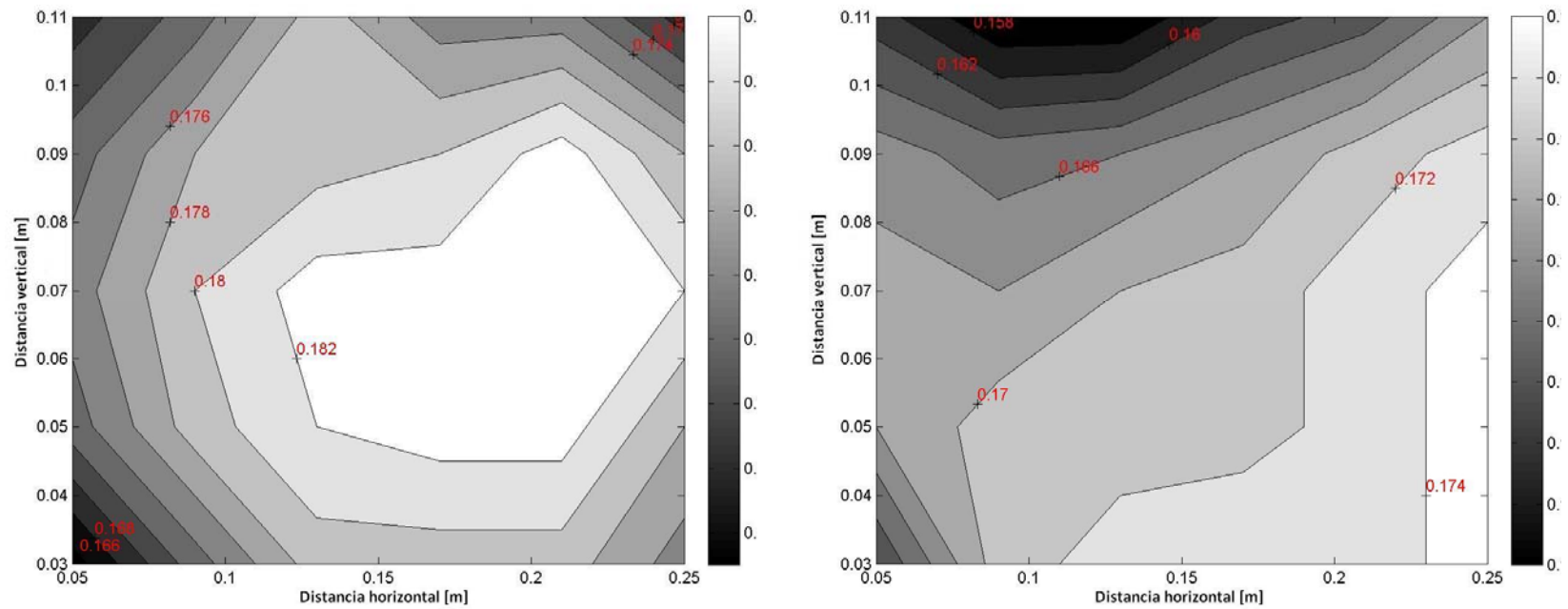


Figura 22. Isotacas para caudal 6 l/s en fondo liso y en fondo rugoso

En estas figuras se demuestra cómo la rugosidad influye en la formación de una corriente cruzada en el canal.

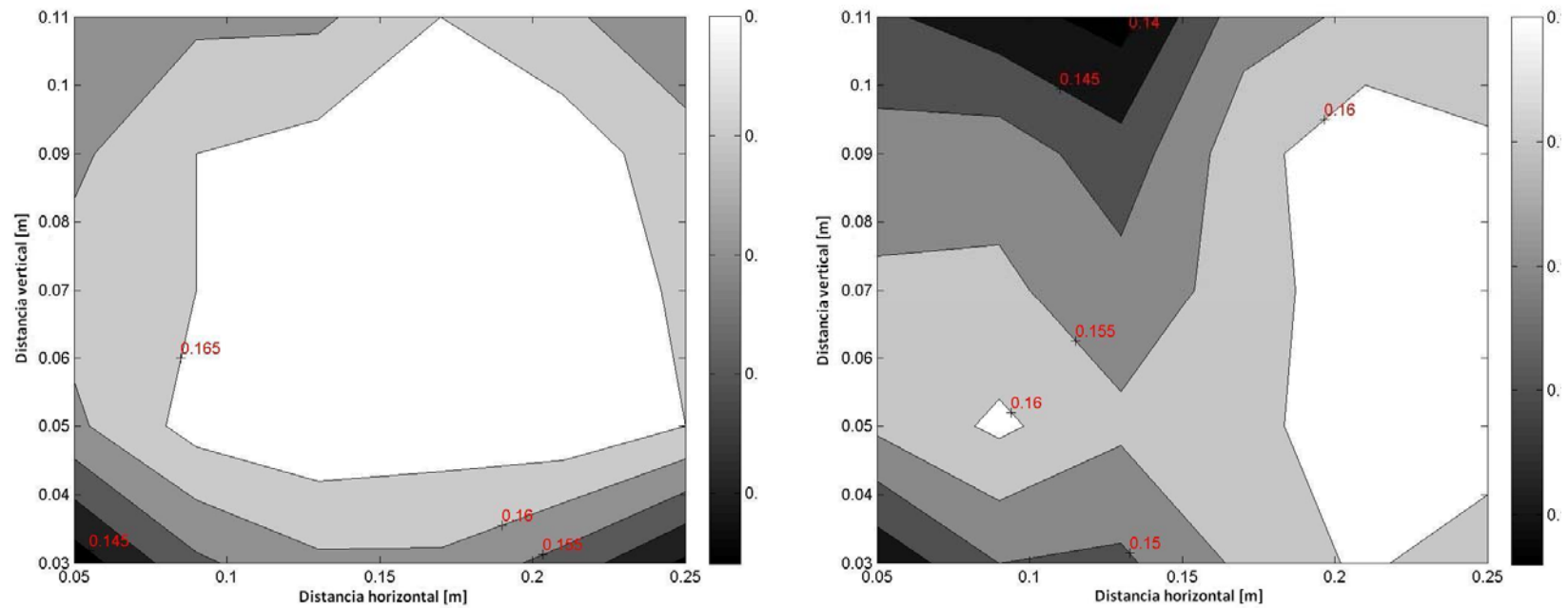


Figura 23. Isotacas para caudal 5 l/s en fondo liso y en fondo rugoso

Cuando el flujo es muy lento, se observa un área mayor de velocidad alta en fondo liso; en fondo rugoso se observan dos regiones aparentes de alta velocidad separada por una región central de menor velocidad.

Como se mencionó al principio de este capítulo, los datos se trataron de tres formas diferentes, para comprobar el efecto de pared en los valores de los coeficientes α y β .

En la Tabla 8, se presentan los valores de α y β para los diferentes caudales y para las dos rugosidades propuestas (liso y rugoso), teniendo en cuenta todos los valores tomados, para la malla de velocidades. Estos valores se obtuvieron después de promediar tres mediciones independientes, tratando de replicar las condiciones de caudal y profundidad.

En los datos expuestos en la tabla 10, se omitieron los datos de las velocidades cercanas a la pared. Es decir, una columna de mediciones a cada lado de la sección del canal.

Para la información consignada en la Tabla 12, se utilizaron las dos columnas centrales de datos de velocidades, en la sección del canal. Con este método se buscó aislar la influencia de las paredes, para la obtención de los coeficientes α y β .

Para los casos enunciados en las tablas 8, 10 y 12 también se analizaron las relaciones de α y β con la rugosidad en fondo liso y en fondo rugoso. Esta relación se obtuvo comparando el valor de α y β para cada caudal con la relación de la rugosidad y el radio hidráulico para cada sección generada por cada caudal.

Para cada caso se analizó la relación entre las velocidades puntuales y la velocidad media; teniendo en cuenta la ecuación de Chiu Said.

Finalmente se analizaron las relaciones entre las velocidades medias y máximas con los coeficientes α y β ; y también la relación entre velocidades máxima y media para cada caudal.

Tabla 8. Resumen de los cálculos de α y β por diferentes métodos con todos los valores de la malla

CON TODOS LOS VALORES DE LA MALLA										
Expresión	FONDO LISO					FONDO RUGOSO				
	Caudal [l/s]									
	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
Cálculo de α y β a partir de valores discretos										
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum v^3 \Delta y$	0,994	1,024	1,022	1,023	1,049	1,025	1,034	1,033	1,019	1,035
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum v^2 \Delta y$	0,995	1,016	1,015	1,015	1,032	1,016	1,023	1,022	1,013	1,023
Según Chow										
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0,024	0,021	0,014	0,020	0,028	0,021	0,020	0,029	0,017	0,031
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1,002	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001	1,001	1,002	1,001	1,003
$\beta = 1 + \mu^2$	1,001	1,000	1,000	1,000	1,001	1,000	1,000	1,001	1,000	1,001
Según Chow usando el criterio de Manning										
$R_H = \frac{by}{b + 2y}$	0,073	0,072	0,070	0,070	0,068	0,072	0,071	0,070	0,069	0,067
$\mu = ng^{\frac{1}{2}} R_H^{-\frac{1}{6}}$	0,048	0,049	0,049	0,049	0,049	0,078	0,078	0,078	0,078	0,079
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1,040	1,041	1,041	1,041	1,041	1,099	1,099	1,100	1,100	1,101
$\beta = 1 + \mu^2$	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,038	1,038	1,038	1,038	1,039
Según Cobb(1968) y Hulsing (1966)										
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0,360	0,515	0,507	0,513	0,539	0,515	0,513	0,520	0,514	0,520
Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0,024	0,021	0,014	0,020	0,028	0,021	0,020	0,029	0,017	0,031
$\alpha = e^{0.96\mu}$	1,023	1,020	1,014	1,019	1,028	1,020	1,020	1,028	1,017	1,031
$\beta = e^{0.48\mu} = \sqrt{\alpha}$	1,011	1,010	1,007	1,010	1,014	1,010	1,010	1,014	1,008	1,015

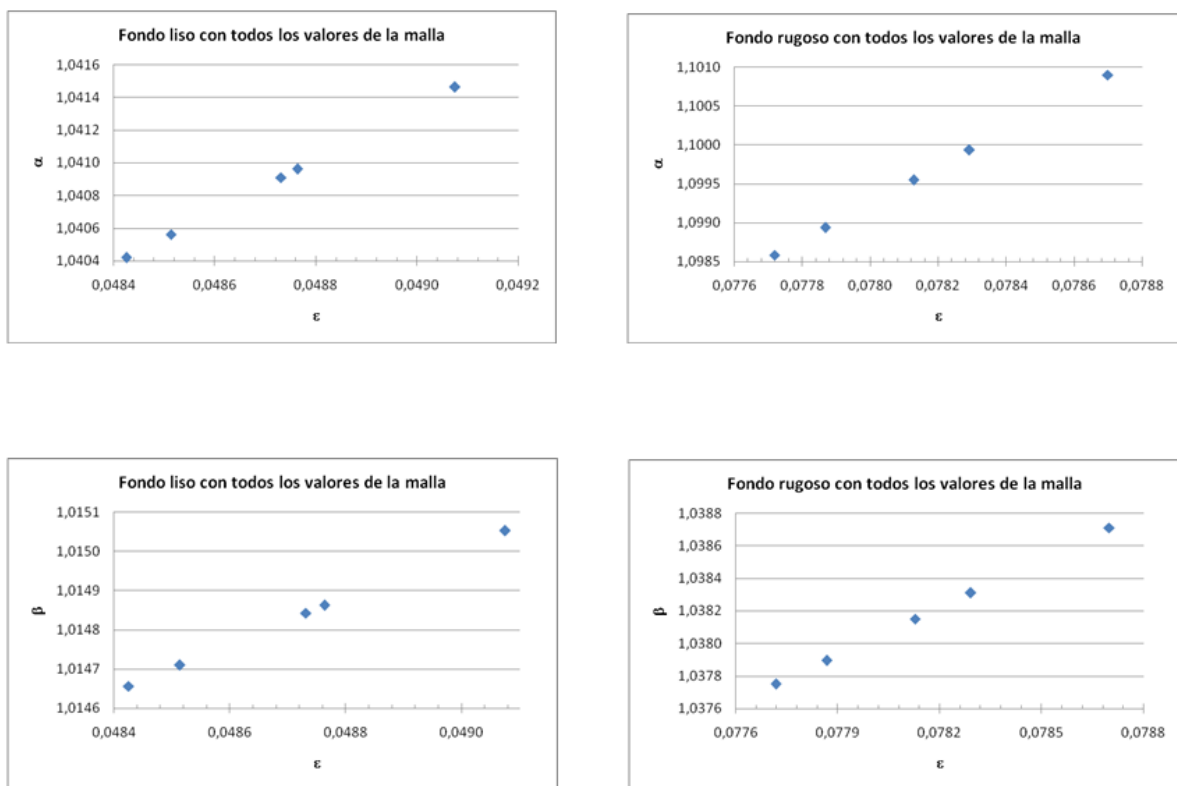


Figura 24. Relación de los coeficientes α y β con ϵ para todos los valores de la malla

Tabla 9. Relaciones entre las velocidades y los valores de M con todos los valores de la malla

CON TODOS LOS VALORES DE LA MALLA										
Expresión	FONDO LISO					FONDO RUGOSO				
	Caudal [l/s]									
	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
Valores experimentales de M a partir de la expresión de Chiu y Said(1994,1995)										
$\frac{V}{V_M}$	0,977	0,979	0,986	0,981	0,972	0,980	0,980	0,972	0,983	0,970
$\frac{V}{V_M} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M}; M =$	42,22	48,14	74,51	53,34	35,79	49,54	48,14	36,19	56,92	32,90

Tabla 10. Resumen de los cálculos de α y β por diferentes métodos sin valores cercanos a la pared

SIN VALORES CERCANOS A LA PARED										
Expresión	FONDO LISO					FONDO RUGOSO				
	Caudal [l/s]									
	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum v^3 \Delta y$	1,146	1,223	1,250	1,241	1,295	1,184	1,210	1,193	1,190	1,216
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum v^2 \Delta y$	1,148	1,199	1,227	1,221	1,256	1,174	1,191	1,180	1,187	1,204
Cálculo de α y β a partir de valores discretos										
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0,035	0,030	0,025	0,027	0,040	0,022	0,026	0,032	0,025	0,030
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1,004	1,003	1,002	1,002	1,005	1,001	1,002	1,003	1,002	1,003
$\beta = 1 + \mu^2$	1,001	1,001	1,001	1,001	1,002	1,000	1,001	1,001	1,001	1,001
Según Chow										
$R_H = \frac{by}{b + 2y}$	0,073	0,072	0,070	0,070	0,068	0,072	0,071	0,070	0,069	0,067
$\mu = ng^{\frac{1}{2}} R_H^{-\frac{1}{6}}$	0,048	0,049	0,049	0,049	0,049	0,078	0,078	0,078	0,078	0,079
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1,040	1,041	1,041	1,041	1,041	1,099	1,099	1,100	1,100	1,101
$\beta = 1 + \mu^2$	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,038	1,038	1,038	1,038	1,039
Según Cobb(1968) y Hulsing (1966)										
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0,011	0,118	0,102	0,091	0,153	0,059	0,099	0,075	0,016	0,057
Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0,035	0,030	0,025	0,027	0,040	0,022	0,026	0,032	0,025	0,030
$\alpha = e^{0.96\mu}$	1,035	1,029	1,024	1,026	1,039	1,021	1,026	1,031	1,024	1,030
$\beta = e^{0.48\mu} = \sqrt{\alpha}$	1,017	1,014	1,012	1,013	1,020	1,011	1,013	1,016	1,012	1,015

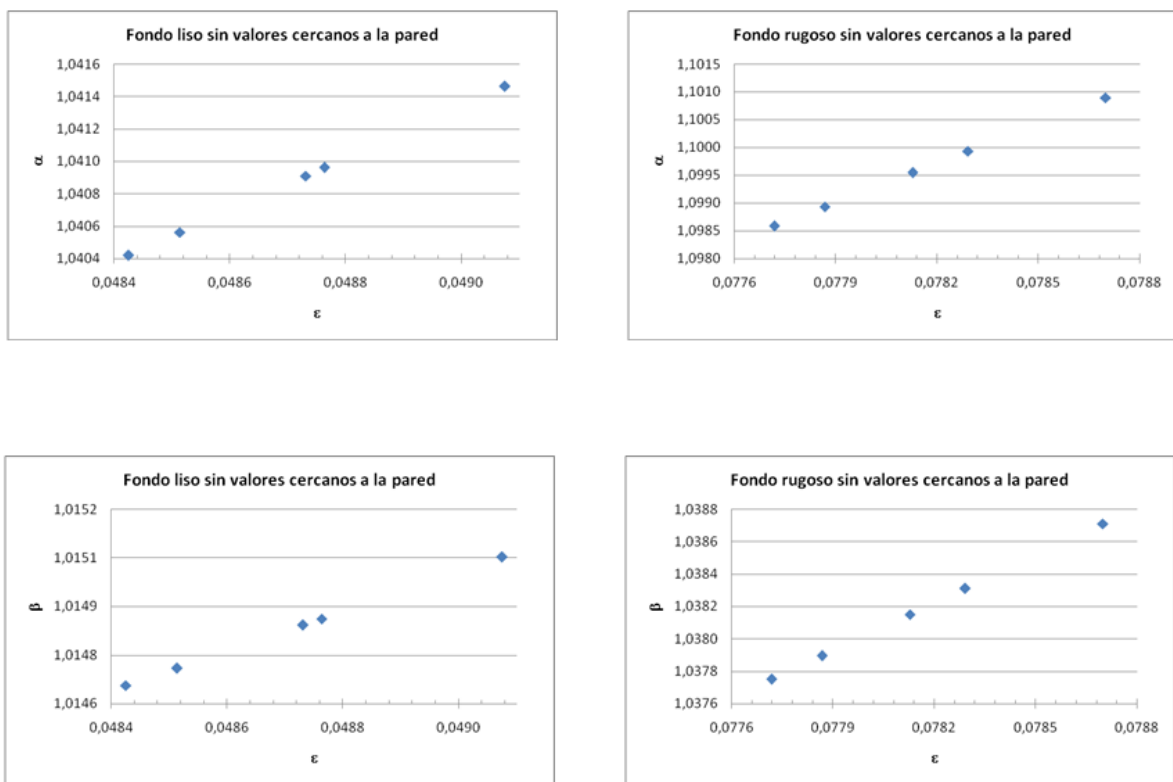


Figura 25. Relación de los coeficientes α y β con ϵ sin valores cercanos a la pared

Tabla 11. Relaciones entre las velocidades y los valores de M sin valores cercanos a la pared

SIN VALORES CERCANOS A LA PARED										
Expresión	FONDO LISO					FONDO RUGOSO				
	Caudal [l/s]									
	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
Valores experimentales de M a partir de la expresión de Chiu y Said(1994,1995)										
$\frac{V}{V_M}$	0,966	0,971	0,975	0,974	0,961	0,978	0,974	0,969	0,976	0,971
$\frac{V}{V_M} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M}; M =$	29,15	33,90	40,03	38,68	25,76	45,12	37,62	32,19	40,03	35,62

Tabla 12. Resumen de los cálculos de α y β por diferentes métodos solo con valores centrales

SOLO CON VALORES CENTRALES										
Expresión	FONDO LISO					FONDO RUGOSO				
	Caudal [l/s]									
	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum v^3 \Delta y$	1,265	1,224	1,256	1,242	1,315	1,196	1,206	1,187	1,184	1,155
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum v^2 \Delta y$	1,227	1,200	1,231	1,222	1,268	1,182	1,188	1,175	1,183	1,163
Cálculo de α y β a partir de valores discretos										
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0,041	0,035	0,027	0,031	0,045	0,028	0,029	0,034	0,029	0,017
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1,005	1,003	1,002	1,003	1,006	1,002	1,002	1,003	1,002	1,001
$\beta = 1 + \mu^2$	1,002	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001	1,001	1,001	1,001	1,000
Según Chow										
$R_H = \frac{by}{b + 2y}$	0,073	0,072	0,070	0,070	0,068	0,072	0,071	0,070	0,069	0,067
$\mu = ng^{\frac{1}{2}} R_H^{-\frac{1}{6}}$	0,048	0,049	0,049	0,049	0,049	0,078	0,078	0,078	0,078	0,079
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1,040	1,041	1,041	1,041	1,041	1,099	1,099	1,100	1,100	1,101
$\beta = 1 + \mu^2$	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,038	1,038	1,038	1,038	1,039
Según Cobb(1968) y Hulsing (1966)										
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0,169	0,119	0,110	0,093	0,172	0,079	0,094	0,064	0,004	0,054
Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0,041	0,035	0,027	0,031	0,045	0,028	0,029	0,034	0,029	0,017
$\alpha = e^{0.96\mu}$	1,041	1,034	1,026	1,030	1,044	1,027	1,028	1,033	1,028	1,017
$\beta = e^{0.48\mu} = \sqrt{\alpha}$	1,020	1,017	1,013	1,015	1,022	1,014	1,014	1,016	1,014	1,008

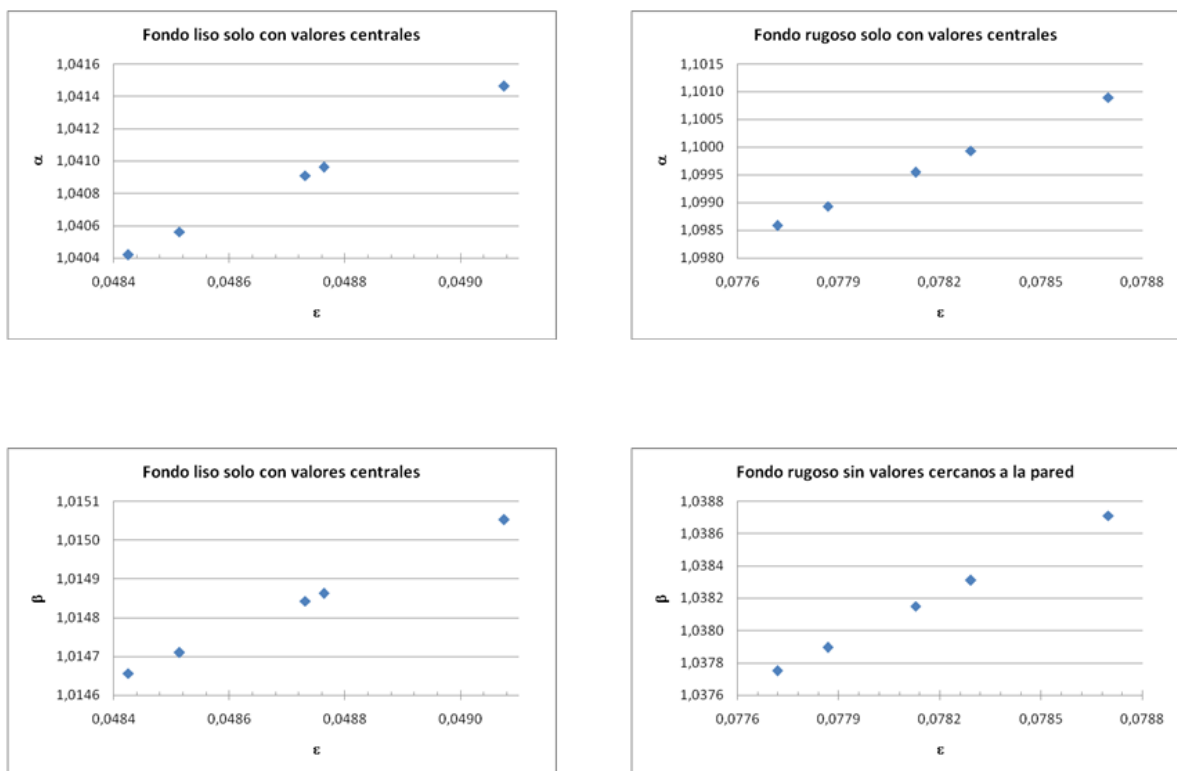


Figura 26. Relación de los coeficientes α y β con ϵ solo con valores centrales

Tabla 13. Relaciones entre las velocidades y los valores de M solo con valores centrales

SOLO CON VALORES CENTRALES										
Expresión	FONDO LISO					FONDO RUGOSO				
	Caudal [l/s]									
	9	8	7	6	5	9	8	7	6	5
Valores experimentales de M a partir de la expresión de Chiu y Said(1994,1995)										
$\frac{V}{V_M}$	0,960	0,967	0,974	0,969	0,957	0,973	0,972	0,968	0,972	0,983
$\frac{V}{V_M} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M}; M =$	24,82	30,06	38,87	32,53	23,04	35,88	35,36	30,36	35,46	56,71

Tabla 14. Relaciones entre las velocidades y los coeficientes α y β para fondo liso

Comparación entre Velocidad media y Coeficiente de Coriolis [α]						
Caudal [l/s]	con todos los valores		sin valores de pared		con valores centrales	
	V_{media} [m/s]	α	V_{media} [m/s]	α	V_{media} [m/s]	α
9	0,2074	0,994	0,2074	1,146	0,2074	1,265
8	0,1986	1,024	0,1986	1,223	0,1986	1,224
7	0,1885	1,022	0,1885	1,250	0,1885	1,256
6	0,1775	1,023	0,1775	1,241	0,1775	1,242
5	0,1617	1,049	0,1617	1,295	0,1617	1,315

Comparación entre Velocidad media y Coeficiente de Boussinesq [β]						
Caudal [l/s]	con todos los valores		sin valores de pared		con valores centrales	
	V_{media} [m/s]	β	V_{media} [m/s]	β	V_{media} [m/s]	β
9	0,2074	0,995	0,2074	1,148	0,2074	1,227
8	0,1986	1,016	0,1986	1,199	0,1986	1,200
7	0,1885	1,015	0,1885	1,227	0,1885	1,231
6	0,1775	1,015	0,1775	1,221	0,1775	1,222
5	0,1617	1,015	0,1617	1,256	0,1617	1,268

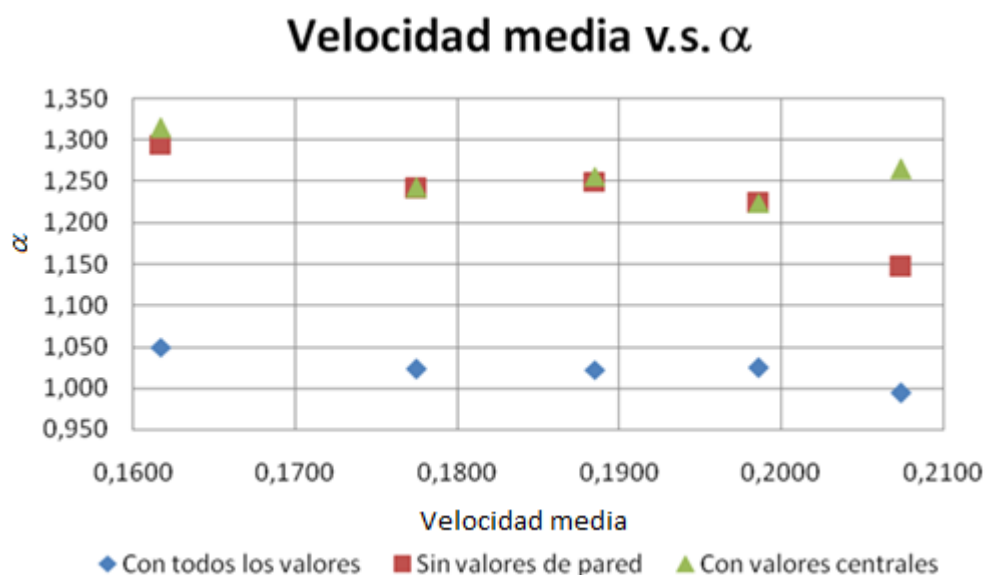


Figura 27. Relación entre velocidad media y α para fondo liso

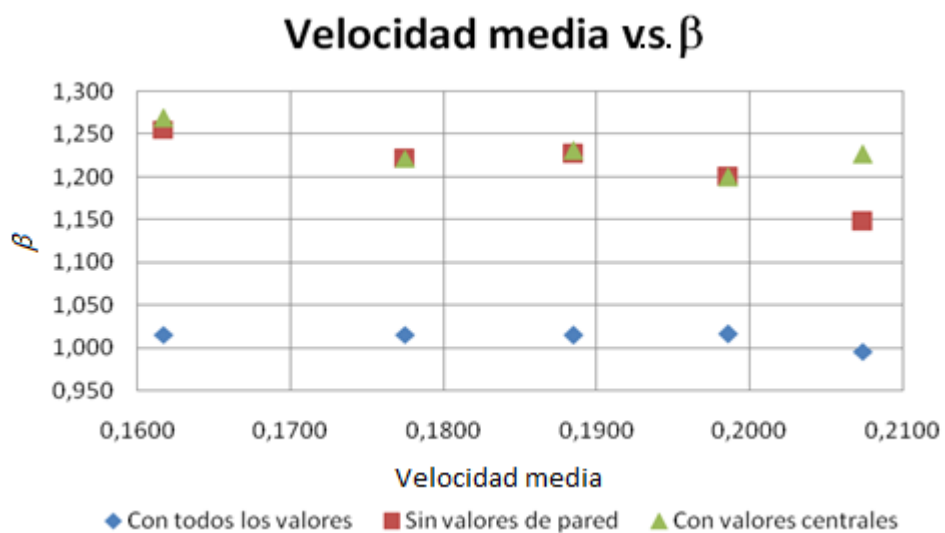


Figura 28. Relación entre velocidad media y β para fondo liso

Del análisis de las gráficas anteriores se puede decir que los valores de los coeficientes de velocidad son homogéneos en los rangos de velocidades estudiados.

Tabla 15. Relaciones entre las velocidades media y máxima para fondo liso

Comparación entre Velocidad media y Velocidad máxima						
Caudal [l/s]	con todos los valores		sin valores de pared		con valores centrales	
	V_{media} [m/s]	$V_{máxima}$ [m/s]	V_{media} [m/s]	$V_{máxima}$ [m/s]	V_{media} [m/s]	$V_{máxima}$ [m/s]
9	0,2074	0,2123	0,2074	0,2148	0,2074	0,2160
8	0,1986	0,2028	0,1986	0,2045	0,1986	0,2055
7	0,1885	0,1912	0,1885	0,1933	0,1885	0,1935
6	0,1775	0,1810	0,1775	0,1823	0,1775	0,1830
5	0,1617	0,1663	0,1617	0,1683	0,1617	0,1690

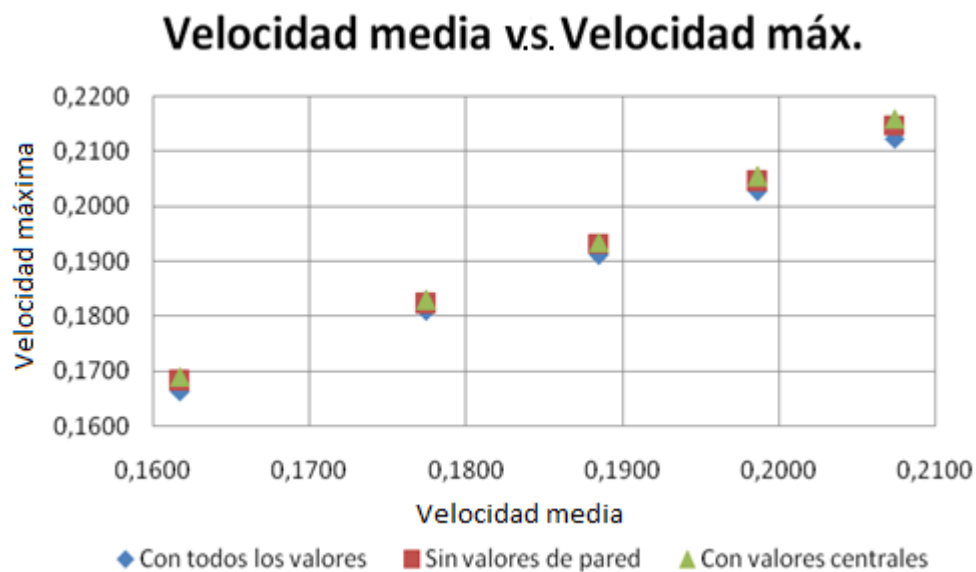


Figura 29. Relación entre velocidad media y velocidad máxima para fondo liso

La relación entre velocidad media y máxima presenta una tendencia lineal y no es afectada por el efecto de pared o fondo; debido a que los valores de la relación se conservan constantes.

Tabla 16. Relaciones entre las velocidades y los coeficientes α y β para fondo rugoso

Comparación entre Velocidad media y Coeficiente de Coriolis [α]						
Caudal [l/s]	con todos los valores		sin valores de pared		con valores centrales	
	V_{media} [m/s]	α	V_{media} [m/s]	α	V_{media} [m/s]	α
9	0,2052	1,025	0,2052	1,184	0,2052	1,196
8	0,1944	1,034	0,1944	1,210	0,1944	1,206
7	0,1795	1,033	0,1795	1,193	0,1795	1,187
6	0,1686	1,019	0,1686	1,190	0,1686	1,184
5	0,1548	1,035	0,1548	1,216	0,1548	1,155

Comparación entre Velocidad media y Coeficiente de Boussinesq [β]						
Caudal [l/s]	con todos los valores		sin valores de pared		con valores centrales	
	V_{media} [m/s]	β	V_{media} [m/s]	β	V_{media} [m/s]	β
9	0,2052	1,016	0,2052	1,174	0,2052	1,182
8	0,1944	1,023	0,1944	1,191	0,1944	1,188
7	0,1795	1,022	0,1795	1,180	0,1795	1,175
6	0,1686	1,013	0,1686	1,187	0,1686	1,183
5	0,1548	1,023	0,1548	1,204	0,1548	1,163

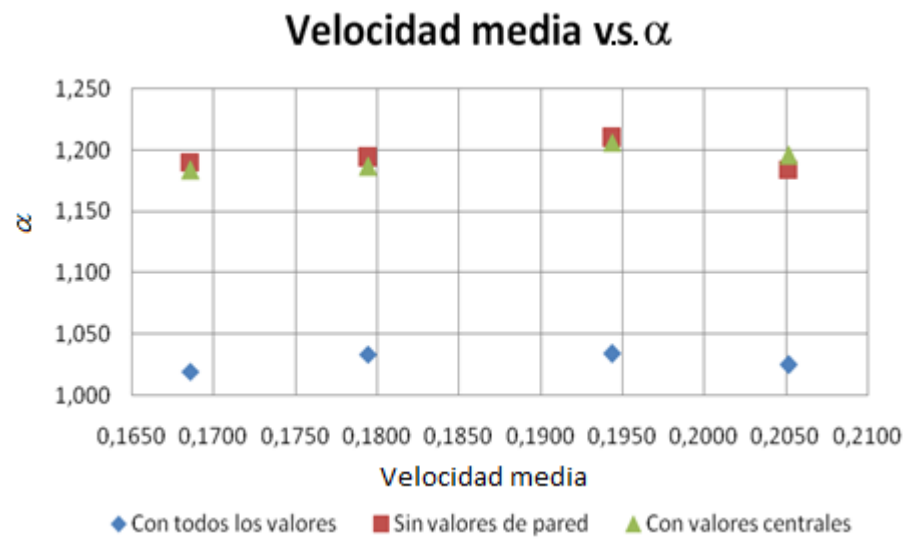


Figura 30. Relación entre velocidad media y α para fondo rugoso

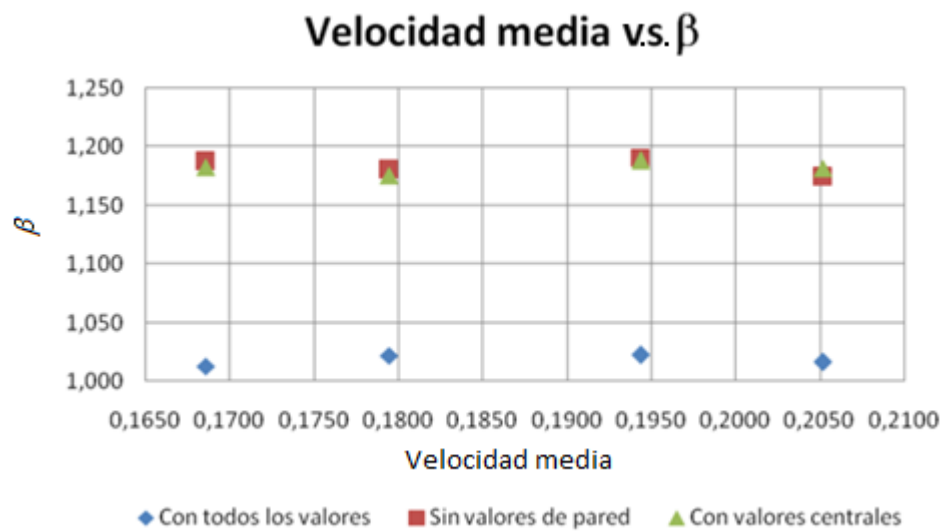


Figura 31. Relación entre velocidad media y β para fondo rugoso

Tabla 17. Relaciones entre las velocidades media y máxima para fondo rugoso

Comparación entre Velocidad media y Velocidad máxima						
Caudal [l/s]	con todos los valores		sin valores de pared		con valores centrales	
	V_{media} [m/s]	$V_{máxima}$ [m/s]	V_{media} [m/s]	$V_{máxima}$ [m/s]	V_{media} [m/s]	$V_{máxima}$ [m/s]
9	0,2052	0,2095	0,2052	0,2098	0,2052	0,2110
8	0,1944	0,1983	0,1944	0,1995	0,1944	0,2000
7	0,1795	0,1847	0,1795	0,1853	0,1795	0,1855
6	0,1686	0,1715	0,1686	0,1728	0,1686	0,1735
5	0,1548	0,1597	0,1548	0,1595	0,1548	0,1575

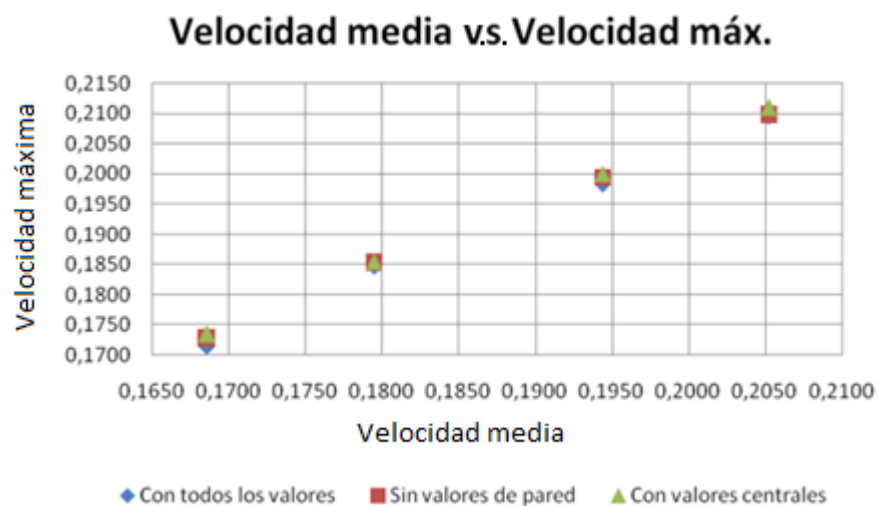


Figura 32. Relación entre velocidad media y velocidad máxima para fondo rugoso

De la comparación de los valores presentados en la tablas y gráficas puede resumirse que:

- Al observar las gráficas de las Isotacas se discierne la existencia de corrientes cruzadas en el caso del fondo rugoso. Es claro que en el canal con fondo liso se obtienen resultados muy confiables y que cuando el canal tiene fondo rugoso se genera una variación tal en las velocidades puntuales que sugieren evaluar estos efectos a futuro.
- En el caso del fondo liso las gráficas de las Isotacas muestran un comportamiento clásico del flujo para un canal rectangular, entendiéndose esto como: velocidad máxima en el centro y disminuyendo hacia el fondo y las paredes del canal.
- Los valores de los coeficientes aumentaron en la medida que se descartaban los valores cercanos a la pared del canal, evidenciando un importante efecto de pared en la estimación de los coeficientes de corrección de velocidad.
- La correlación entre los coeficientes α y β con los resultados de la expresión $\varepsilon = n g^{1/2} R_h^{-1/6}$ suministró una proporción lineal en todos los casos (fondo liso y fondo rugoso), que valida el efecto de la rugosidad del canal en la distribución de velocidades.
- La inclusión del concepto de rugosidad de Manning en los cálculos incrementó significativamente el valor de los coeficientes α y β .
- Los gráficos que señalan la variación de los coeficientes de velocidad respecto a la velocidad media, sugieren dada la consistencia de su tendencia, que pueden utilizarse en términos prácticos para la determinación de los coeficientes de corrección de velocidad. Así mismo, la consistencia en la relación entre la velocidad media y la velocidad máxima sugiere que a partir de procedimientos hidrométricos se calculen los coeficientes α y β a partir de la medición de la velocidad máxima del canal.

6. CONCLUSIONES

En la determinación de los coeficientes de corrección de velocidad α y β para el canal de laboratorio de la universidad EAFIT, puede concluirse que:

- Como se observa de las figuras de las isotacas para las condiciones de flujo sobre fondo en acrílico, la distribución de velocidad presenta asimetría en la región derecha del flujo lo cual indica la presencia de un chorro o una corriente secundaria en el canal. Se considera que la existencia de esta se debe a un efecto combinado de irregularidades presentes en el canal así como a perturbaciones inducidas desde el sistema de alimentación del canal.
- A partir de los tres conjuntos de datos considerados para los cálculos y los análisis, se ha verificado el efecto de la pared en la distribución de velocidades tanto para el flujo con fondo liso como en el caso del fondo rugoso modificando las magnitudes de las velocidades puntuales, y con ello la representación de las isotacas y de los coeficientes de corrección de velocidad α y β . Aunque no era un objetivo específico del trabajo relacionar los coeficientes α y β con un factor de fricción, este hecho permite validar tanto la metodología como los resultados obtenidos.
- En la determinación de los coeficientes de corrección α y β , se encontró que los valores puntuales de la velocidad medidos no permitieron encontrar total consistencia en los resultados obtenidos, puesto que uno de los conjuntos de datos analizados arrojó resultados para los coeficientes por fuera de su dominio natural (valores menores a 1 para α y β en el primer conjunto de datos), además no fue posible establecer una relación directa entre los flujos de energía y momentum con la magnitud del caudal o la velocidad media del flujo.

- El uso de expresiones para el cálculo de α y β en términos de las velocidades máxima y media en el canal para las distintas configuraciones de medición arrojó resultados satisfactorios. Así mismo los gráficos presentados siguen las tendencias encontradas en otros trabajos, por lo cual se considera que los valores de la velocidad media y máxima pueden resultar mas convenientes en términos prácticos para el cálculo de los coeficientes α y β , en lugar de usar la función de la distribución de la velocidad, que sin duda es un procedimiento mas dispendioso de realizar.
- En lo que se refiere a los valores determinados para los coeficientes α y β , se considera que los mejores valores calculados corresponden a los que se presentan en la Tabla 8, es decir, aquellos obtenidos al utilizar todas las velocidades puntuales.
- Como herramienta práctica para la determinación de los coeficientes de corrección de velocidad en el laboratorio se propone utilizar las expresiones presentadas en las Figuras 15 y 16, que permiten calcular α y β en términos del número de Froude.

7. RECOMENDACIONES

El trabajo experimental desarrollado permitió cumplir con los objetivos planteados al inicio del trabajo en lo referente al cálculo de los coeficientes de corrección de velocidad para el canal de laboratorio de la universidad de EAFIT. Sin embargo, diferentes aspectos técnicos deben ser mejorados si se desean realizar mejores prácticas docentes e investigativas de la hidráulica experimental.

En primera instancia, el rango de caudales cubierto en este trabajo es pequeño con lo cual sería deseable realizar las acciones que permitan contar con un rango de caudales más amplio sin tener inconvenientes en la oscilación del nivel del tanque de carga.

Así mismo, la medición de la velocidad con correntómetro perturba el campo real del flujo del canal de laboratorio, con lo cual se hace necesario disponer de equipos de medición de velocidad que utilicen el efecto doppler como principio físico, como se realiza en los laboratorios más modernos de hidráulica con el objeto no solo de contar con mediciones muy confiables si no con la posibilidad de optimizar el tiempo de medición y captura de datos.

Se ha verificado desde la experimentación, el efecto de la fricción de la pared y como éste afecta la distribución de velocidades del canal. Sin embargo por las limitaciones expuestas, la cuantificación de dicho efecto es errática y debe ser evaluada en futuros trabajos. Así mismo, se propone que el canal de laboratorio permita utilizar provisionalmente otro tipo de secciones transversales dentro del canal con el objeto de presentar trabajos más generales.

BIBLIOGRAFÍA

Cadavid, Juan Hernando. Hidráulica de Canales: Fundamentos. Editorial Eafit, 2006.

Chiu, C.L. -Application of Entropy Concept in Open-Channel Flow Study. J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(5), 615-628, 1991.

Chiu, C.L.- Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. J. Hydr. Engrg., ASCE, 114(7), 738-756, 1988.

Chiu, C.L. - Velocity distribution in open channel flow. J. Hydr. Engrg., ASCE, 115(5), 576-594, 1989.

Chow, V.T. Open channel hydraulics. McGraw-Hill Book Company: New York, 1959.

Stoker, J. J. Water waves, Vol. IV de *Pure and Applied Mathematics*, Interscience Publishers, Inc., New York, 1957.

Julien, Pierre. Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press, 1998, pp. 280.

Li, Hager. Correction coefficients for uniform channel flow. Canadian journal of civil engineering, 18, 156-158, 1991.

Liggett. Critical depth, velocity profiles and averaging. Journal of irrigation and drainage engineering. 119. 416-422, 1993.

Rouse Hunter, Ince Simon. History of Hydraulics. Dover Publications. New York, Inc. 269 p, 1957.

Seckin, Galip. Experimental investigation of kinetic energy and momentum correction coefficients in open channels. Scientific Research and Essay Vol. 4 (5) pp. 473-478, April, 2009.

Streeter VL, Wylie EB. Fluid Mechanics. McGraw-Hill, New York, 1979.

Walker, J. F. "General Two-Point Method for Determining Velocity in Open Channel."
Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 7, pp. 801-805, 1988.

ANEXOS

Anexo 1: Primera campaña de toma de datos

Medición con fondo rugoso, caudal 18,8 [l/s]						
Profundidad 0,175 m, ancho 0.30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,170	0,273	0,302	0,316	0,320	0,325	0,316
0,150	0,277	0,296	0,296	0,296	0,302	0,302
0,130	0,287	0,292	0,302	0,296	0,302	0,302
0,110	0,287	0,296	0,296	0,292	0,296	0,302
0,090	0,282	0,282	0,296	0,296	0,302	0,302
0,070	0,277	0,282	0,287	0,296	0,296	0,296
0,050	0,273	0,273	0,287	0,292	0,296	0,296
0,030	0,253	0,249	0,273	0,277	0,292	0,287
Promedio	0,2919					
V. media	0,3581					

Medición con fondo rugoso, caudal 15 [l/s]						
Profundidad 0,165 m, ancho 0.30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,170	0,216	0,245	0,259	0,263	0,263	0,259
0,150	0,245	0,263	0,267	0,273	0,273	0,273
0,130	0,253	0,267	0,267	0,267	0,267	0,273
0,110	0,259	0,263	0,267	0,267	0,273	0,267
0,090	0,253	0,267	0,263	0,263	0,267	0,267
0,070	0,253	0,253	0,263	0,263	0,267	0,267
0,050	0,245	0,249	0,253	0,259	0,267	0,263
0,030	0,235	0,230	0,239	0,249	0,253	0,253
Promedio	0,2590					
V. media	0,3030					

Medición con fondo rugoso, caudal 13,5 [l/s]						
Profundidad 0,155 m, 0.30 m, sin compuerta y control aguas abajo posición del canal 4						
	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,170	0,196	0,220	0,230	0,235	0,230	0,230
0,150	0,235	0,253	0,263	0,263	0,263	0,259
0,130	0,239	0,253	0,253	0,253	0,253	0,253
0,110	0,245	0,245	0,249	0,253	0,259	0,253
0,090	0,239	0,253	0,253	0,253	0,253	0,253
0,070	0,239	0,235	0,249	0,249	0,253	0,249
0,050	0,230	0,230	0,239	0,245	0,249	0,249
0,030	0,216	0,216	0,225	0,235	0,245	0,239
Promedio	0,2434					
V. media	0,2903					

Medición con fondo rugoso, caudal 12 [l/s]						
Profundidad 0,155 m, 0.30 m, sin compuerta y control aguas abajo posición del canal 4						
	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,170	0,173	0,192	0,206	0,202	0,220	0,216
0,150	0,220	0,235	0,249	0,253	0,253	0,249
0,130	0,225	0,23	0,23	0,23	0,235	0,239
0,110	0,225	0,225	0,230	0,230	0,235	0,239
0,090	0,220	0,225	0,230	0,230	0,235	0,239
0,070	0,216	0,220	0,230	0,230	0,235	0,239
0,050	0,216	0,216	0,225	0,230	0,235	0,235
0,030	0,202	0,206	0,210	0,220	0,230	0,225
Promedio	0,2258					
V. media	0,2581					

Medición con fondo rugoso, caudal 10,55 [l/s]						
Profundidad 0,145 m, 0.30 m, sin compuerta y control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,170						
0,150	0,183	0,211	0,225	0,206	0,202	0,189
0,130	0,211	0,216	0,216	0,23	0,23	0,23
0,110	0,216	0,216	0,216	0,230	0,230	0,225
0,090	0,216	0,216	0,216	0,235	0,230	0,225
0,070	0,211	0,211	0,216	0,230	0,230	0,220
0,050	0,202	0,202	0,211	0,220	0,225	0,220
0,030	0,197	0,193	0,197	0,206	0,211	0,211
Promedio	0,2151					
V. media	0,2425					

Medición con fondo rugoso, caudal 9,95 [l/s]						
Profundidad 0,145 m, 0.30 m, sin compuerta y control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,170						
0,150	0,152	0,183	0,193	0,211	0,211	0,206
0,130	0,206	0,216	0,211	0,211	0,211	0,216
0,110	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211	0,216
0,090	0,206	0,206	0,206	0,211	0,216	0,211
0,070	0,202	0,202	0,206	0,216	0,216	0,216
0,050	0,197	0,197	0,202	0,211	0,216	0,216
0,030	0,189	0,189	0,193	0,202	0,211	0,206
Promedio	0,2057					
V. media	0,2287					

Medición con fondo rugoso, caudal 8 [l/s]						
Profundidad 0,135 m, 0.30 m, sin compuerta y control aguas abajo posición del canal 4						
	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130	0,179	0,193	0,197	0,193	0,193	0,183
0,110	0,189	0,193	0,202	0,206	0,202	0,193
0,090	0,189	0,197	0,197	0,202	0,202	0,197
0,070	0,193	0,197	0,202	0,202	0,202	0,197
0,050	0,189	0,197	0,197	0,197	0,202	0,197
0,030	0,183	0,189	0,183	0,193	0,183	0,183
Promedio	0,1943					
V. media	0,1975					

Medición con fondo rugoso, caudal 6,5 [l/s]						
Profundidad 0,130 m, 0.30 m, sin compuerta y control aguas abajo posición del canal 4						
	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,110	0,169	0,175	0,179	0,183	0,179	0,175
0,090	0,169	0,183	0,183	0,183	0,183	0,179
0,070	0,175	0,179	0,183	0,183	0,183	0,183
0,050	0,169	0,179	0,179	0,179	0,183	0,179
0,030	0,165	0,175	0,165	0,169	0,169	0,169
Promedio	0,1769					
V. media	0,1667					

Medición con fondo rugoso, caudal 5,15 [l/s]						
Profundidad 0,125 m, 0.30 m, sin compuerta y control aguas abajo posición del canal 4						
	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,110	0,147	0,152	0,152	0,152	0,156	0,156
0,090	0,147	0,152	0,147	0,152	0,156	0,156
0,070	0,152	0,147	0,147	0,152	0,152	0,156
0,050	0,142	0,142	0,142	0,152	0,156	0,156
0,030	0,138	0,138	0,128	0,138	0,152	0,152
Promedio	0,1489					
V. media	0,1373					

Anexo 2: Segunda campaña de toma de datos

Medición con fondo liso, caudal 9 [l/s]						
Profundidad 0,143 m, ancho 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad [m/s]					
0,130	0,185	0,205	0,214	0,212	0,209	0,201
0,110	0,204	0,208	0,209	0,214	0,214	0,209
0,090	0,205	0,211	0,216	0,216	0,216	0,209
0,070	0,206	0,211	0,216	0,216	0,216	0,209
0,050	0,204	0,209	0,211	0,216	0,169	0,208
0,030	0,197	0,205	0,206	0,206	0,204	0,201
Promedio	0,2074					

Promedio con todos los valores			Promedio sin valores de pared		
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]		Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	
0,130	0,204	$R_H = 0,073$	0,130	0,210	$R_H = 0,073$
0,110	0,210	$\varepsilon = 0,41\%$	0,110	0,211	$\varepsilon = 1,44\%$
0,090	0,212	$\alpha = 0,994$	0,090	0,215	$\alpha = 1,146$
0,070	0,212	$\beta = 0,995$	0,070	0,215	$\beta = 1,148$
0,050	0,203	$\mu = 0,024$	0,050	0,201	$\mu = 0,035$
0,030	0,203	$\alpha_\mu = 1,001$	0,030	0,205	$\alpha_\mu = 1,001$
		$V/V_M = 0,977$			$V/V_M = 0,966$
		$V/V_M = 0,976$			$V/V_M = 0,966$
		$M = 42,228$			$M = 29,151$

Promedio con valores centrales		
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	
0,130	0,213	$R_H = 0,073$
0,110	0,212	$\varepsilon = 3,17\%$
0,090	0,216	$\alpha = 1,265$
0,070	0,216	$\beta = 1,227$
0,050	0,214	$\mu = 0,041$
0,030	0,206	$\alpha_\mu = 1,002$
		$V/V_M = 0,960$
		$V/V_M = 0,960$
		$M = 24,827$

Medición con fondo liso, caudal 8 [l/s]						
Profundidad 0,140 m, ancho 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad [m/s]					
0,130	0,184	0,197	0,202	0,201	0,201	0,182
0,110	0,193	0,195	0,201	0,204	0,206	0,201
0,090	0,194	0,201	0,204	0,205	0,205	0,199
0,070	0,197	0,202	0,205	0,206	0,205	0,202
0,050	0,194	0,201	0,201	0,202	0,205	0,197
0,030	0,189	0,191	0,194	0,197	0,195	0,193
Promedio	0,1986					

Promedio con todos los valores		$R_H = 0,072$ $\varepsilon = 0,55\%$ $\alpha = 1,024$ $\beta = 1,016$ $\mu = 0,021$ $\alpha_\mu = 1,000$ $V/V_M = 0,979$ $V/V_M = 0,979$ $M = 48,149$	Promedio sin valores de pared		$R_H = 0,072$ $\varepsilon = 1,92\%$ $\alpha = 1,223$ $\beta = 1,199$ $\mu = 0,030$ $\alpha_\mu = 1,001$ $V/V_M = 0,971$ $V/V_M = 0,971$ $M = 33,900$
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]		Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	
0,130	0,195		0,130	0,200	
0,110	0,200		0,110	0,202	
0,090	0,201		0,090	0,204	
0,070	0,203		0,070	0,205	
0,050	0,200		0,050	0,202	
0,030	0,193		0,030	0,194	

Promedio con valores centrales		$R_H = 0,072$ $\varepsilon = 2,25\%$ $\alpha = 1,224$ $\beta = 1,200$ $\mu = 0,035$ $\alpha_\mu = 1,001$ $V/V_M = 0,967$ $V/V_M = 0,967$ $M = 30,067$
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	
0,130	0,202	
0,110	0,203	
0,090	0,205	
0,070	0,206	
0,050	0,202	
0,030	0,196	

Medición con fondo liso, caudal 7 [l/s]						
Profundidad 0,133 m, ancho 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad [m/s]					
0,130						
0,110	0,178	0,187	0,191	0,193	0,193	0,190
0,090	0,183	0,191	0,193	0,193	0,193	0,189
0,070	0,185	0,193	0,194	0,193	0,193	0,189
0,050	0,185	0,190	0,193	0,191	0,193	0,185
0,030	0,179	0,182	0,183	0,187	0,187	0,179
Promedio	0,1885					

Promedio con todos los valores				Promedio sin valores de pared			
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,070	Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,070
0,130		$\varepsilon =$	0,75%	0,130		$\varepsilon =$	1,92%
0,110	0,189	$\alpha =$	1,022	0,110	0,191	$\alpha =$	1,250
0,090	0,190	$\beta =$	1,015	0,090	0,193	$\beta =$	1,227
0,070	0,191	$\mu =$	0,014	0,070	0,193	$\mu =$	0,025
0,050	0,190	$\alpha_\mu =$	1,000	0,050	0,192	$\alpha_\mu =$	1,001
0,030	0,183	$V/V_M =$	0,986	0,030	0,185	$V/V_M =$	0,975
		$V/V_M =$	0,987			$V/V_M =$	0,975
		$M =$	74,511			$M =$	40,031

Promedio con valores centrales			
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,070
0,130		$\varepsilon =$	2,19%
0,110	0,192	$\alpha =$	1,256
0,090	0,193	$\beta =$	1,231
0,070	0,194	$\mu =$	0,027
0,050	0,192	$\alpha_\mu =$	1,001
0,030	0,185	$V/V_M =$	0,974
		$V/V_M =$	0,974
		$M =$	38,874

Medición con fondo liso, caudal 6 [l/s]						
Profundidad 0,132 m, ancho 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad [m/s]					
0,130						
0,110	0,165	0,173	0,179	0,179	0,179	0,175
0,090	0,173	0,179	0,182	0,183	0,183	0,178
0,070	0,175	0,180	0,183	0,183	0,183	0,182
0,050	0,173	0,178	0,179	0,180	0,183	0,178
0,030	0,169	0,173	0,179	0,175	0,175	0,169
Promedio	0,1775					

Promedio con todos los valores		$R_H =$ $\varepsilon =$ $\alpha =$ $\beta =$ $\mu =$ $\alpha_\mu =$ $V/V_M =$ $V/V_M =$ $M =$	0,070 0,59% 1,023 1,015 0,020 1,000 0,981 0,981 53,344
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]		
0,130			
0,110	0,175		
0,090	0,180		
0,070	0,181		
0,050	0,179		
0,030	0,173		

Promedio sin valores de pared		$R_H =$ $\varepsilon =$ $\alpha =$ $\beta =$ $\mu =$ $\alpha_\mu =$ $V/V_M =$ $V/V_M =$ $M =$	0,070 1,62% 1,241 1,221 0,027 1,001 0,974 0,974 38,682
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]		
0,130			
0,110	0,178		
0,090	0,182		
0,070	0,182		
0,050	0,180		
0,030	0,176		

Promedio con valores centrales		$R_H =$ $\varepsilon =$ $\alpha =$ $\beta =$ $\mu =$ $\alpha_\mu =$ $V/V_M =$ $V/V_M =$ $M =$	0,070 1,97% 1,242 1,222 0,031 1,001 0,970 0,969 32,532
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]		
0,130			
0,110	0,179		
0,090	0,183		
0,070	0,183		
0,050	0,180		
0,030	0,177		

Medición con fondo liso, caudal 5 [l/s]						
Profundidad 0,123 m, ancho 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad [m/s]					
0,130						
0,110	0,142	0,154	0,159	0,159	0,153	0,144
0,090	0,159	0,167	0,169	0,168	0,169	0,165
0,070	0,162	0,165	0,169	0,169	0,169	0,164
0,050	0,159	0,165	0,167	0,169	0,168	0,162
0,030	0,156	0,159	0,159	0,165	0,161	0,156
Promedio	0,1617					

Promedio con todos los valores				Promedio sin valores de pared			
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,068	Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,068
0,130		$\varepsilon =$	0,37%	0,130		$\varepsilon =$	1,98%
0,110	0,152	$\alpha =$	1,049	0,110	0,156	$\alpha =$	1,295
0,090	0,166	$\beta =$	1,032	0,090	0,168	$\beta =$	1,256
0,070	0,166	$\mu =$	0,028	0,070	0,168	$\mu =$	0,040
0,050	0,165	$\alpha_\mu =$	1,001	0,050	0,167	$\alpha_\mu =$	1,002
0,030	0,159	$V/V_M =$	0,972	0,030	0,161	$V/V_M =$	0,961
		$V/V_M =$	0,972			$V/V_M =$	0,961
		$M =$	35,791			$M =$	25,760

Promedio con valores centrales			
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,068
0,130		$\varepsilon =$	2,72%
0,110	0,159	$\alpha =$	1,315
0,090	0,169	$\beta =$	1,268
0,070	0,169	$\mu =$	0,045
0,050	0,168	$\alpha_\mu =$	1,002
0,030	0,162	$V/V_M =$	0,957
		$V/V_M =$	0,957
		$M =$	23,040

Medición con fondo rugoso, caudal 9 [l/s]						
Profundidad 0,138 m, 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130	0,193	0,204	0,209	0,213	0,211	0,210
0,110	0,205	0,209	0,209	0,209	0,212	0,213
0,090	0,202	0,205	0,208	0,211	0,212	0,216
0,070	0,200	0,205	0,207	0,212	0,212	0,214
0,050	0,199	0,199	0,203	0,209	0,209	0,210
0,030	0,188	0,185	0,193	0,195	0,195	0,202
Promedio	0,2052					

Promedio con todos los valores			Promedio sin valores de pared		
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]		Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	
0,130	0,207	$R_H = 0,072$	0,130	0,209	$R_H = 0,072$
0,110	0,210	$\varepsilon = 1,19\%$	0,110	0,210	$\varepsilon = 1,55\%$
0,090	0,209	$\alpha = 1,025$	0,090	0,209	$\alpha = 1,184$
0,070	0,208	$\beta = 1,016$	0,070	0,209	$\beta = 1,174$
0,050	0,205	$\mu = 0,021$	0,050	0,205	$\mu = 0,022$
0,030	0,193	$\alpha_\mu = 1,000$	0,030	0,192	$\alpha_\mu = 1,000$
		$V/V_M = 0,980$			$V/V_M = 0,978$
		$V/V_M = 0,980$			$V/V_M = 0,978$
		$M = 49,540$			$M = 45,120$

Promedio con valores centrales		
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	
0,130	0,211	$R_H = 0,072$
0,110	0,209	$\varepsilon = 1,84\%$
0,090	0,210	$\alpha = 1,196$
0,070	0,210	$\beta = 1,182$
0,050	0,206	$\mu = 0,028$
0,030	0,194	$\alpha_\mu = 1,001$
		$V/V_M = 0,973$
		$V/V_M = 0,972$
		$M = 35,882$

Medición con fondo rugoso, caudal 8 [l/s]						
Profundidad 0,135 m, 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130	0,173	0,191	0,196	0,198	0,203	0,195
0,110	0,191	0,196	0,198	0,202	0,202	0,200
0,090	0,192	0,197	0,197	0,200	0,202	0,202
0,070	0,191	0,196	0,198	0,199	0,203	0,200
0,050	0,189	0,192	0,195	0,197	0,201	0,200
0,030	0,179	0,181	0,181	0,187	0,186	0,188
Promedio	0,1944					

Promedio con todos los valores			Promedio sin valores de pared		
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]		Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	
0,130	0,193	$R_H = 0,071$	0,130	0,197	$R_H = 0,0711$
0,110	0,198	$\varepsilon = 1,10\%$	0,110	0,200	$\varepsilon = 1,93\%$
0,090	0,198	$\alpha = 1,034$	0,090	0,199	$\alpha = 1,210$
0,070	0,198	$\beta = 1,023$	0,070	0,199	$\beta = 1,191$
0,050	0,196	$\mu = 0,020$	0,050	0,196	$\mu = 0,026$
0,030	0,184	$\alpha_\mu = 1,000$	0,030	0,184	$\alpha_\mu = 1,001$
		$V/V_M = 0,980$			$V/V_M = 0,974$
		$V/V_M = 0,979$			$V/V_M = 0,973$
		$M = 48,149$			$M = 37,629$

Promedio con valores centrales		
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	
0,130	0,197	$R_H = 0,0711$
0,110	0,200	$\varepsilon = 1,86\%$
0,090	0,199	$\alpha = 1,206$
0,070	0,199	$\beta = 1,188$
0,050	0,196	$\mu = 0,029$
0,030	0,184	$\alpha_\mu = 1,001$
		$V/V_M = 0,972$
		$V/V_M = 0,972$
		$M = 35,364$

Medición con fondo rugoso, caudal 7,03 [l/s]						
Profundidad 0,130 m, 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130	0,161	0,170	0,176	0,180	0,185	0,177
0,110	0,178	0,184	0,185	0,186	0,186	0,189
0,090	0,179	0,182	0,181	0,184	0,186	0,187
0,070	0,179	0,179	0,179	0,184	0,185	0,183
0,050	0,176	0,179	0,176	0,184	0,183	0,187
0,030	0,167	0,165	0,170	0,174	0,176	0,179
Promedio	0,1795					

Promedio con todos los valores				Promedio sin valores de pared			
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,070	Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,070
0,130	0,175	$\varepsilon =$	0,85%	0,130	0,178	$\varepsilon =$	1,24%
0,110	0,185	$\alpha =$	1,033	0,110	0,185	$\alpha =$	1,193
0,090	0,183	$\beta =$	1,022	0,090	0,183	$\beta =$	1,180
0,070	0,182	$\mu =$	0,029	0,070	0,182	$\mu =$	0,032
0,050	0,181	$\alpha_\mu =$	1,001	0,050	0,181	$\alpha_\mu =$	1,001
0,030	0,172	$V/V_M =$	0,972	0,030	0,171	$V/V_M =$	0,969
		$V/V_M =$	0,972			$V/V_M =$	0,969
		$M =$	36,192			$M =$	32,192

Promedio con valores centrales			
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,070
0,130	0,178	$\varepsilon =$	1,13%
0,110	0,186	$\alpha =$	1,187
0,090	0,183	$\beta =$	1,175
0,070	0,182	$\mu =$	0,034
0,050	0,180	$\alpha_\mu =$	1,001
0,030	0,172	$V/V_M =$	0,968
		$V/V_M =$	0,967
		$M =$	30,367

Medición con fondo rugoso, caudal 6 [l/s]						
Profundidad 0,127 m, 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130						
0,110	0,162	0,171	0,173	0,174	0,173	0,175
0,090	0,168	0,171	0,171	0,171	0,173	0,175
0,070	0,169	0,168	0,170	0,171	0,173	0,175
0,050	0,167	0,165	0,166	0,168	0,171	0,173
0,030	0,161	0,156	0,156	0,161	0,163	0,168
Promedio	0,1686					

Promedio con todos los valores		$R_H =$	0,069	Promedio sin valores de pared		$R_H =$	0,069
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$\varepsilon =$	1,15%	Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$\varepsilon =$	1,16%
0,130		$\alpha =$	1,019	0,130		$\alpha =$	1,190
0,110	0,171	$\beta =$	1,013	0,110	0,173	$\beta =$	1,187
0,090	0,172	$\mu =$	0,017	0,090	0,172	$\mu =$	0,025
0,070	0,171	$\alpha_\mu =$	1,000	0,070	0,171	$\alpha_\mu =$	1,001
0,050	0,168	$V/V_M =$	0,983	0,050	0,168	$V/V_M =$	0,976
0,030	0,161	$V/V_M =$	0,982	0,030	0,159	$V/V_M =$	0,975
		$M =$	56,921			$M =$	40,031

Promedio con valores centrales		$R_H =$	0,069
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$\varepsilon =$	1,13%
0,130		$\alpha =$	1,184
0,110	0,174	$\beta =$	1,183
0,090	0,171	$\mu =$	0,029
0,070	0,171	$\alpha_\mu =$	1,001
0,050	0,167	$V/V_M =$	0,972
0,030	0,159	$V/V_M =$	0,972
		$M =$	35,469

Medición con fondo rugoso, caudal 5,04 [l/s]						
Profundidad 0,120 m, 0,30 m, control aguas abajo posición del canal 4						
Profundidad [m]	Ancho [m]					
	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130						
0,110	0,141	0,150	0,149	0,156	0,161	0,156
0,090	0,156	0,161	0,156	0,159	0,162	0,164
0,070	0,156	0,156	0,152	0,157	0,164	0,162
0,050	0,152	0,153	0,147	0,158	0,164	0,161
0,030	0,146	0,142	0,138	0,153	0,156	0,156
Promedio	0,1548					

Promedio con todos los valores				Promedio sin valores de pared			
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,067	Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,067
0,130		$\varepsilon =$	1,02%	0,130		$\varepsilon =$	1,14%
0,110	0,152	$\alpha =$	1,035	0,110	0,154	$\alpha =$	1,216
0,090	0,160	$\beta =$	1,023	0,090	0,160	$\beta =$	1,204
0,070	0,158	$\mu =$	0,031	0,070	0,157	$\mu =$	0,030
0,050	0,156	$\alpha_\mu =$	1,001	0,050	0,156	$\alpha_\mu =$	1,001
0,030	0,149	$V/V_M =$	0,970	0,030	0,147	$V/V_M =$	0,971
		$V/V_M =$	0,970			$V/V_M =$	0,972
		$M =$	32,907			$M =$	35,628

Promedio con valores centrales			
Profundidad [m]	Velocidad [m/s]	$R_H =$	0,067
0,130		$\varepsilon =$	-0,36%
0,110	0,153	$\alpha =$	1,155
0,090	0,158	$\beta =$	1,163
0,070	0,155	$\mu =$	0,017
0,050	0,153	$\alpha_\mu =$	1,000
0,030	0,146	$V/V_M =$	0,983
		$V/V_M =$	0,982
		$M =$	56,719

Comparación porcentual entre resultados por diferentes métodos

	CON TODOS LOS VALORES DE LA MALLA										PROMEDIO
	Según Chow										
α	1%	2%	2%	2%	5%	2%	3%	3%	2%	3%	3%
β	1%	2%	1%	1%	3%	2%	2%	2%	1%	2%	2%
	Según Chow usando el criterio de Manning										
α	5%	2%	2%	2%	1%	7%	6%	6%	8%	6%	4%
β	2%	0%	0%	0%	2%	2%	1%	2%	3%	2%	1%
	Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
α	3%	0%	1%	0%	2%	0%	1%	1%	0%	0%	1%
β	2%	1%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	0%	1%	1%
	SIN VALORES CERCANOS A LA PARED										
	Según Chow										
α	21%	22%	25%	24%	29%	70%	73%	70%	80%	83%	50%
β	19%	20%	23%	22%	25%	53%	55%	54%	62%	64%	40%
	Según Chow usando el criterio de Manning										
α	16%	18%	20%	19%	24%	70%	73%	71%	85%	89%	49%
β	17%	18%	21%	20%	24%	53%	55%	54%	64%	66%	39%
	Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
α	17%	19%	22%	21%	25%	55%	58%	55%	64%	67%	40%
β	17%	18%	21%	21%	23%	45%	47%	45%	53%	54%	34%
	SOLO CON VALORES CENTRALES										
	Según Chow										
α	24%	22%	25%	24%	31%	71%	72%	69%	79%	76%	49%
β	21%	20%	23%	22%	27%	54%	55%	53%	61%	59%	39%
	Según Chow usando el criterio de Manning										
α	20%	18%	21%	19%	26%	71%	73%	70%	84%	80%	48%
β	20%	18%	21%	20%	25%	54%	55%	53%	63%	60%	39%
	Según Jaeger(1949,1968) y Mazumder(1971)										
α	20%	18%	22%	21%	26%	56%	57%	54%	62%	60%	40%
β	19%	18%	22%	20%	24%	46%	46%	44%	52%	50%	34%

Anexo 3: Cálculo de las velocidades cerca al fondo con la teoría de capa límite

9 l/s	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130	0,193	0,204	0,209	0,213	0,211	0,210
0,110	0,205	0,209	0,209	0,209	0,212	0,213
0,090	0,202	0,205	0,208	0,211	0,212	0,216
0,070	0,200	0,205	0,207	0,212	0,212	0,214
0,050	0,199	0,199	0,203	0,209	0,209	0,210
0,030	0,188	0,185	0,193	0,195	0,195	0,202
	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004	0,003
	0,1764	Promedio				

8 l/s	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130	0,173	0,191	0,196	0,198	0,203	0,195
0,110	0,191	0,196	0,198	0,202	0,202	0,200
0,090	0,192	0,197	0,197	0,200	0,202	0,202
0,070	0,191	0,196	0,198	0,199	0,203	0,200
0,050	0,189	0,192	0,195	0,197	0,201	0,200
0,030	0,179	0,181	0,181	0,187	0,186	0,188
	0,003	0,003	0,004	0,003	0,005	0,004
	0,1672	Promedio				

7 l/s	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130	0,161	0,170	0,176	0,180	0,185	0,177
0,110	0,178	0,184	0,185	0,186	0,186	0,189
0,090	0,179	0,182	0,181	0,184	0,186	0,187
0,070	0,179	0,179	0,179	0,184	0,185	0,183
0,050	0,176	0,179	0,176	0,184	0,183	0,187
0,030	0,167	0,165	0,170	0,174	0,176	0,179
	0,003	0,004	0,002	0,003	0,002	0,003
	0,1542	Promedio				

6 l/s	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,110	0,162	0,171	0,173	0,174	0,173	0,175
0,090	0,168	0,171	0,171	0,171	0,173	0,175
0,070	0,169	0,168	0,170	0,171	0,173	0,175
0,050	0,167	0,165	0,166	0,168	0,171	0,173
0,030	0,161	0,156	0,156	0,161	0,163	0,168
	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002
	0,1409	Promedio				

5 l/s	Ancho [m]					
Profundidad [m]	0,05	0,09	0,13	0,17	0,21	0,25
	Velocidad					
0,130						
0,110	0,141	0,150	0,149	0,156	0,161	0,156
0,090	0,156	0,161	0,156	0,159	0,162	0,164
0,070	0,156	0,156	0,152	0,157	0,164	0,162
0,050	0,152	0,153	0,147	0,158	0,164	0,161
0,030	0,146	0,142	0,138	0,153	0,156	0,156
	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002
	0,1294	Promedio				