



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
CAMPUS MORELOS

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS Y MÉTODOS PARA AFORAR  
CANALES

T E S I S

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - INGENIERÍA HIDRÁULICA  
P R E S E N T A :

JERMAINE ORLANDO BRAITHWAITE

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ARIOSTO AGUILAR CHÁVEZ (UNAM)



JIUTEPEC, MORELOS

OCTUBRE, 2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

---

Presidente: Dr. Nahun Hamed García Villanueva  
Secretario: Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco  
Vocal: Dr. Ariosto Aguilar Chávez  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Serge Tamari Wagner  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa

Lugar en donde se realizó la tesis:

DEPFI UNAM, Campus Morelos

### **TUTOR DE TESIS:**

Dr. Ariosto Aguilar Chávez

---

**FIRMA**

---

***“La conclusión del asunto, habiéndose oído todo, es: Teme al Dios verdadero y guarda sus mandamientos. Porque este es todo el deber del hombre.”***

**(ECLESIASTÉS 12:13)**

---

---

***“Esta tesis corresponde a los estudios realizados con una beca otorgada por la Secretaría de Relaciones Exteriores del Gobierno de México”***

---

## ACKNOWLEDGEMENTS

---

*I express sincere gratitude to the following organizations and individuals for their contributions toward the successful completion of this thesis and my studies in the Master's in Hydraulics Engineering Programme at the National Autonomous University of Mexico (UNAM):*

- **The Organization of American States (OAS), the Mexican Foreign Affairs Ministry (SRE) and the Public Service Ministry of the Cooperative Republic of Guyana (PSM):** for giving me the opportunity to undertake postgraduate studies by means of the scholarship.
  - **The Mexican Institute of Water Technology (IMTA):** for providing the laboratory facilities for the experimental studies conducted in this investigation.
  - **Staff members of the DEPFI-UNAM Campus Morelos:** To the professors and administrative staff members, thank you for your dedication towards your respective responsibilities in the educational system of UNAM.
  - **Dr. Ariosto Aguilar Chávez:** for dedicating time towards the editing of this document and the explanation of hydraulic concepts related to the investigation. I am also deeply appreciative of your support in providing research material including books, articles, international standards and computer programs.
  - **Dr. Serge Tamari Wagner:** for your guidance with the laboratory measurements and your assistance and recommendations in the elaboration of this thesis. I am also grateful for your providing the experimental data which formed the basis for the analysis presented in chapters 4 and 5 of this document.
  - **The members of my thesis evaluation panel; Dr. Ariosto Aguilar Chavez, Dr. Serge Tamari Wagner, Dr. Nahun Hamed García Villanueva, Dr. Aldo Iván Ramirez Orozco, Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa:** for their efforts in reviewing the thesis and their participation in the degree acquisition process.
  - **Miss Marlé Dolores Reyes Pantoja:** for her assistance in the transferring of data to digital form and her participation in the editing of the thesis.
-

## **DEDICATION**

---

**To:**

✚ **Mrs. Carol Braithwaite:** *A very supportive mother, you have taught me many lessons and have demonstrated your love in ways too numerous to mention. Thank you very much.*

✚ **Miss Vanessa Delicia Braithwaite:** *A dear and caring sister, thanks for your constant interest in my welfare.*

✚ **Miss Marlé Dolores Reyes Pantoja:** *A beautiful and sincere friend, from the moment we met you have changed my life in so many positive ways.*

.....  
*Jermaine Orlando Braithwaite*

En la gestión de las zonas de drenaje y riego se tiene la necesidad de conocer los caudales que circulan en la red de canales. Existen muchas técnicas para aforar; a menudo, estas técnicas requieren medir el tirante y la velocidad del agua. Por un lado, varias técnicas están documentadas en normas internacionales, pero algunas están basadas en recomendaciones empíricas derivadas de estudios realizados en ríos. Por otro lado, existen técnicas de común uso desde hace 15 años, como los perfiladores Doppler para medir el caudal, que todavía no se encuentran suficientemente documentadas en normas. Por lo anterior, se planteó en este trabajo investigar aspectos particulares de las técnicas para determinar el tirante y la velocidad del agua en canales.

En la primera parte de la investigación, se probó en el laboratorio la exactitud, linealidad y estabilidad de un nuevo transductor de presión sumergible (< 10 años en uso) para medir el tirante. El transductor es tipo manométrico (modelo 551, marca KPSI) y cuenta con un sensor de temperatura que permite corregir el efecto térmico sobre la densidad del agua y un datalogger integrado. Las mediciones fueron efectuadas en un tanque  $\approx 2$  m de altura, en el cual, se instaló adicionalmente una escala lineal (con una tolerancia de  $\pm 1$ mm) para tener lecturas de referencia. Se verificó que la exactitud del transductor fuera consistente con las especificaciones de su fabricante (diferencias de tirante menores a  $\pm 2$  mm de columna de agua con respecto a la escala de referencia y después de haber calibrado el transductor). Además, se encontró que la relación de calibración del transductor no cambiaba significativamente a lo largo de un mes. Esos resultados indican que se puede monitorear el tirante del agua con una alta precisión ( $\approx \pm 2$  mm) utilizando un transductor de presión. Sin embargo, se necesita hacer estudios adicionales en el campo para verificar el funcionamiento de este dispositivo bajo condiciones particulares, como agua con un alto contenido de sales disueltas o con alta composición de sedimentos, entre otras.

La segunda parte de la investigación se enfocó a probar medidores ultrasónicos sumergidos del tipo “up-looking” (es decir, con un haz vertical dirigido hacia arriba) para medir el tirante. Esta técnica es relativamente nueva y poco documentada en normas. Se realizaron mediciones de laboratorio usando dos medidores (con frecuencias de operación de 1.5 MHz y 3.0 MHz) en un tanque de  $\approx 1.4$  m de alto en el cual se instalaron una escala de referencia y un transductor de presión ya calibrado. Primero se hicieron pruebas estáticas, donde se midió una serie de tirantes constantes; después, se simuló un tirante decreciente en forma continua (a lo largo de un día). Se encontró que la

exactitud de los medidores era consistente con las especificaciones del proveedor ( $\pm 3$  mm para ambos medidores) para un rango de tirantes entre 0.4 m y 1.2 m. Sin embargo, se observó que para tirantes relativamente pequeños (entre 0.25 m y 0.4 m) se obtuvo errores de hasta 7 mm con el medidor de 1.5 MHz. Se debe realizar pruebas adicionales en el campo con tirantes mayores a 1.4 m y medidores de distintas frecuencias de operación.

En la literatura (ISO 748, ISO/TR 9209) se hacen recomendaciones para corregir la profundidad de un molinete cuando el cable de suspensión forma un ángulo con la vertical. Sin embargo, estas recomendaciones son basadas en soluciones empíricas y utilizan coeficientes que han sido ajustados experimentalmente en ríos. En la tercera parte de la investigación se hizo un análisis comparativo entre las soluciones propuestas en la literatura para determinar el error en la profundidad de un molinete suspendido de un cable. Para esto, se utilizaron datos de campo obtenidos de mediciones en un canal prismático con velocidades hasta 2 m/s. Se encontró que los dos métodos evaluados proporcionaron resultados similares, en general las diferencias entre las correcciones de profundidad fueron menores a 5 %. Ahora bien, aplicando ambos métodos se determinaron errores hasta +35 % sobre la profundidad medida del molinete para el caso extremo de un ángulo de  $30^\circ$ . Este resultado muestra la importancia de corregir la profundidad del molinete, lo cual implica una menor incertidumbre en la estimación del caudal.

La norma ISO 748, con respecto al método “área-velocidad”, considera que la técnica más precisa para estimar la velocidad media requiere determinar el perfil de velocidad en una serie de dovelas distribuidas en la sección transversal del canal. Sin embargo, esta técnica requiere mucho tiempo para efectuarse, por lo que se utilizan generalmente técnicas simplificadas y más rápidas denominadas “de puntos reducidos”, las cuales limitan la medición de la velocidad a profundidades específicas (0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad, desde la superficie del agua). En la última parte de la investigación, se hizo un análisis comparativo entre dichas técnicas y las basadas en la determinación de perfiles de velocidad a partir de la ley logarítmica y exponencial. Además, se analizó el efecto de la inclinación del cable de suspensión del molinete sobre la incertidumbre en la estimación del caudal. Se utilizaron datos de aforos efectuados en un canal prismático revestido de concreto, en el cual se midieron la velocidad en ocho puntos en cada vertical. Se encontró en este análisis que las técnicas de puntos reducidos proporcionaron resultados mayores que las técnicas basadas en la integración de perfiles de velocidad. Típicamente, las diferencias entre los resultados fueron mayores a 5 %, y el caso extremo fue del 8 %. Estas diferencias fueron similares al utilizar la ley logarítmica o exponencial. Además, se verificó que el error en la profundidad del molinete

introduciría una incertidumbre aproximada de 5 % sobre la estimación del caudal. De este análisis se aprecia que para los aforos realizados las técnicas de puntos reducidos proporcionaron resultados considerablemente diferentes (hasta 8%) en comparación a métodos más confiables, lo cual, nos indica que las prácticas comúnmente utilizadas para determinar la velocidad media, a menudo, pueden sobreestimar el caudal de manera significativa.

El presente trabajo muestra la importancia de seguir evaluando tanto la exactitud de los nuevos dispositivos para medir el tirante y velocidad del agua, como los algoritmos para calcular el caudal en canales.

Braithwaite J. O. 2008. Evaluación de técnicas y métodos para aforar canales. Tesis de Maestría en Ingeniería (Hidráulica). Facultad de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.: 132 p.

In the operation of drainage and irrigation zones it is necessary to quantify the flows in specific canals of the network. A number of stream gauging techniques exist for this purpose; generally, these require flow depth and velocity measurements in a cross-section. Several techniques have been documented in international standards; however, some are based on recommendations derived from empirical studies conducted in rivers. Additionally, a number of techniques in common use (less than 15 years) are still not adequately documented; for example, acoustic Doppler current profilers applied to discharge measurements. Considering the aforementioned points, the following investigation focuses on specific aspects of techniques used to determine flow depth and velocity in canals.

In a first phase of the investigation, the precision, linearity and stability of a new (< 10 years in use) manometric pressure transducer was tested for flow depth measurements. This submersible transducer (551model, KPSI brand) includes a temperature sensor for correcting thermal effects on water density and an integrated datalogger. Measurements were conducted in a transparent tank  $\approx 2$  m high in which a linear scale (with a tolerance of  $\pm 1$ mm) was used to provide reference readings. It was determined that the precision of the transducer was consistent with the manufacturer's specifications (differences in estimated depth of less than  $\pm 2$  mm with respect to the reference gauge, and after having calibrated the transducer). Additionally, it was found that the calibration relation did not change considerably during a one month period. These results indicate that a submersible manometric pressure transducer can be used to monitor water depth in canals with the relatively high precision ( $\approx \pm 2$  mm). However, it is necessary to conduct further investigations in actual gauging stations to verify the functionality of this instrument under specific conditions, for example, water with high dissolved salts content or flows with a high sediment content.

The second phase of the investigation focuses on the testing of submersible ultrasonic meters of the "up-looking" type (that is, with a vertical beam directed upwards) for measuring flow depth in canals. This technique is relatively new but not adequately documented in standards related to stream gauging. Laboratory measurements were conducted using two meters (with operating frequencies of 1.5 MHz and 3 MHz respectively) in a  $\approx 1.4$  m high tank in which a reference scale and a previously calibrated submersible pressure sensor were installed. The tests were of two types, static test, in

which constant a constant depths were measured and dynamic tests where a continuously decreasing depth was simulated (during a 24 hour period). It was found that the precision of the meters were consistent with the supplier's specifications (uncertainty of  $\pm 3$  mm for both models) for a range of depths between 0.4 m and 1.2 m. However, in the case of the 1.5 MHz meter, it was observed that for relatively small depths (between 0.25 m y 0.4 m) errors of up to 7 mm were obtained. Further investigations should be conducted in actual gauging stations for flow depths greater than 1.4 m using meters of distinct frequencies.

In available literature (ISO 748, ISO/TR 9209), recommendations are presented to correct the depth of a current meter when the suspension cable forms an angle with the vertical. However, these recommendations are based on empirical solutions and utilize coefficients adjusted experimentally for rivers. In the third phase of the investigation a comparative analysis is made between proposed solutions for determining the error in the depth of a current meter suspended from a cable. To facilitate this analysis, experimental data obtained from actual field measurements conducted in a prismatic canal (with flow velocities up to 2m/s) was used. It was determined that the methods evaluated produced similar results; en general the differences between the corrections were less than 5 %. Applying both methods, errors of up to +35 % were determined in the measured depth of the current meter (for the extreme case on an angle of  $30^\circ$ ). These results indicate the importance of correcting the depth of the current meter, which results in a reduced uncertainty in the estimation of the discharge.

In the ISO 748 standard regarding the "velocity-area" method, it is considered that the most precise techniques for estimating the average velocity require the determination of velocity profiles in verticals adequately distributed along the width of a cross-section. However, this technique is time consuming, for which reason simplified and more rapid approaches referred to as "reduced point techniques" are used; in which the velocity measurements are limited to specific depths (0.2, 0.6 and 0.8 of the flow depth, from the water surface). In the final phase of the investigation, a comparative analysis is presented between the reduced point techniques and those based on velocity profiles derived from the logarithmic and exponential laws. Additionally, the effect of the inclination in the suspension cable of the current meter is evaluated with respect to the uncertainty introduced in the estimation of the discharge. To facilitate the investigation, stream gauging data from a prismatic canal was used, in which velocity measurements were conducted in eight points in each vertical. It was found that the average velocities obtained from the reduced point techniques were larger than those obtained from the techniques based on the integration of velocity profiles. Typically, the

differences between results obtained from these techniques were greater than 5 %, and in the extreme case 8% (regardless of whether the logarithmic or exponential model was used). Additionally, it was determined that the error in the depth of the current meter introduced an uncertainty of approximately 5 % in the estimation of the discharge. From this analysis it can be seen that for the stream-gauging measurements conducted, the reduced point techniques produced results which differed considerably (up to 8% in some cases) from that obtained with more accurate methods; this indicates that the procedures commonly used to determine the average flow velocity, can often considerably overestimate the discharge.

This investigation shows the importance of continuously evaluating the accuracy of new sensors for measuring water depth and velocity, as well as the algorithms for computing the discharges in canals.

Braithwaite J. O. 2008. Evaluation of stream gauging techniques and methods applied to canals. Master's thesis in Hydraulics Engineering, Faculty of Engineering, UNAM, México, D.F.: 132 p.

**ÍNDICE**

<b><i>CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN GENERAL</i></b>	<b><i>1</i></b>
1.1. IMPORTANCIA Y MOTIVOS DE LOS AFOROS DE CANALES	1
1.2. MÉTODOS PARA ESTIMAR EL CAUDAL	3
1.2.1. Método área-velocidad	3
1.2.2. Estructuras de medición por cambio de régimen	3
1.2.3. Método de dilución	4
1.2.4. Otros métodos	4
1.3. TÉCNICAS PARA ESTIMAR EL CAUDAL	7
1.4. ENFOQUE Y ALCANCE DE LA TESIS	8
<b><i>CAPÍTULO 2 - MEDICIÓN DEL TIRANTE CON TRANSDUCTORES DE PRESIÓN SUMERGIBLES</i></b>	<b><i>10</i></b>
2.1. INTRODUCCIÓN	10
2.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN SUMERGIBLES	12
2.3. CONSIDERACIONES PRINCIPALES EN LA ESTIMACIÓN DEL TIRANTE	14
2.3.1. Condiciones en el sitio de medición	14
2.3.2. Desgaste del componente sensible del transductor	15
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES	17
2.4.1. Especificaciones de los transductores probados	17
2.4.2. Escala de referencia	17
2.4.3. Procedimiento experimental de calibración a corto plazo (durante una hora)	19
2.4.4. Procedimiento experimental de calibración a medio plazo (durante 30 días)	19
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
2.5.1. Calibraciones a corto plazo	21

2.5.2.	Calibración a medio plazo	26
2.6.	CONCLUSION DEL CAPITULO	28
<b><i>CAPÍTULO 3 - EVALUACIÓN DE MEDIDORES ULTRASÓNICOS PARA MEDIR EL TIRANTE</i></b>		<b>29</b>
3.1.	INTRODUCCIÓN	29
3.2.	PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS SENSORES ULTRASÓNICOS DE NIVEL	30
3.3.	LIMITACIONES DE LA TÉCNICA ULTRASÓNICA PARA MEDIR EL TIRANTE	33
3.3.1.	Distancia de cancelación de la señal ("blanking distance")	33
3.3.2.	Relación de la señal/ruido (Signal-to-noise ratio, SNR)	33
3.4.	ESTUDIOS EXPERIMENTALES	35
3.4.1.	Tanque usado	35
3.4.2.	Especificaciones de los dispositivos probados	36
3.4.3.	Descripción de pruebas realizadas	37
3.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
3.5.1.	Pruebas estáticas	38
3.5.2.	Pruebas dinámicas	41
3.6.	CONCLUSIÓN DEL CAPITULO	44
<b><i>CAPÍTULO 4 - AFORO CON MOLINETES, DETERMINACIÓN DE LA CORRECCIÓN A LA LÍNEA MOJADA</i></b>		<b>45</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN	45
4.2.	REVISIÓN DE RECOMENDACIONES	48
4.2.1.	Determinación de la corrección aplicable a la parte del cable en el aire	49
4.2.2.	Corrección a la parte mojada del cable, Método de la ISO 748:1997	50

4.2.3.	Corrección a la línea mojada: Método del ISO/TR 9209-1989	51
4.3.	MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES	57
4.3.1.	Descripción de datos experimentales utilizados	57
4.3.2.	Características geométricas e hidráulicas del sitio de medición	60
4.3.3.	Instrumentación	62
4.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
4.5.	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	65
 <b>CAPÍTULO 5 - EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA APLICADOS A AFOROS CON MOLINETES</b>		<b>66</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN	66
5.2.	MÉTODOS DE AFORO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD MEDIA	69
5.2.1.	Método de distribución de velocidad (ISO 748-1997)	69
5.2.2.	Métodos de puntos reducidos (ISO 748-1997)	69
5.2.3.	Método de integración (ISO 748-1997)	70
5.3.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS	71
5.3.1.	Relación entre la capa límite y la distribución de velocidad	71
5.3.2.	Distribución de la velocidad sobre fondos lisos	73
5.3.3.	Distribución de la velocidad sobre fondos rugosos	75
5.3.4.	Ley exponencial de Chen	77
5.3.5.	Determinación de la velocidad de fricción $U_*$	77
5.3.6.	Derivación de la velocidad media	78
5.3.7.	Velocidad media derivada de la ley exponencial	79
5.3.8.	Velocidad media derivada de la ley logarítmica	80
5.3.9.	Coincidencia de los perfiles teóricos con datos de aforos	81
5.4.	ESTUDIOS EXPERIMENTALES	83
5.4.1.	Determinación de parámetros	84

5.5.	DISCUSIÓN Y RESULTADOS	86
5.6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
	<b><i>CAPÍTULO 6 - CONCLUSIÓN GENERAL</i></b>	<b><i>94</i></b>
	Referencias Bibliográficas	96
	Anexo A	99
	Anexo B	108
	Anexo C	113
	Anexo D	124

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

---

*Figura 2- 1: Determinación del tirante con un transductor de presión sumergible*

*Figura 2- 2: Interfaz de usuario del programa Kware que permite controlar las variables que afectan el funcionamiento del transductor*

*Figura 2- 3: Visualización gráfica de variables de medición en K-ware*

*Figura 2- 4: Ilustración del tanque transparente en donde se probaron los dispositivos para*

*Figura 3- 1: Estimación del tirante con un medidor ultrasónico, ilustración del principio de operación*

*Figura 3- 2: Medidores ultrasónicos con haz vertical en para estimar el tirante*

*Figura 3- 3: Instalaciones para medir el tirante en un tanque*

*Figura 4- 1: Arrastre del cable cuando se afora en un canal profundo con alta velocidad*

*Figura 4- 2: Corrección aplicable a la parte del cable en el aire*

*Figura 4- 3: Fuerzas actuando en una línea de sondeo*

*Figura 4- 4: Dovelas y distribución hipotética de los puntos de medición*

*Figura 4- 5: Sección transversal del sitio de medición*

*Figura 4- 6: Sección longitudinal del sitio de medición*

*Figura 4- 7: Medición para determinar el ángulo entre el cable y la vertical*

*Figura 5- 1: División en franjas de una sección transversal de una corriente*

*Figura 5- 2: Desarrollo de la capa límite en un canal abierto con condiciones ideales de entrada*

*Figura 5- 3: Sub-división del campo de flujo a superficie libre (Nezu y Nakagawa, 1993)*

*Figura 5- 4: Derivación de la velocidad media, a partir de la distribución de velocidad en una vertical*

*Figura 5- 5: Concordancia entre un perfil de velocidad teórico y datos de medición*

*Figura B- 1: Determinación de la longitud de la línea mojada*

*Figura C- 1: Distribución hipotética de los puntos de medición para la prueba No. 1*

*Figura C- 2: Distribución hipotética de los puntos de medición para la prueba No.2*

## **ÍNDICE DE TABLAS**

---

*Tabla 1- 1: Métodos y técnicas para estimar el caudal en canales*

*Tabla 1- 2: Explicación de los símbolos utilizados en la tabla 1-1*

*Tabla 2- 1: Variación de la densidad del agua pura y líquida con la temperatura*

*Tabla 2- 2: Datos y especificaciones de los transductores de nivel evaluados*

*Tabla 3- 1: Velocidad de sonido en agua dulce a diferentes temperatura*

*Tabla 3- 2: Tirante mínimo de medición para diferentes frecuencias de operación*

*Tabla 3- 3: Datos del transductor de presión sumergible utilizado*

*Tabla 3- 4: Datos y especificaciones de los medidores ultrasónicos probados*

*Tabla 4- 1: Caudales y tirantes correspondientes a las pruebas analizadas*

*Tabla 4- 2: Datos del sitio de medición en el canal de la Presa Josefa*

*Tabla 4- 3: Resumen de resultados obtenidos con el método de la ISO 748-1997*

*Tabla 5- 1: Análisis comparativo de las velocidades medias derivadas de diferentes métodos aplicados a datos de aforo sin y con correcciones de profundidad para la prueba No. 1*

*Tabla 5- 2: Análisis comparativo de los gastos derivados de diferentes métodos aplicados a datos de aforo sin y con correcciones de profundidad para la prueba No. 1*

*Tabla 5- 3: Análisis comparativo de las velocidades medias derivadas de diferentes métodos aplicados a datos de aforo sin y con correcciones de profundidad para la prueba No. 3*

*Tabla 5- 4: Análisis comparativo de los gastos derivados de diferentes métodos aplicados a datos de aforo sin y con correcciones de profundidad para la prueba No. 3*

*Tabla B- 1: Corrección en el aire para diversos ángulos*

*Tabla B- 2: Corrección a la línea mojada para diversos ángulos*

*Tabla B- 3: Corrección de la línea mojada en m para diferentes ángulos con la vertical y longitudes de la línea mojada y aplicable a valores de  $\beta$  entre 1 y 2*

*Tabla B- 4: Corrección de la línea mojada en m para diferentes ángulos con la vertical y longitudes de la línea mojada y aplicable a valores de  $\beta$  entre 3 y 4*

*Tabla B- 1: Corrección en el aire para diversos ángulos*

*Tabla B- 2: Corrección a la línea mojada para diversos ángulos*

*Tabla B- 3: Corrección de la línea mojada en m para diferentes ángulos con la vertical y longitudes de la línea mojada y aplicable a valores de  $\beta$  entre 1 y 2*

*Tabla B- 4: Corrección de la línea mojada en m para diferentes ángulos con la vertical y longitudes de la línea mojada y aplicable a valores de  $\beta$  entre 3 y 4*

*Tabla B- 5: Corrección de la línea mojada en (m) para diferentes ángulos con la vertical y longitudes de la línea mojada y aplicable a valores de  $\beta = 5$*

*Tabla C- 1: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos*

*Tabla C- 2: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos*

*Tabla C- 3: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos*

*Tabla C- 4: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos*

*Tabla C- 5: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos*

*Tabla C- 6: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos*

## **ÍNDICE DE GRÁFICAS**

---

*Gráfica 2- 1: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 551 601842*

*Gráfica 2- 2: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 551 601842*

*Gráfica 2- 3: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 551 706221*

*Gráfica 2- 4: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 551 706221*

*Gráfica 2- 5: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 550 607451*

*Gráfica 2- 6: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 550 607451*

*Gráfica 2- 7: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 551 601841*

*Gráfica 2- 8: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 551 601841*

*Gráfica 2- 9: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 550 601842*

*Gráfica 2- 10: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 551 601842*

*Gráfica 3- 1: Resultados de una prueba estática con el medidor ultrasónico 1.5 MHz*

*Gráfica 3- 2: Resultados de una prueba estática con el medidor ultrasónico de 3 MHz*

*Gráfica 3- 3: Curvas de tirante decreciente obtenidas de las lecturas del medidor ultrasónico 3 MHz y el transductor de presión sumergible KPSI*

*Gráfica 3- 4: Curvas de tirante decreciente obtenidas de las lecturas del medidor ultrasónico 1.5 MHz y el transductor de presión sumergible KPSI*

*Gráfica 3- 5: Curvas de tirante decreciente obtenidos de las lecturas del medidor ultrasónico SonTek 1.5 MHz y el transductor de presión sumergible KPSI*

*Gráfica C- 1: Datos de aforo corregidos en la dovela No.6 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica C- 2: Datos de aforo corregidos en la dovela No.11 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica C- 3: Datos de aforo corregidos en la dovela No.17 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica C- 4: Datos de aforo corregidos en la dovela No.15 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica C- 5: Datos de aforo corregidos en la dovela No.16 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica C- 6: Datos de aforo corregidos en la dovela No.17 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica C- 7: Datos de aforo corregidos en la dovela No.10 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica C- 8: Datos de aforo corregidos en la dovela No.16 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica C- 9: Datos de aforo corregidos en la dovela No.21 utilizando diferentes métodos*

*Gráfica D- 1: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica para datos de aforo con y sin corrección en la dovela 5*      **126**

*Gráfica D- 2: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica y exponencial para datos corregidos en la dovela 5*

*Gráfica D- 3: Perfiles adimensionales para la relación logarítmica y exponencial aplicados a los datos de aforo corregidos en la dovela 5*

*Gráfica D- 4: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica para datos de aforo con y sin corrección en la dovela 12*

*Gráfica D- 5: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica y exponencial para datos corregidos en la dovela 12*

*Gráfica D- 6: Perfiles adimensionales para la relación logarítmica y exponencial aplicados a los datos de aforo corregidos en la dovela 12*

*Gráfica D- 7: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica para datos de aforo con y sin corrección en la dovela 10*

*Gráfica D- 8: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica y exponencial para datos corregidos en la dovela 10*

*Gráfica D- 9: Perfiles adimensionales para la relación logarítmica y exponencial aplicados a los datos de aforo corregidos en la dovela 10*

*Gráfica D- 10: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica para datos de aforo con y sin corrección en la dovela 16*

*Gráfica D- 11: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica y exponencial para datos corregidos en la dovela 16*

*Gráfica D- 12: Perfiles adimensionales para la relación logarítmica y exponencial aplicados a los datos de aforo corregidos en la dovela 16*

## Capítulo

---

# 1

### INTRODUCCIÓN GENERAL

#### 1.1. **IMPORTANCIA Y MOTIVOS DE LOS AFOROS DE CANALES**

Conforme al artículo 7, Fracción III de la Ley de Aguas Nacionales de México, “la instalación de los dispositivos necesarios para la medición de la cantidad y calidad de las aguas nacionales y en general para la medición del ciclo hidrológico es de utilidad pública” (SEMARNAT, 2004. pp. 34). En ese sentido, existen más de 600 estaciones hidrométricas para medir el caudal en los canales y ríos principales del país (CNA, 2006). Entre los motivos para medir el caudal se pueden destacar los siguientes:

- Cuantificar los volúmenes y gastos que se deseen almacenar y controlar en las nuevas obras hidráulicas.
- Determinar las cantidades de agua disponible para diversos usos en las fuentes naturales y obras de abastecimiento.

- Cuantificar los volúmenes de agua a cobrar para diferentes usuarios incluyendo industrias, centrales hidroeléctricas, riego para agricultura, etc.
- Operar la red de canales para suministrar los caudales requeridos en las zonas de cultivo.
- Identificar avenidas en tiempos de eventos climáticos extremos.

Para que la red de monitoreo sea útil, debe proporcionar datos precisos a intervalos adecuados que permitan la toma de decisiones. Esto implica el empleo de métodos y técnicas internacionalmente acreditados y aptos para las condiciones específicas que se presentan en los canales a aforar. El avance en tecnología aplicada a la instrumentación ha resultado en el desarrollo de instrumentos más precisos y rápidos que facilitan la realización de mediciones. Sin embargo, aún existe una carencia de experiencia e información experimental con respecto a ciertos aspectos de las prácticas comunes para aforar en canales.

De acuerdo con las ideas expresadas con anterioridad, esta tesis se enfoca al mejoramiento de ciertos procedimientos aplicados a la estimación del caudal en canales. A continuación, se presentan conceptos generales relacionados con el tema y una explicación breve de los objetivos de la investigación.

## **1.2. MÉTODOS PARA ESTIMAR EL CAUDAL**

Para estimar el caudal se han desarrollado varios métodos, los cuales se basan en diferentes principios de la hidráulica. Sin embargo, antes de seleccionar una metodología para un caso particular, es necesario considerar algunos factores prácticos que incluyen la disponibilidad de recursos financieros, la precisión requerida en la medición y la frecuencia con que se requiere obtener los datos.

En las tablas 1-1 y 1-2 se presentan los métodos más conocidos para aforar en canales (ISO, 1997). Básicamente, éstos métodos pueden agruparse en cuatro clases generales que se describen a continuación.

### **1.2.1. Método área-velocidad**

El método área-velocidad se basa en una forma simplificada de la ecuación de continuidad de flujo que expresa el caudal pasando por una sección mediante la relación siguiente:

$$Q = V A \quad (1.1)$$

donde,  $Q$  es el caudal en  $m^3/s$ ,  $V$ , la velocidad media del flujo en  $m/s$ , y  $A$ , el área transversal de la sección en  $m^2$ . El método área-velocidad es ampliamente utilizado para estimar el caudal debido a su facilidad de aplicar a canales grandes en comparación con otros métodos (véase a los criterios de la tabla 1-1). Además, proporciona buenos resultados cuando se logra una alta precisión en la medición de la velocidad.

### **1.2.2. Estructuras de medición por cambio de régimen**

Las estructuras de medición de cambio de régimen tienen su principio de funcionamiento en las condiciones que se forman por la generación de una sección de control o crítica. Entonces, la relación entre el tirante y caudal es unívoca por efecto del cambio de régimen (French, 1988).

El cambio de régimen de estas estructuras de aforo es de subcrítico a supercrítico y la clasificación de las estructuras está definida por la forma de la garganta o sección de control. p.e.: cresta delgada, cresta gruesa, garganta larga, Parshall, SANIIRI, etc.

Como se indica en la tabla 1-1, con este método se puede lograr una alta precisión en la estimación de caudal. Sin embargo, debido a que se tiene que formar un flujo subcrítico, en algunos sitios es difícil su implementación.

### **1.2.3. Método de dilución**

En este método se inyecta un líquido trazador en el agua y se toma una muestra en un punto aguas abajo para determinar la concentración de la sustancia. El caudal se estima mediante una relación entre la concentración en el punto de inyección y la concentración en el punto de muestreo.

Aunque se puede lograr una alta precisión con este procedimiento (tabla 1-1), es un método relativamente lento y por lo tanto, no se utiliza en la práctica.

### **1.2.4. Otros métodos**

En general esos métodos no son utilizados. Eso se debe a su complejidad de ejecutar y la dificultad de medir las variables que se requieren conocer para estimar el caudal, p.e. el método de sección pendiente o simulación numérica con las ecuaciones de Saint-Venant.

Tabla 1- 1: Métodos y técnicas para estimar el caudal en canales (ISO, 1997)  
(las explicaciones de los símbolos se encuentran en la tabla 1-2)

Método		Criterio							Incertidumbre	
No.	Descripción	Norma ISO Relacionada	Ancho del canal	Profundidad del canal	Velocidad del agua	Carga de sedimentos	Condiciones de llegada	Duración de medición	valor mínimo	Comentarios
<b>1 Técnicas basadas en el método área-velocidad</b>										
1.1	Área-velocidad - vadeando	ISO 748	L, M, S	S	S		b, c, d, k	J, K	±5	A, B
1.2	Área-velocidad - desde un puente	ISO 748	L, M, S	L, M, S	L, M, S		b, c, d, k	J, K	±5	A, B, C, D
1.3	Área-velocidad - con un sistema teléferico	ISO 748	L, M, S	L, M, S	L, M, S		b, c, d, k	J, K	±5	A, B, C
1.4	Área-velocidad - desde un bote estático	ISO 748	L, M, S	L, M, S	L, M, S		b, c, d, k	J, K	±5	A, B, C, E
1.5	Área-velocidad - desde un bote móvil	ISO 748	L	L, M	L, M, S		b, c, d, k	J	±10	A, B, E
1.6	Área-velocidad - con flotadores	ISO 748	L, M, S	L, M, S	L, M, S		b, c, d, k	J, K	±10	F
1.7	Sección-pendiente	ISO 1070	L, M	L, M	L, M		b, c, d, k	K	±10	Q
1.8	Ultrasónico	ISO 6416	L, M, S	L, M	L, M, S	R, I	b, c, d, k	G, J	±5	H, U
1.9	Electromagnético	ISO 9213	M, S	L, M, S	L, M, S	I	b, d, k	G, J	±6	H, I
<b>2 Técnicas basadas en el método de dilución</b>										
2.1	Dilución-trazador químico	ISO 9555-1 ISO 9555-3	M, S	M, S	M, S		c, g, k	K, N	±3	
2.2	Dilución-trazador radioactivo	ISO 9555-1 ISO 9555-2	M, S	M, S	M, S		c, g, k	K, N	±3	
2.3	Dilución-trazador fluorescente	ISO 9555-1 ISO 9555-4	M, S	M, S	M, S		c, g, k	K, N	±4	
<b>3 Técnicas basadas en una estructura de cambio de régimen</b>										
3.1	Cresta delgada	ISO 1438-1	S	S	S	l, f, d	a, b, e, j, c	J, G	±1	
3.2	Cresta ancha	ISO 1438-1	M, S	S	S	l, k, d	a, b, e, f, j, c, k	J, G	±3	
3.3	Garganta larga	ISO 3846	M, S	S	M, S	l, k, d	a, b, e, f, j, c	J, G	±5	
3.4	Garganta corta	ISO 4377	M, S	M, S	M, S	l, k, d	a, b, e, f, j, c	J, G	±5	
3.5	Parshall	ISO 4359	M, S	M, S	M, S	l, k, d	a, b, c, j	J, G	±10	
<b>4 Otros métodos</b>										
4.1	Sección-pendiente	ISO 1070	L, M	L, M	L, M		b, c, d, k	K	±10	Q

Tabla 1- 2: Explicación de los símbolos utilizados en la tabla 1-1 (ISO, 1997)

<i>Letra (Tabla 1-1)</i>	<i>Definición</i>
<i>a</i>	Flujo sub-crítico aguas arriba de la sección de control
<i>b</i>	Flujo no debe tener corrientes transversales
<i>c</i>	Canal con poca vegetación
<i>d</i>	Canal recto con sección transversal uniforme
<i>e</i>	Canal recto con sección transversal simétrica por una longitud equivalente a 10 anchos
<i>f</i>	Canal con pared vertical y fondo plano por una distancia mínima de 10 veces el ancho hacia aguas arriba
<i>g</i>	Flujo en el canal debe ser turbulento para facilitar un mezclado del agua
<i>j</i>	Flujo con distribución de velocidad uniforme
<i>k</i>	Canal no debe tener abatimientos en el fondo o deformaciones en el talud
<i>A</i>	Para observaciones a 0.6 o 0.8 y 0.2 de la profundidad, el incertidumbre mínima es del orden 5%
<i>B</i>	Para observaciones de la velocidad en la superficie, el incertidumbre mínima es del orden de 10%
<i>C</i>	Se necesita hacer correcciones debido al arrastre del cable por el corriente
<i>D</i>	Se puede introducir errores mayores debido a efectos de estribos de puentes o otras estructuras
<i>E</i>	Se puede introducir errores debido a desviaciones y obstrucciones al bote
<i>F</i>	Se utiliza este método sólo cuando el efecto del viento es despreciable, es menos preciso que métodos en los que utiliza el molinete
<i>G</i>	Método adecuado para aforos frecuentes
<i>I</i>	No se puede realizar en condiciones de alta concentración de sedimentos
<i>J</i>	Método rápido (se realiza en menos que una hora)
<i>K</i>	Método lento (se realiza en 1 a 6 horas)
<i>L</i>	Ancho largo (> 50 m) o velocidad alta (> 3 m/s) o profundidad grande (> 5 m)
<i>M</i>	Ancho mediano (entre 5 a 50 m) o velocidad mediana (entre 1 a 3 m/s) o profundidad mediana (entre 1 a 5 m)
<i>N</i>	Método muy lento (se realiza en más que 6 horas)
<i>Q</i>	Se puede utilizar cuando el método área-velocidad no es apto pero se debe determinar la pendiente con una buena precisión
<i>R</i>	Se requiere una concentración baja de sólidos suspendidos para evitar la pérdida de la señal acústico
<i>S</i>	Ancho estrecho (< 5 m) o velocidad pequeña (< 1 m/s) o profundidad pequeña (> 1 m)
<i>T</i>	Se puede utilizar en ríos con crecimiento de malezas y material en suspensión en la plantilla
<i>U</i>	Se requiere un fondo estable en la sección de aforo

### **1.3. TÉCNICAS PARA ESTIMAR EL CAUDAL**

Los métodos descritos en la sección 1.2 pueden realizarse mediante diferentes técnicas (tabla 1-1) que emplean instrumentos específicos para medir las variables y distintos algoritmos para calcular el caudal. Desde un punto de vista histórico, esas técnicas pueden clasificarse como tradicional, actual o emergente (Grant *et al*, 2001). Las técnicas tradicionales, en general, requieren más tiempo para efectuar las mediciones, pero son más confiables debido a su uso extenso en el aforo de canales. Adicionalmente, las metodologías relacionadas con esas técnicas están publicadas en normas acreditadas a nivel mundial. Con respecto a la medición de la velocidad, se puede destacar el uso del molinete como la técnica convencional más empleada internacionalmente (ISO, 1997).

Típicamente, las técnicas actuales y emergentes utilizan dispositivos automatizados y capaces de medir en forma más rápida que los instrumentos empleados para técnicas tradicionales. Unos ejemplos de tales dispositivos incluyen medidores acústicos para estimar la velocidad y transductores de presión sumergibles para la medición del tirante. Cabe mencionar que muchas de las técnicas actuales, pueden aplicarse a sistemas de adquisición y transferencia de datos que facilita el monitorio de las variables a medir en forma continua.

A pesar de las ventajas de las técnicas actuales, todavía no se han publicado normas que acrediten el empleo de algunas de éstas en el aforo de canales debido a la falta de estudios comparativos en diversas condiciones. Un ejemplo es el uso de perfiladores acústicos Doppler para estimar el caudal. En este sentido, es necesario llevar a cabo pruebas, tanto en el laboratorio como en campo, para verificar sus limitaciones y alcances de aplicación.

#### **1.4. ENFOQUE Y ALCANCE DE LA TESIS**

Este trabajo da enfoque a ciertos aspectos de los métodos y técnicas tradicionales y actuales para aforar en canales. El documento se desarrolla en la forma siguiente:

- **Capítulo 2: Medición del tirante con transductores de presión sumergibles**

Los transductores de presión sumergibles se han utilizado por más de 10 años para monitorear el nivel de la superficie del agua (Freeman et al, 2004). Las nuevas generaciones de transductores incluyen un datalogger y sensor de temperatura interna que corrige el efecto térmico sobre la densidad del agua (Pressure Systems Inc., 2006). En el caso particular de los aforos de canales, se puede utilizar un transductor para medir el tirante con el cual se determina el caudal a partir de una relación tirante-gasto o con el método "área-velocidad". El capítulo 2 discute el uso de transductores de presión sumergibles en la medición del tirante.

- **Capítulo 3: Estimación del tirante con sensores ultrasónicos**

Los medidores ultrasónicos miden el tirante mediante dispositivos colocados por encima de la superficie del agua y que utilizan un haz dirigido hacia abajo (Simpson, 2001). Recientemente, ha surgido una clase de medidores ultrasónicos fijos para medir la velocidad que además, incluyen un haz vertical dirigido hacia arriba para medir el tirante (SonTek, 2005). El capítulo 3 examina el uso de esta técnica para medir el tirante.

- **Capítulo 4: Aforo con molinetes, determinación de la corrección a la línea mojada**

A pesar del desarrollo de técnicas nuevas para medir la velocidad en canales, uno de los métodos más empleados se basa en el uso de un molinete suspendido de un cable con escandallo (ISO, 1997). Este método tiene la desventaja de que en canales profundos con flujos de alta velocidad, se puede presentar un ángulo entre el cable y la vertical debido a la componente horizontal de la fuerza de arrastre de la corriente (Rantz *et al*, 1982). Debido al desplazamiento vertical del cable, no se puede determinar la profundidad exacta del molinete, y por lo tanto, se introduce un error en la estimación del caudal. Existen recomendaciones para determinar la corrección que se debe aplicar a la profundidad medida del instrumento (ISO, 1997). Sin embargo, en la práctica en México, la

tendencia ha sido tratar de mitigar el efecto del arrastre o ignorarlo en lugar de aplicar soluciones para corregir los datos de aforo. El capítulo 4 discute el uso de las soluciones empíricas para corregir la profundidad del molinete.

- **Capítulo 5: Evaluación de los métodos para la determinación de la velocidad media aplicados a los aforos con molinetes**

Cuando se utiliza el método área-velocidad se pretende determinar una velocidad media representativa del flujo pasando por toda o una parte de la sección transversal. En la práctica es común utilizar los métodos denominados de puntos reducidos, que limitan la medición de la velocidad a 0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad correspondiente en la vertical. Esos métodos están basados en estudios empíricos hechos en ríos y según las normas cuentan con una incertidumbre mínima del orden  $\pm 5\%$  (ISO, 1997). Cuando se desea lograr una alta precisión en la estimación del caudal, se opta por métodos que requieren un mayor número de mediciones de la velocidad en cada vertical y permiten trazar perfiles de velocidad a partir relaciones teóricas. Es importante aclarar la validez de las afirmaciones de incertidumbres con respecto a los métodos de puntos reducidos para el caso de un canal prismático revestido. En el capítulo 5 se examinan los métodos utilizados para determinar la velocidad media y su importancia en la estimación de caudal.

## Capítulo

# 2

## MEDICIÓN DEL TIRANTE CON TRANSDUCTORES DE PRESIÓN SUMERGIBLES

### 2.1. INTRODUCCIÓN

El tirante del agua (“stage” en inglés) en un canal se define como “la distancia perpendicular a la plantilla, medida desde el punto más bajo de la sección hasta la superficie libre del agua”. En la práctica se aplica el tirante para determinar el caudal en dos maneras principales. Primero, se mide el tirante para poder definir la geometría de la sección transversal de flujo, la cual permite calcular el área hidráulica. Por otro lado, se mide el tirante para calcular el caudal de manera directa mediante una relación “tirante-gasto” (ISO, 1996, 1998).

Actualmente, existen diversos dispositivos para medir el tirante en canales (ISO, 1996). La técnica tradicional comúnmente utilizada consiste en una escala graduada denominada limnómetro, la cual se instala verticalmente en el canal. Es necesario ubicar este dispositivo en un lugar visible, de manera que se obtengan las lecturas desde un puente o la orilla del canal. La principal desventaja que se presenta con los limnómetros, surge de su incapacidad de funcionar en forma automatizada. Adicionalmente, se presentan problemas cuando hay efectos de oleaje y de variaciones del nivel del agua por turbulencias originadas por la rugosidad o la geometría del canal, entonces debe interpretarse una lectura media (Kennedy *et al*, 2000). A pesar de esas limitaciones, el limnómetro presenta la forma más directa y sencilla

para medir el tirante y se recomienda utilizarla como un instrumento de referencia para verificar la precisión de otras técnicas en el campo (ISO, 1996).

Las técnicas actuales se basan en formas indirectas para estimar el tirante y tienen la ventaja de que se pueden operar en forma automática. Entre ellas se pueden destacar los transductores de presión sumergibles, sensores ultrasónicos y flotadores con encoder. Típicamente, los dispositivos actuales cuentan con una precisión mayor de  $\pm 10\text{ mm}$ , la cual según la norma ISO 1100 (1996), es adecuada para la gran mayoría de aplicaciones de aforo en que se pretende medir el tirante. Sin embargo, debido a la complejidad de las nuevas técnicas, es esencial validar el uso de tales tecnologías mediante análisis comparativos.

Los transductores de presión sumergibles presentan ser una técnica fija que se ha utilizado por más que 10 años para monitorear el nivel de la superficie del agua (Freeman et al, 2004). Las nuevas generaciones de transductores son capaces de proporcionar lecturas con una alta resolución e incluyen un datalogger y sensor de temperatura interna que permite corregir el efecto térmico sobre la densidad del agua (Pressure Systems Inc, 2006). Sin embargo, aún no es una técnica ampliamente utilizada para medir el tirante en canales en México. *El propósito de este capítulo es discutir el uso de transductores de presión sumergibles en la medición del tirante. Además, se evalúa la exactitud, linealidad y estabilidad de un transductor con base en pruebas realizadas en el laboratorio.* Este formará la base para el siguiente capítulo que discute el uso de medidores ultrasónicos para estimar el tirante, una técnica que aun no se ha empleado ampliamente en el aforo de canales.

**2.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN SUMERGIBLES**

El funcionamiento de un transductor de presión sumergible se basa en el principio de equilibrio hidrostático. En el sentido estricto, este principio explica la variación de presiones en un fluido en reposo absoluto o un fluido en movimiento en el cual los esfuerzos cortantes resultan ser nulos, por ejemplo, un fluido que se traslada con una velocidad uniforme. Sin embargo, en la práctica se mantiene para canales en donde se tenga un fondo recto; en tal caso, se ignoran fluctuaciones menores producidas por la turbulencia, además, se supone que las líneas de corriente no tienen curvatura substancial ni divergencia, entonces el flujo se denomina paralelo y prevalece una distribución de presión hidrostática (French, 1988). Se define la presión hidrostática a una cierta profundidad de agua mediante la relación siguiente:

$$P = \rho_w g h \tag{2.1}$$

donde,  $P$ , es la presión hidrostática en Pa,  $\rho_w$ , la densidad del agua ( $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$ , la aceleración debido a la gravedad ( $\approx 9.81 \text{ m/s}^2$ ) y  $h$  la profundidad en donde se pretende determinar la presión.

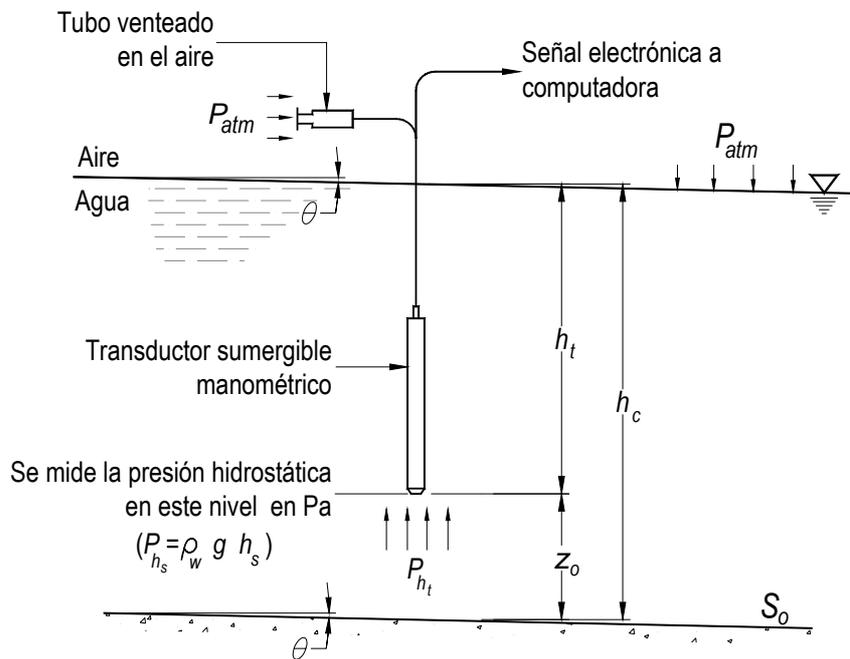


Figura 2- 1: Determinación del tirante con un transductor de presión sumergible

En la figura 2-1 se ilustra la instalación típica de un transductor para estimar el tirante. El transductor mide la presión hidrostática a la profundidad  $h_t$  mediante una membrana sensible, la cual tiene una cara en

contacto con el agua y la otra expuesta a la atmósfera (se trata de un transductor manométrico). Como se puede apreciar, el tirante del agua  $h_c$ , se obtiene sumando la cantidad  $h_t$  a un constante  $z_o$  igual a la distancia del transductor sobre la plantilla del canal, o bien,

$$h_c = z_o + h_t \quad (2.2)$$

Se determina  $h_t$  a partir de la relación hidrostática,

$$h_t = p_{h_t} / \rho_w g \quad (2.3)$$

En la práctica se mide  $z_o$  usando una escala lineal después de haber instalado el transductor. Para estimar  $h_t$  se debe conocer los valores de las variables  $\rho_w$  y  $g$  en el sitio de medición. Típicamente, los nuevos transductores vienen precalibrados con valores convencionales de  $\rho_w$  y  $g$  introducidos en su memoria. Por lo tanto, pueden obtener lecturas en unidades de longitud como mca. En tal caso, la presión proporcionada por el transductor se puede tomar como una aproximación de  $h_t$ . Ahora bien, considerando el rango de posibles valores de  $g$  ( $9.789 \text{ m/s}^2 - 9.832 \text{ m/s}^2$ ) y los diversos factores que influyen en la magnitud de  $\rho_w$  (ver la siguiente sección), se recomienda hacer una calibración en el sitio de medición antes de utilizar un transductor para medir el tirante. De la calibración se obtiene una relación lineal entre el tirante y la presión del agua; dicha relación toma la forma siguiente.

$$h_c = \alpha P_{h_t} + \beta \quad (2.4)$$

donde,  $\alpha$  y  $\beta$  son términos constantes. El término  $\alpha$  se conoce como la sensibilidad del transductor y corresponde al cambio de presión del agua provocado por un cambio unitario del tirante.  $\beta$ , incluye el valor  $z_o$  y el offset del transductor (el valor de la señal de salida del transductor cuando esta en el aire).

## 2.3. CONSIDERACIONES PRINCIPALES EN LA ESTIMACIÓN DEL TIRANTE

### 2.3.1. Condiciones en el sitio de medición

Para estimar el tirante a partir del principio de equilibrio hidrostático, se debe conocer la densidad del agua  $\rho_w$ , y la aceleración de la gravedad  $g$ . En muchas aplicaciones prácticas, se considera que esas variables toman los siguientes valores constantes:  $\rho_w \approx 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$  y  $g \approx 9.80665 \text{ kg} / \text{m}^3$ . Ahora bien, para un sitio de aforo particular, esta suposición introduciría un error en la estimación del tirante. Por lo tanto, se recomienda verificar sus magnitudes en el campo, lo cual permite determinar el factor de corrección a aplicar a la presión (cuando se trata de presiones en mca).

*Aceleración de la gravedad  $g$* : el valor de  $g$  depende principalmente de la latitud, altitud, topografía y geología del sitio. Se han publicado valores de  $g$  para diferentes latitudes y altitudes los cuales se pueden consultar en tablas de geología.

*Densidad del agua  $\rho_w$* : estudios experimentales han indicado que las propiedades que más influyen en la densidad del agua son la temperatura y la salinidad. En la tabla 2-1 se presentan valores de la densidad del agua para diferentes temperaturas. Se observa que la densidad alcanza un valor máximo a una temperatura de  $4^\circ\text{C}$  y su magnitud disminuye levemente para temperaturas mayores o menores que este valor.

Tabla 2- 1: Variación de la densidad del agua pura y líquida con la temperatura (Fair et al, 1996)

Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
60	0.9832	15	0.9991
40	0.9922	10	0.9997
30	0.9957	4	1.0000
25	0.9970	0	0.9998
22	0.9978	-10	0.9981
20	0.9982		

Considerando el rango de temperaturas que se presentan en los problemas prácticos, y las magnitudes de las variaciones enseñadas en la tabla 2-1, se puede concluir que el efecto térmico sobre la densidad de agua es despreciable. Sin embargo, algunos transductores cuentan con un sensor de temperatura interna que corrige la densidad conforme a los cambios de temperatura del agua.

La salinidad del agua define la concentración de sales disueltas, específicamente, cloruros en un volumen unitario. Tradicionalmente, se ha utilizado la unidad *mg/l*, que refiere a la cantidad de gramos de sales presentes en cada litro de solución. La densidad del agua aumenta con la salinidad debido a la masa incorporada de las sales disueltas (Fair et al, 1996). Ahora bien, cuando se trata de canales de drenaje y riego, el agua se considera como agua fresca, la cual tiene una salinidad menor a 0.5 g/l. Además, no se presentan variaciones considerables en la salinidad del agua y por lo tanto, se pueden despreciar los cambios en la densidad.

Otro variable que puede tener un efecto sobre la densidad del agua es el contenido de sedimentos. En los cauces naturales la concentración de sedimentos arrastrados por el agua puede alcanzar magnitudes relativamente altas. Condiciones similares pueden presentarse en los canales revestidos después de una tormenta o avenida que provoca erosión en la zona periférica del canal. Básicamente, se forma una mezcla agua-sedimentos que tiene un comportamiento hidráulico diferente al caso de un flujo de agua. Aún no se han realizados estudios para cuantificar la importancia del contenido de sedimentos en la densidad del agua. De hecho en la literatura, no se habla mucho al respecto.

De la consideración anterior, se aprecia que en un sitio particular donde se pretende medir el tirante de agua fresca, en un rango de temperaturas relativamente estable, y con un contenido bajo de material en suspensión, la densidad del agua no cambiaría de manera significativa.

### **2.3.2. Desgaste del componente sensible del transductor**

Uno de los principales problemas de los transductores de presión sumergibles es la necesidad de hacer calibraciones rutinarias a esos equipos debido a cambios progresivos en la sensibilidad con el tiempo (Tamari et al, 2005). Esos cambios pueden relacionarse con alteraciones en las propiedades físicas del elemento sensible del transductor, que se encuentra expuesto al agua. En tal caso, los efectos sobre la respuesta del transductor son irreversibles. Además, puede ocurrir que el instrumento pierda su precisión

en la estimación de la presión. Por esas razones se recomienda hacer una calibración rutinaria (en intervalos de meses) para asegurar que el dispositivo sigue funcionando de manera aceptable.

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

Se probaron la exactitud, linealidad y estabilidad de cuatro transductores de presión sumergibles en el laboratorio de Hidráulica, Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTALAB). A continuación, se presentan unos detalles de las pruebas realizadas.

### 2.4.1. Especificaciones de los transductores probados

Se probaron cuatro transductores de la marca KPSI fabricados por la compañía "Pressure Systems Inc. (Hampton, USA)". En la tabla 2-2 se presentan algunos datos y especificaciones de los transductores evaluados.

Tabla 2- 2: Datos y especificaciones de los transductores de nivel evaluados (Pressure Systems, 2005)<sup>1</sup>

Datos	PRESSURE SYSTEMS WATER MONITORS			
	1	2	3	4
Modelo	551	550	551	551
Número de serie del transductor	706221	607451	601841	601842
Rango de medición de la presión (mca)	0 - 5	0 - 30	0 -10	0 - 3
Precisión de la presión medida	±0.05% FS TEB	±0.05% FS TEB	±0.05% FS TEB	±0.10% FS TEB
Precisión de la temperatura medida (°C)	±0.2	±0.2	±0.2	±0.2

Cada uno de los transductores evaluados cuenta con una capacidad interna de almacenamiento de 60,000 datos de medición y puede funcionar en forma automatizada. La operación de los transductores KPSI se logra mediante el programa K-ware que permite al usuario especificar y controlar variables que afectan el funcionamiento del equipo. Se muestran unos elementos de la interfaz del programa K-ware en las figuras 2-2 y 2-3.

### 2.4.2. Escala de referencia

La escala lineal de referencia utilizada en las pruebas consistió en una cinta métrica de metal con una precisión de ±1 mm.

<sup>1</sup> TEB significa "Total Error Band" en inglés y incluye el error combinado debido a la no linealidad, histéresis, no repetibilidad y efectos térmicos dentro del rango de operación de temperatura del transductor.

FS = "full scale"

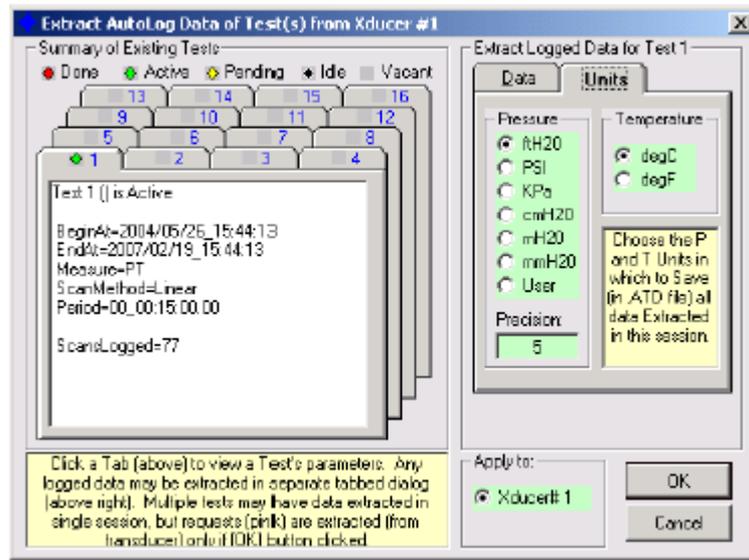


Figura 2- 2: Interfaz de usuario del programa Kware que permite controlar las variables que afectan el funcionamiento del transductor (Pressure Systems, 2005)

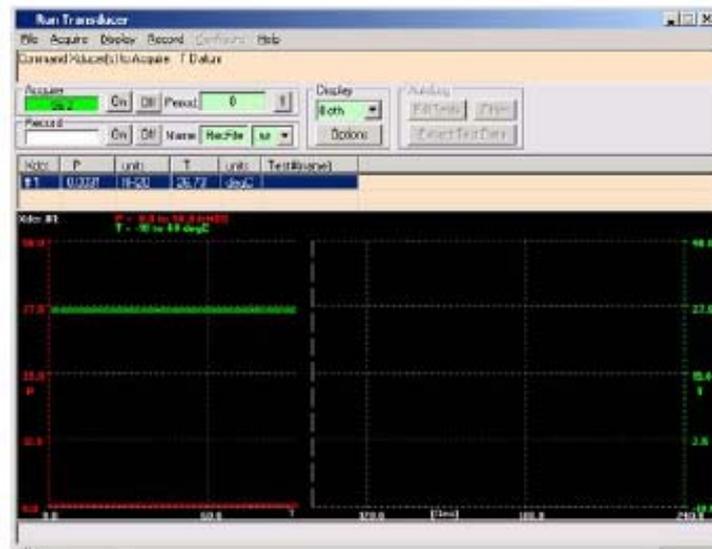


Figura 2- 3: Visualización gráfica de variables de medición en K-ware(Pressure Systems, 2005)

### **2.4.3. Procedimiento experimental de calibración a corto plazo (durante una hora)**

Se realizaron una serie de calibraciones a corto plazo (es decir, durante una hora). Los dispositivos fueron instalados en un tanque transparente con una altura aproximada de 2.4 m, como se ilustra en la figura 2-4 y el procedimiento de calibración consistió en los siguientes pasos:

1. Primero, se llenó el tanque con aproximadamente 0.2 m de agua utilizando una manguera conectada a una fuente de agua.
2. Después, se midió el tirante en m con la escala lineal y la presión en mca con el transductor de presión (usando el programa K-ware). En cada caso, se toma un promedio de 4 lecturas para minimizar el error en la medición. Además, para asegurar la estabilidad de la superficie libre del agua fue necesario esperar unos minutos antes de tomar las lecturas.
3. Se repitieron los pasos 1 y 2 para diferentes tirantes.

Este procedimiento fue repetido para los cuatro transductores señalados en la tabla 2-2. Las lecturas obtenidas de las dos técnicas fueron utilizadas para determinar la relación de calibración de cada transductor mediante una correlación lineal.

### **2.4.4. Procedimiento experimental de calibración a medio plazo (durante 30 días)**

En este caso se midieron una serie de tirantes con el transductor (solo el modelo KPSI 551-601842) y la escala lineal a lo largo de un mes, durante el cual el transductor se mantuvo dentro del agua. Esta prueba se llevó a cabo con la finalidad de examinar la evolución de la relación de calibración del transductor durante un periodo extendido.

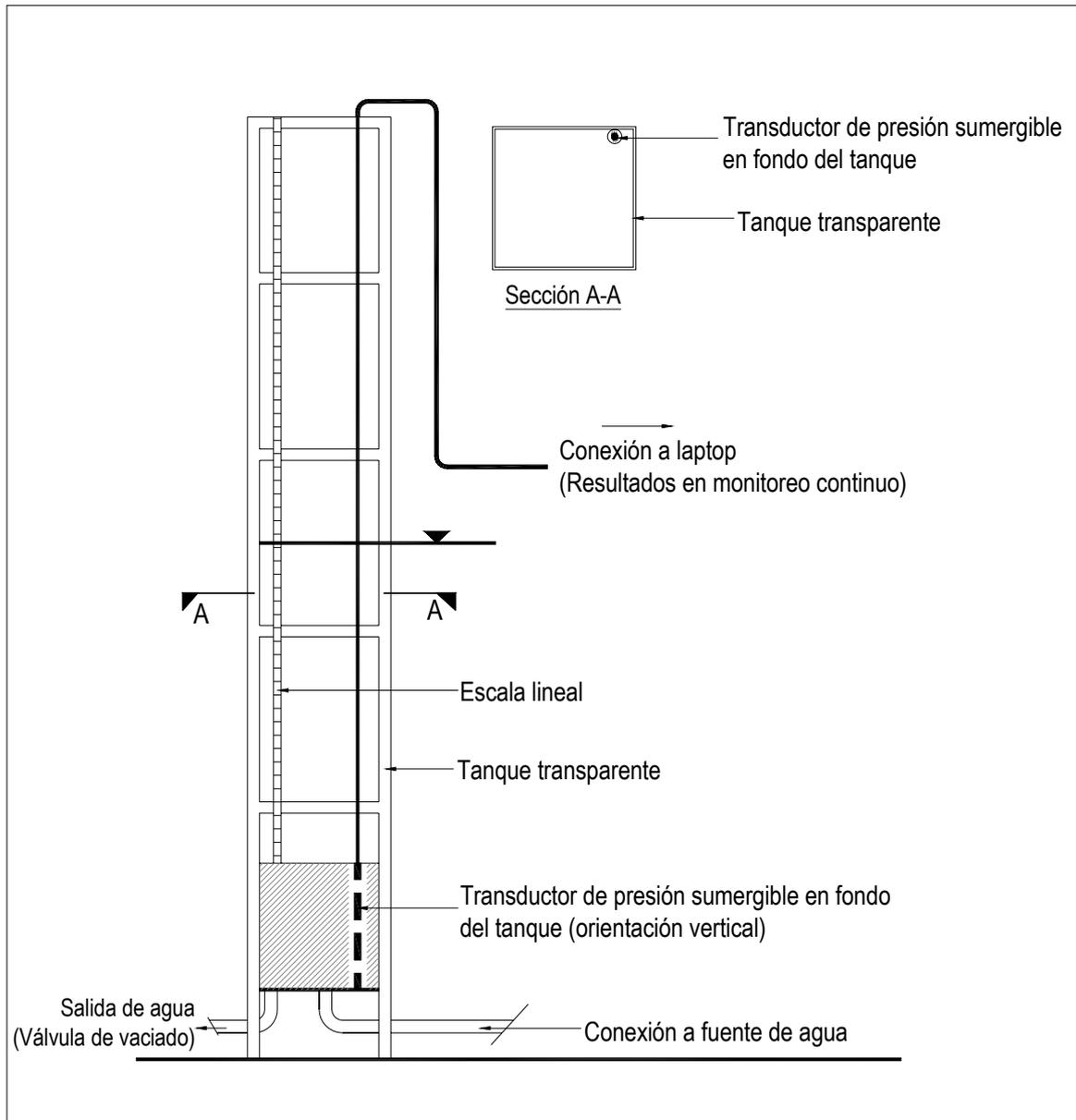


Figura 2- 4: Ilustración del tanque transparente en donde se probaron los dispositivos para

## 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

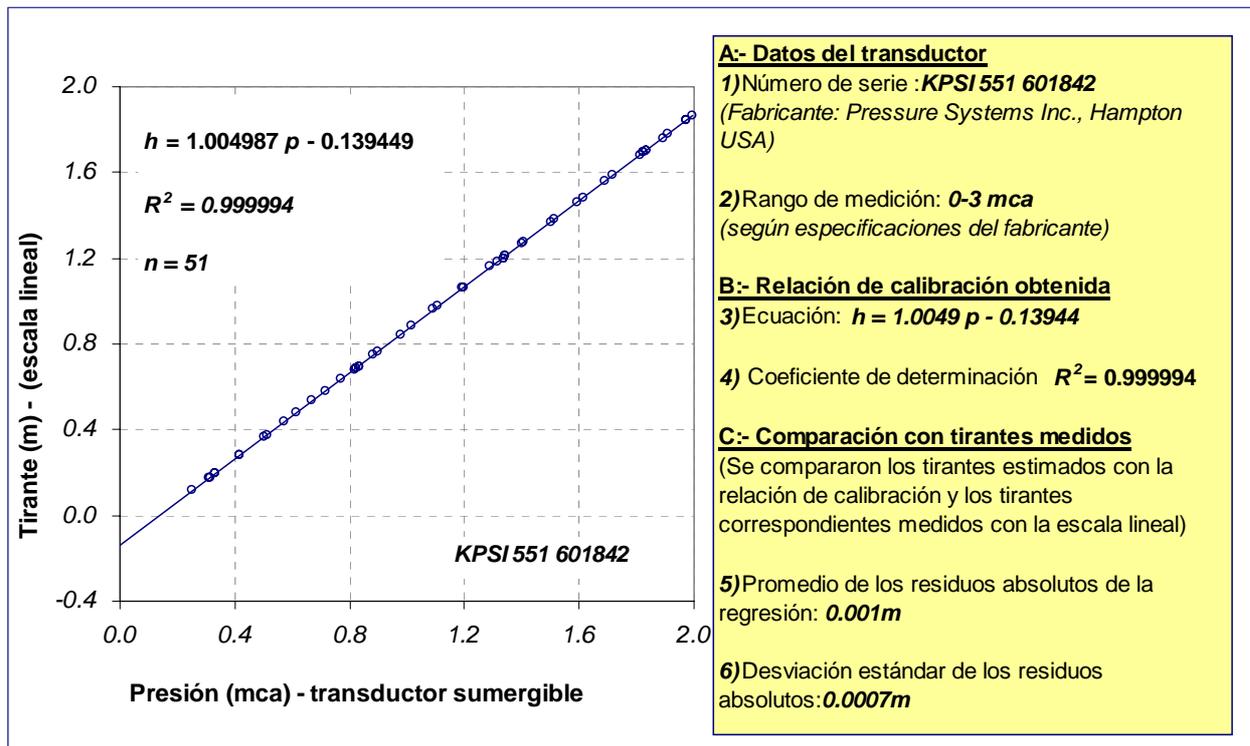
### 2.5.1. Calibraciones a corto plazo

A continuación se presentan los resultados de las calibraciones a corto plazo. Para cada transductor se muestra la curva tirante (m), medida con la escala lineal, contra presión (mca), medida con el transductor, de la cual se obtuvo la relación lineal de calibración. Además, se indica en forma grafica los residuos de la calibración.

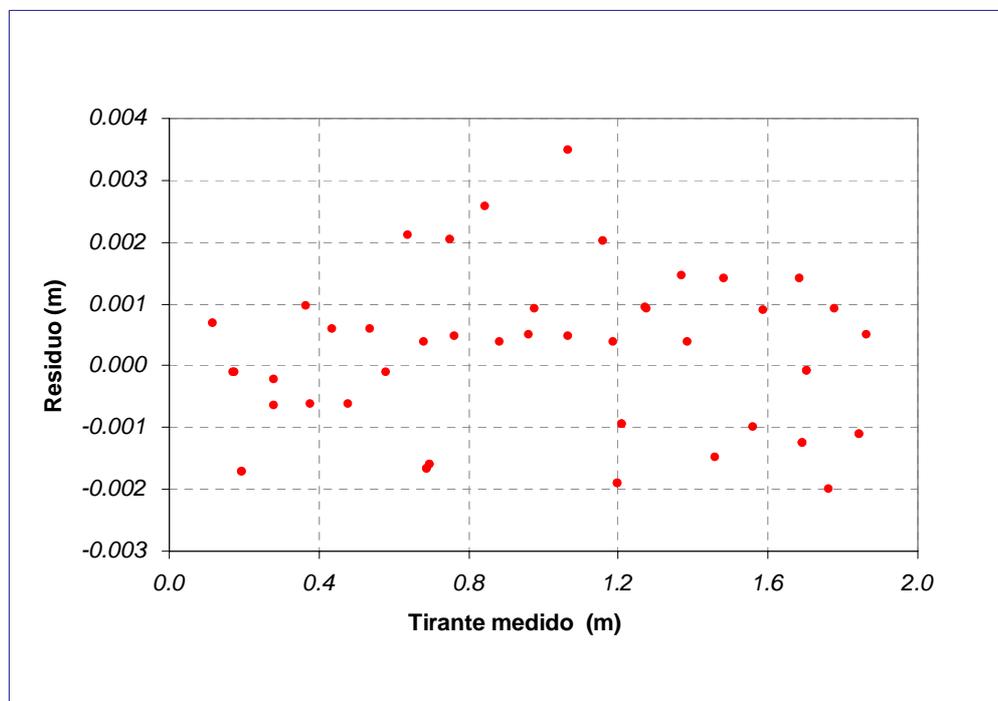
Como se mencionó en la sección 2.2, la curva de calibración toma la forma siguiente:  $h_c = \alpha P_{ht} + \beta$ , donde  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes. Teóricamente,  $\alpha$  depende de las unidades utilizadas para estimar el tirante y la presión del agua. En las pruebas realizadas se midió la presión en mca y tirantes en m. Entonces, en este caso, el valor esperado de  $\alpha$  es  $\approx 1$ . Ahora bien, esta aseercción considera que la densidad del agua ( $\rho_w$ ) utilizada y la magnitud de la aceleración de gravedad  $g$  en el laboratorio, se aproximan a los valores correspondientes programados en la memoria de los transductores. El valor de  $\beta$  incluye la distancia  $z_o$  y un componente que corresponde al offset del transductor en el aire, el cual es difícil evaluarse matemáticamente. En este caso se instaló el transductor en el fondo del tanque, entonces  $z_o = 0$ . Por lo tanto,  $\beta$  es equivalente al offset del transductor y debe tomar un valor relativamente pequeño.

Se observó que para los transductores probados la magnitud de  $\alpha$  y  $\beta$  fueron congruentes con los valores esperados (valores de  $\alpha \approx 1$  y  $\beta < 0.15$  mca en todos los casos). Además, los residuos de las calibraciones estuvieron dentro de un rango de  $\approx \pm 2$  mmca, lo que indica una linealidad mejor a  $\pm 7\%$  EM [p = 95] (ver las graficas 2-1 a 2-8).

**Resultados de la calibración a corto plazo: transductor sumergible KPSI 551 601842**

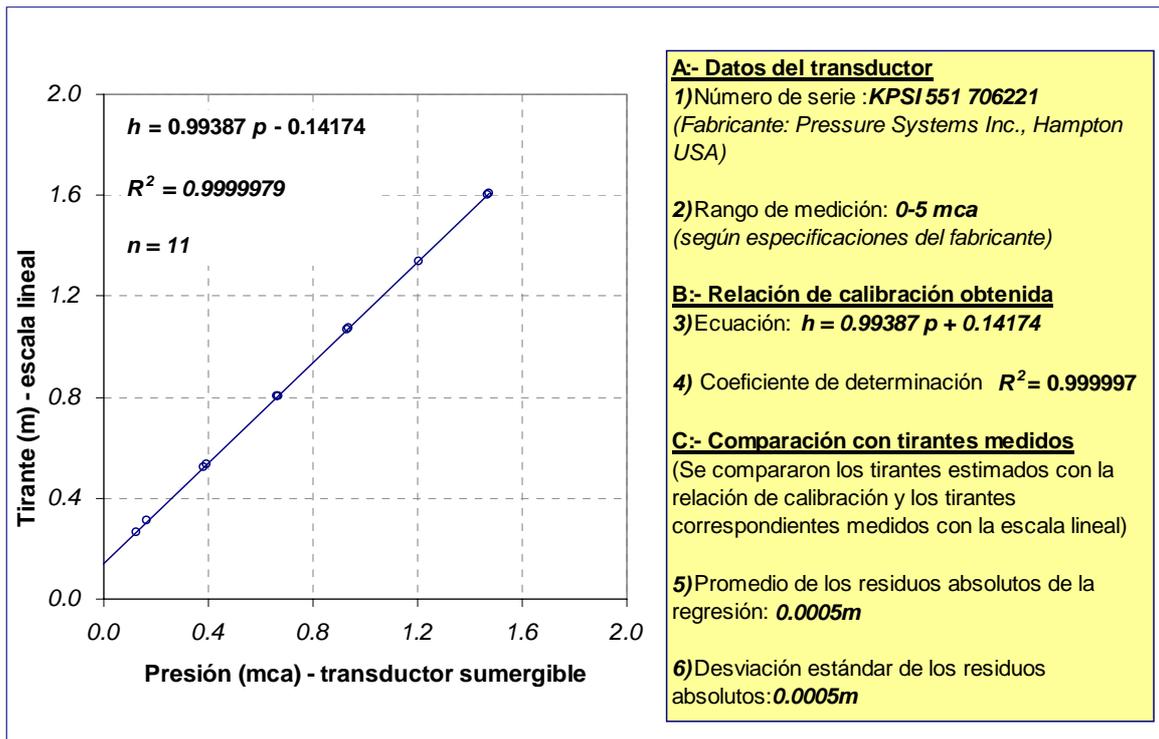


Gráfica 2- 1: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 551 601842

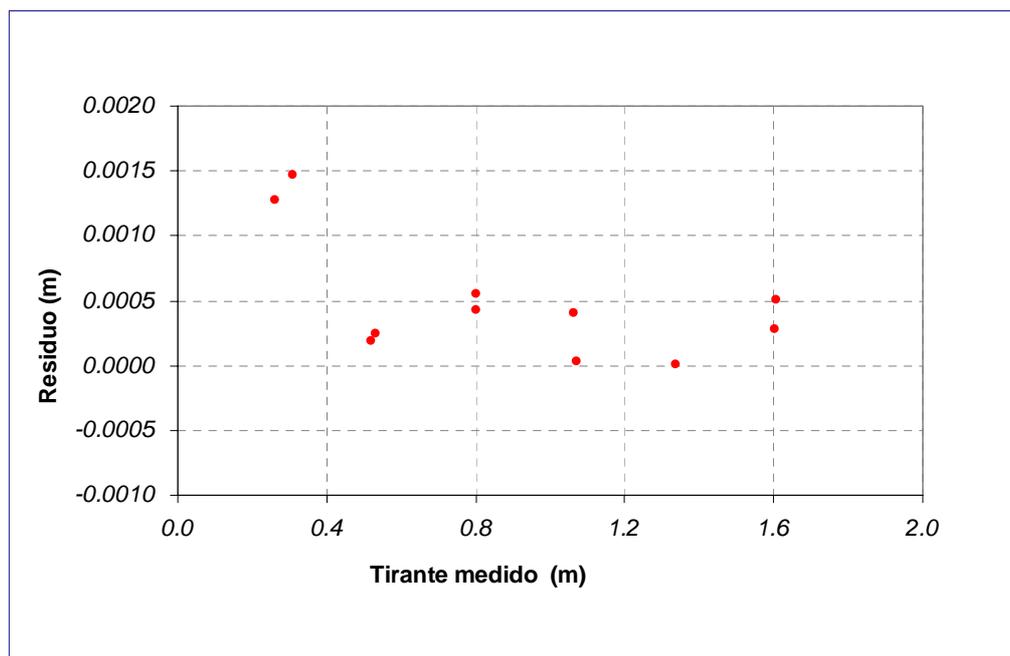


Gráfica 2- 2: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 551 601842

**Resultados de la calibración a corto plazo: transductor sumergible KPSI 551 706221**

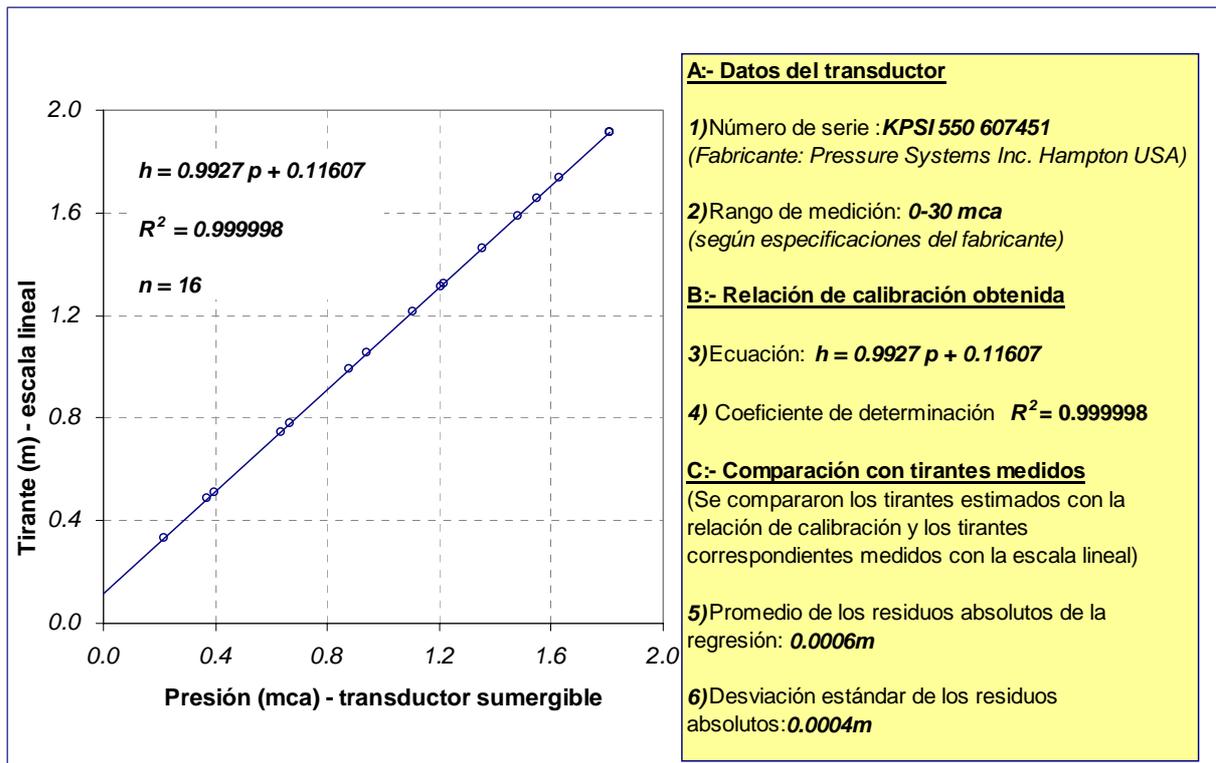


Gráfica 2- 3: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 551 706221

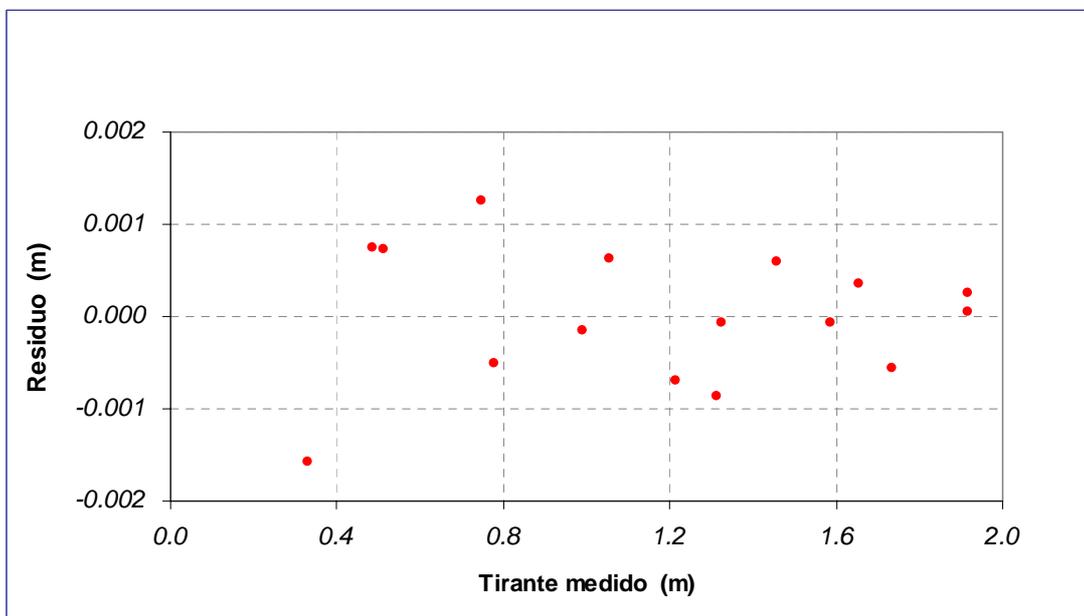


Gráfica 2- 4: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 551 706221

**Resultados de la calibración a corto plazo: transductor sumergible KPSI 550 607451**

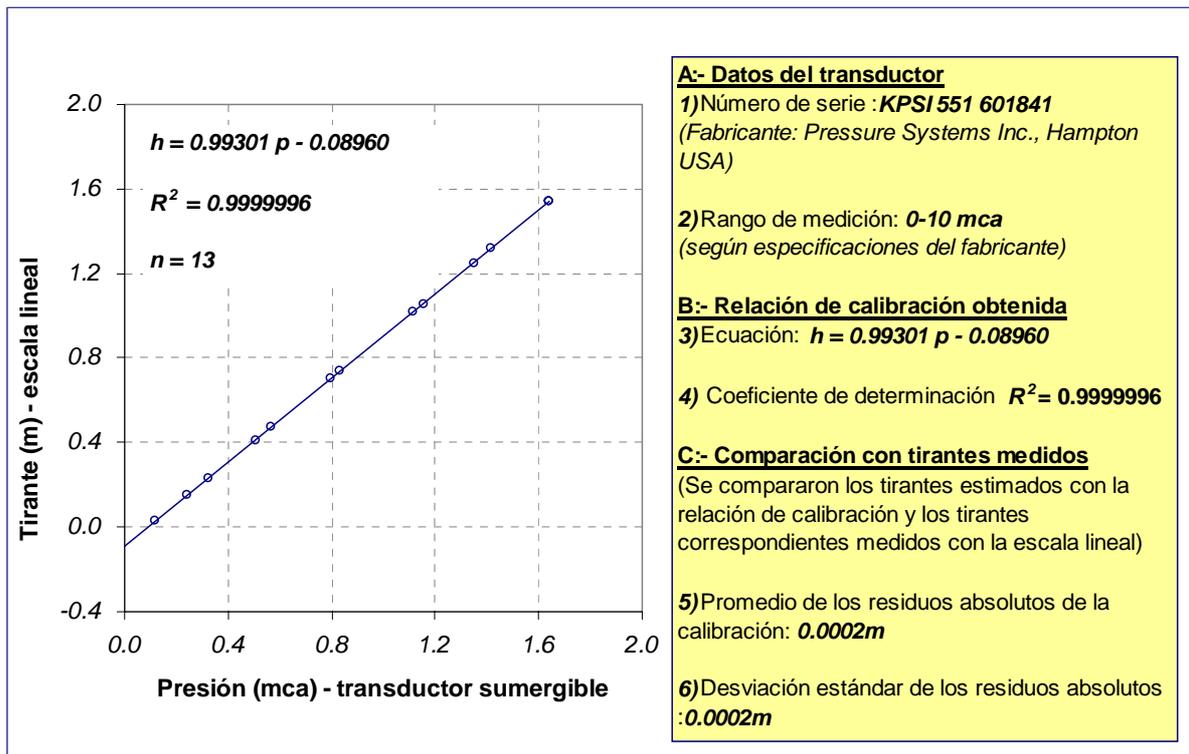


Gráfica 2- 5: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 550 607451

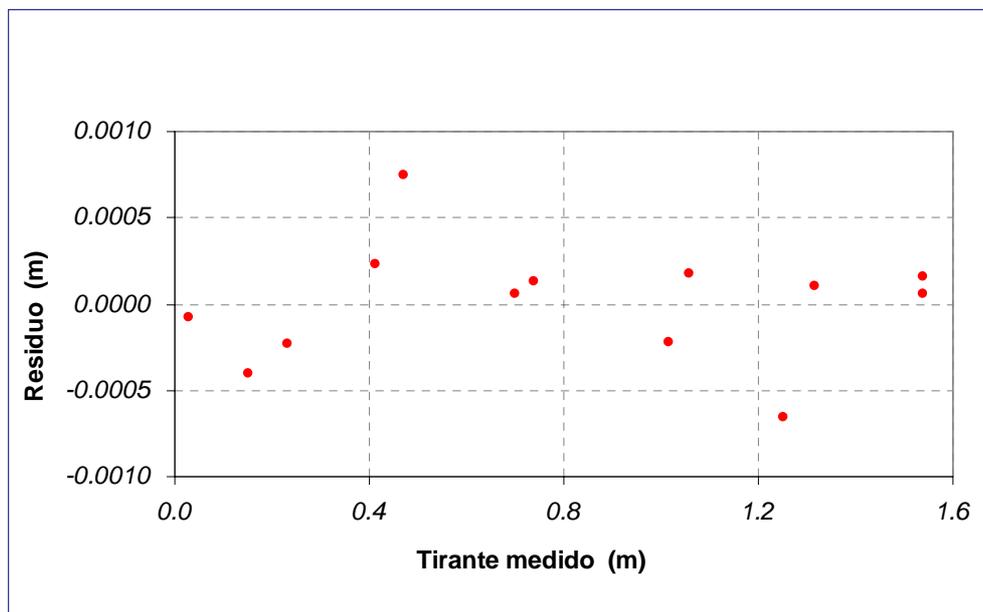


Gráfica 2- 6: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 550 607451

**Resultados de la calibración a corto plazo: transductor sumergible KPSI 551 601841**



Gráfica 2- 7: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 551 601841

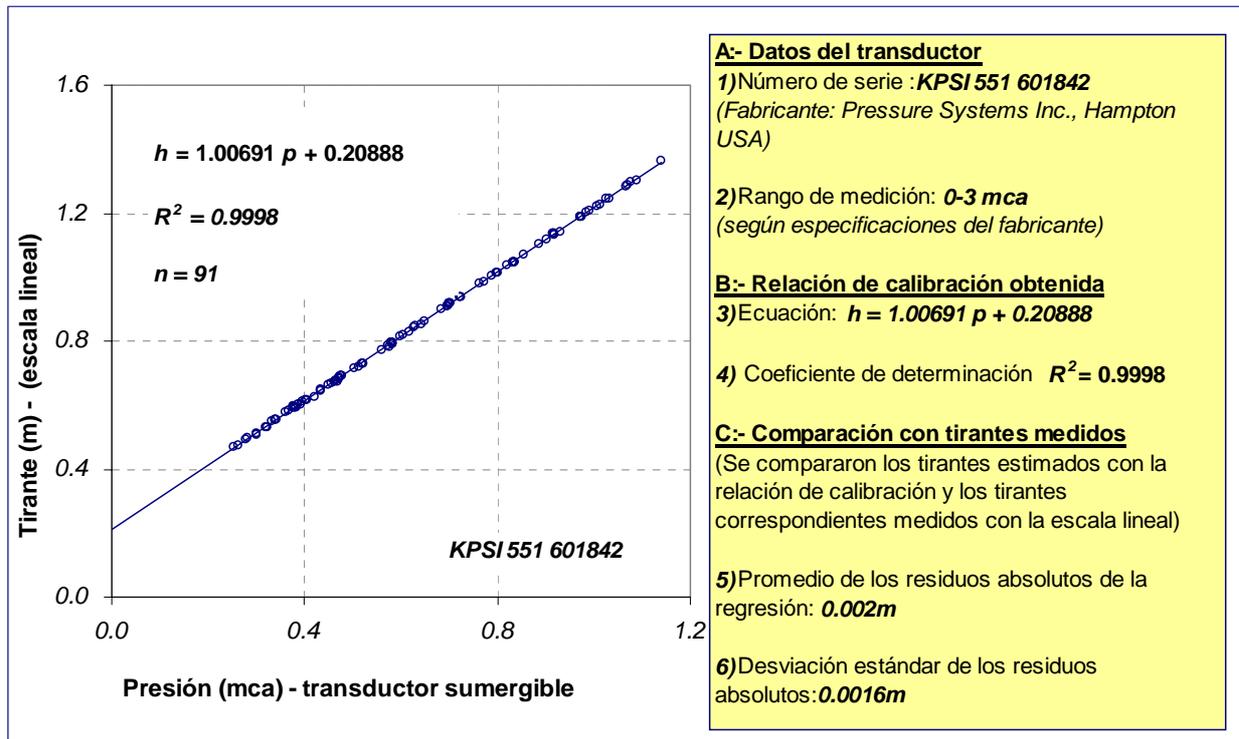


Gráfica 2- 8: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 551 601841

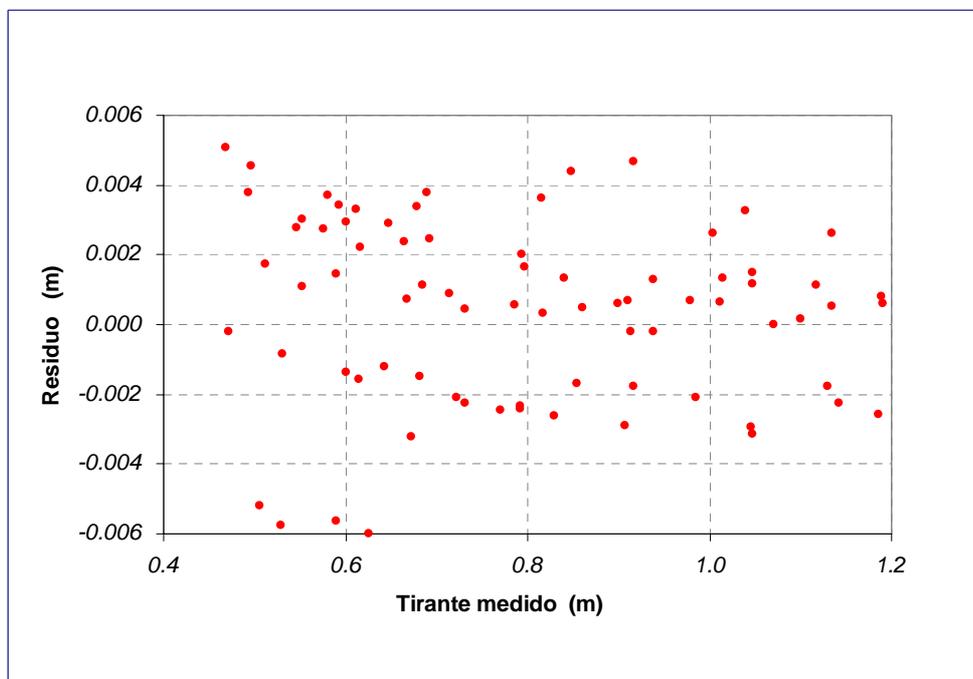
### **2.5.2. Calibración a medio plazo**

Los resultados de las calibraciones a medio plazo se presentan en las graficas 2-9 y 2-10. Se encontró que el valor de  $\alpha$  cambió de 1.0049 a 1.0069, el cual corresponde a un cambio de  $\approx 0.002$  ( $2\text{ mm}$ ) en la sensibilidad del transductor a lo largo de un mes. En términos prácticos este corresponde a un cambio de  $\approx 0.002\text{ mm}$  en la exactitud del transductor. Considerando que en la prueba las variaciones en los valores de  $\rho_w$  fueron despreciables y la magnitud de  $g$  se mantenía constante, entonces, el cambio en la sensibilidad puede atribuirse a factores relacionados con el transductor. En condiciones de campo donde se pretende estimar el tirante con una precisión mínima de  $\pm 10\text{ mm}$  un cambio de  $2\text{ mm}$  no es significativo. Sin embargo, el efecto acumulado del cambio de sensibilidad puede introducir un error importante en la estimación del tirante. Esta prueba sugiere que convendría verificar la calibración de un transductor en intervalos de un mes.

**Resultados de la calibración a medio plazo: transductor sumergible KPSI 551 601842**



Gráfica 2- 9: Curva de calibración a corto plazo del transductor sumergible KPSI 550 601842



Gráfica 2- 10: Distribución de los residuos absolutos de la calibración del transductor KPSI 551 601842

## **2.6. CONCLUSION DEL CAPÍTULO**

Este capítulo consideró los factores principales que se deben tomar en cuenta cuando se utiliza un transductor de presión para estimar el tirante. Los datos experimentales presentados fueron obtenidos mediante pruebas realizadas con cuatro transductores de la marca KPSI. De una calibración a corto plazo se encontró que los transductores probados son capaces de estimar el tirante con una precisión del orden de  $\pm 2$  mm. Sin embargo, la calibración de medio plazo indicó que puede presentarse un cambio gradual en la sensibilidad los dispositivos, el cual fue del orden de  $\approx 0.002$  (2 mm) en un periodo de un mes para el transductor probado. En condiciones relativamente estables, donde las propiedades del agua no cambian de manera significativa, la variación de la sensibilidad puede relacionarse a componentes en el transductor, por ejemplo deformaciones de la membrana sensible etc.

En las pruebas de laboratorio no se presentaron variaciones considerables en la salinidad y temperatura del agua. Además, la superficie del agua se mantuvo relativamente estable. Ahora bien, en la práctica no se puede despreciar el efecto de las variaciones en las propiedades del agua y la turbulencia sobre la precisión y sensibilidad del transductor. Por lo tanto, convendría realizar estudios adicionales en canales enfocándose particularmente en la importancia de la temperatura, contenido sólido y comportamiento hidráulico en la aplicación de esta técnica.

En el siguiente capítulo se evalúa la medición del tirante con medidores ultrasónicos junto con un análisis comparativo entre esta técnica y la técnica evaluada en este capítulo.

## Capítulo

---

# 3

### EVALUACIÓN DE MEDIDORES ULTRASÓNICOS PARA MEDIR EL TIRANTE

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

En años recientes han surgido diversos equipos para aforar canales, los cuales tienen su fundamento en la tecnología acústica de efecto Doppler. Típicamente, estos dispositivos están adaptados a la medición de la velocidad de flujo y la obtención de perfiles de velocidad tanto en el sentido horizontal como vertical. Los medidores ultrasónicos pueden clasificarse como móviles o fijos. Los medidores fijos están diseñados para colocarse en una posición permanente en el talud o fondo del canal y en su mayoría, cuentan con un haz vertical que permite medir el tirante de agua por encima del dispositivo (SonTek, 2005). En este sentido, las mediciones simultáneas del tirante con el haz vertical complementan las lecturas de velocidad para estimar el caudal.

En el capítulo 2 se concluyó que una técnica indirecta basada en el uso de un transductor de presión sumergible produce estimaciones similares a una escala lineal para tirantes medidos en el laboratorio. *Este capítulo se enfoca al uso de medidores ultrasónicos sumergidos con haz vertical para estimar el tirante.*

### 3.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS SENSORES ULTRASÓNICOS DE NIVEL

Típicamente, un medidor ultrasónico de nivel cuenta con un emisor y receptor de ondas de sonido, los cuales trabajan dentro del rango de frecuencias denominado ultrasónico (mayores que 15,000 Hz). Las ondas ultrasónicas avanzan en el agua con una velocidad entre 1,400 m/s y 1,500 m/s (ISO, 2004). En términos básicos, los fundamentos de operación de esos equipos pueden relacionarse con alguno de los siguientes fenómenos físicos:

1. La reflexión de ondas de sonido de las fronteras del canal, la superficie libre del agua y obstáculos que se encuentran dentro del flujo p.e. partículas sólidas en suspensión, objetos flotantes etc.
2. El efecto del flujo sobre la frecuencia y velocidad de las ondas de sonido.
3. La estimación de la distancia entre dos puntos a partir la velocidad de sonido y el tiempo que tarda una onda en moverse entre ellos.

En la figura 3-1 se ilustra el principio de operación utilizado en los medidores ultrasónico de nivel. El haz vertical se encuentra en la parte superior del equipo y funciona como un emisor y receptor de pulsos de sonido. Como se puede apreciar, el tirante se determina sumando, la distancia del haz vertical sobre la plantilla del canal  $z_o$  y la variable  $h_m$  que corresponde a la distancia entre la superficie del agua y la parte superior del medidor. Para estimar el valor de  $h_m$  se emite un pulso de sonido hacia la superficie (figura 3-1a), la cual refleja una parte del pulso hacia el receptor. Este pulso se distingue por su mayor intensidad en comparación con pulsos reflejados por las partículas en suspensión (SonTek, 2005). Se calcula la distancia  $h_m$  usando la relación siguiente:

$$h_m = (c \Delta t / 2) \quad (3-1)$$

donde,  $c$ , es la velocidad del sonido en el agua en m/s y  $\Delta t$  es el tiempo de recorrido del pulso en s. Entonces el tirante esta dado por la relación siguiente:

$$h_c = z_o + c \Delta t / 2 \quad (3-2)$$

En la práctica se mide la distancia  $z_o$  utilizando una escala lineal.

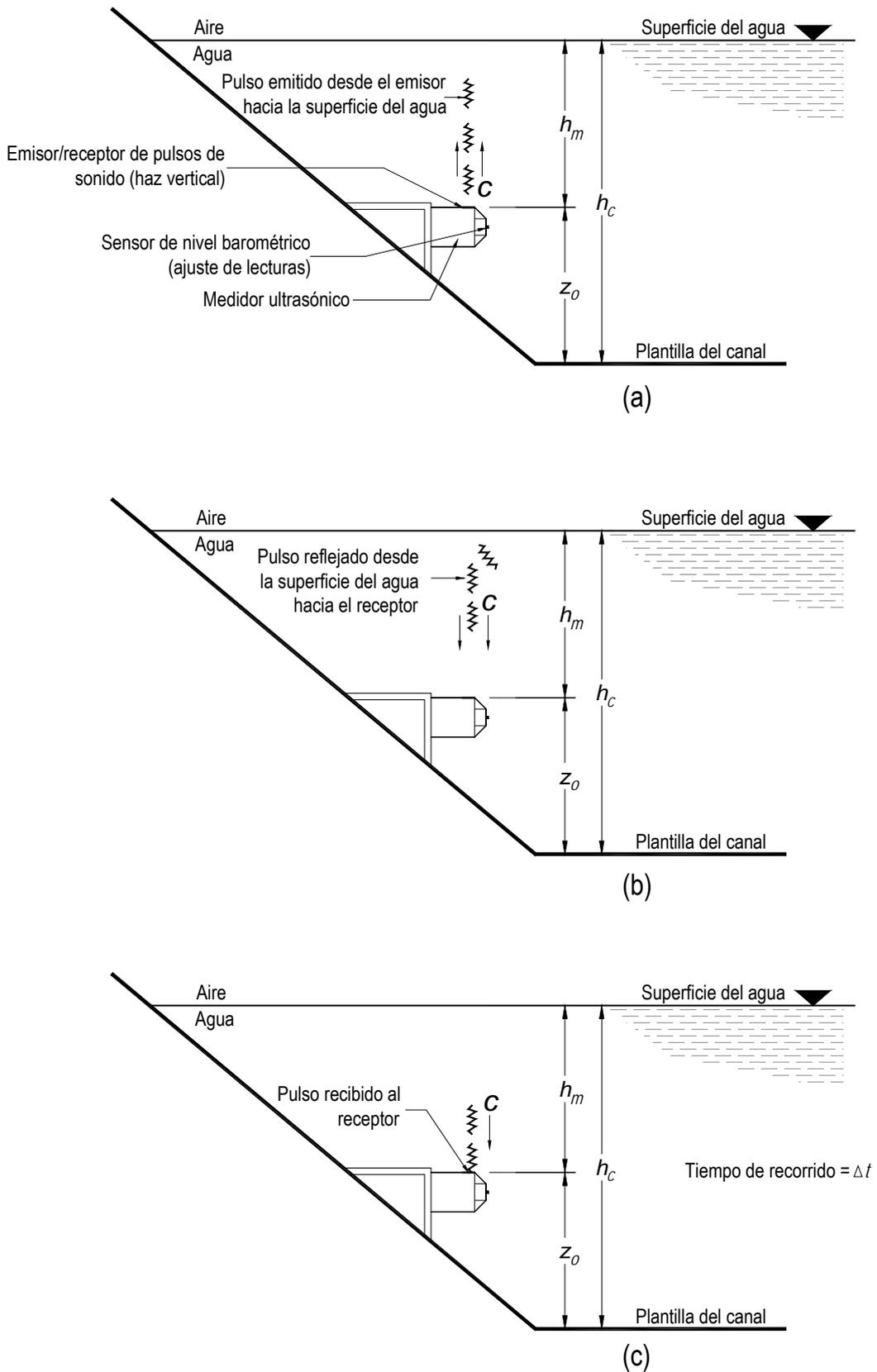


Figura 3- 1: Estimación del tirante con un medidor ultrasónico, ilustración del principio de operación

Para lograr una estimación precisa del tirante a partir de la relación 3-2 se necesita conocer la velocidad del sonido en el agua. En general la magnitud de  $c$  es independiente de la frecuencia de la

onda, pero, varía con la temperatura, salinidad y presión del agua. Sin embargo, en los canales abiertos el efecto de la presión es despreciable (ISO, 2004). En la tabla 3-1 se muestra la velocidad de sonido en agua dulce para diferentes temperaturas.

Tabla 3- 1: Velocidad de sonido en agua dulce a diferentes temperaturas (ISO, 2004)

Temperatura °C	Velocidad del Sonido (aproximada) (m/s)
0	1402
10	1447
20	1482
30	1509
40	1529

Nota 1: Los valores aplican a agua en la mayoría de los ríos de agua dulce y alcantarillados.  
Nota 2: En agua de mar, las velocidades correspondientes son 50 m/s más grandes.

Los nuevos medidores ultrasónicos cuentan con un sensor de temperatura que ajusta la velocidad del sonido conforme a los cambios de temperatura que se presenta en el agua. En dado caso, se asume que la temperatura es constante en la columna de agua por encima del medidor. Adicionalmente, se permite definir la salinidad mediante el programa de manejo del equipo (SonTek, 2005). Otro elemento característico de esta técnica es la incorporación de un sensor de presión barométrico en el diseño del medidor. Dicho sensor proporciona una estimación preliminar del tirante, la cual se utiliza para chequear el valor estimado con el haz vertical. En la figura 3-2 se muestran dos medidores ultrasónicos de la marca SonTek. En el caso del modelo 3 MHz SL se puede ver el sensor barométrico en la parte delantera del medidor.



(a) 3 MHz SL

(b) 0.5 MHz SL

Figura 3- 2: Medidores ultrasónicos con haz vertical en para estimar el tirante ( SonTek, 2005)

### 3.3. LIMITACIONES DE LA TÉCNICA ULTRASÓNICA PARA MEDIR EL TIRANTE

#### 3.3.1. Distancia de cancelación de la señal (“blanking distance”)

La distancia de cancelación define el intervalo en el cual el sensor no puede realizar mediciones. Esto se debe a que después de emitir un pulso ultrasónico, el instrumento necesita un tiempo corto ( $\approx 170 \mu s$ ) para recuperarse antes de recibir la señal reflejada. Durante este tiempo, el pulso emitido avanza una distancia la cual corresponde al tirante mínimo que se puede medir. En la tabla 3-2 se muestra la distancia de cancelación para tres frecuencias diferentes SonTek, 2005. Como se puede observar, este valor es menor para mayores frecuencias de operación. En la práctica se debe considerar esta distancia en el contexto del rango de tirantes que se quiere monitorear y la profundidad de instalación del medidor.

Tabla 3- 2: Tirante mínimo de medición para diferentes frecuencias de operación: (SonTek, 2005)

Frecuencia KHz	Tirante mínimo (m) (distancia de cancelación)
500	0.40
1500	0.25
3000	0.10

#### 3.3.2. Relación de la señal/ruido (Signal-to-noise ratio, SNR)

La técnica ultrasónica estima el tirante a partir de pulsos acústicos reflejados desde la superficie libre del agua. La magnitud del pulso reflejado se denomina intensidad de la señal y disminuye con la distancia entre el medidor y la superficie del agua debido a la difusión geométrica y absorción del sonido. Para lograr una estimación precisa del tirante, es necesario tener una intensidad de señal mayor que el nivel de ruido electrónico del dispositivo. En ese sentido, se maneja el término “relación de la señal/ruido ( $SNR$ )” que se define como la diferencia entre la magnitud de la señal reflejada y la intensidad del ruido interno del medidor, y el cual depende de las propiedades del agua.

Se mide la intensidad de señal y ruido electrónico en “counts” ( $\approx 0.43 dB$ ). En general, se requiere un valor mínimo del  $SNR \approx 3 dB$  para tener una estimación precisa del tirante (SonTek, 2005). Existen medidores ultrasónicos que permiten al usuario verificar el  $SNR$  del sistema con la finalidad de asegurarse que la

intensidad de las señales es adecuada para realizar las mediciones dentro del rango de tirantes deseados. En dado caso de que el SNR no sea adecuado, se ajusta el intervalo de tirantes en forma automática para lograr un rango óptimo de medición. Además, como se mencionó en la sección anterior, algunos medidores tienen un sensor de nivel barométrico que se utiliza para corroborar las mediciones del haz vertical (SonTek, 2005).

### 3.4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Se comparó la técnica ultrasónica con un transductor de presión sumergible (capítulo 2) y una escala lineal mediante una serie de pruebas de laboratorio. A continuación se presenta una descripción breve de las pruebas realizadas.

#### 3.4.1. Tanque usado

Se utilizó un tanque con una altura  $\approx 1.4$  m que se llenaba y vaciaba con dos válvulas conectadas a los sistemas de suministro de agua y drenaje del laboratorio. Se colocaron los dispositivos en la pared del tanque como se muestra en la figura 3-3 y la foto 3-1.

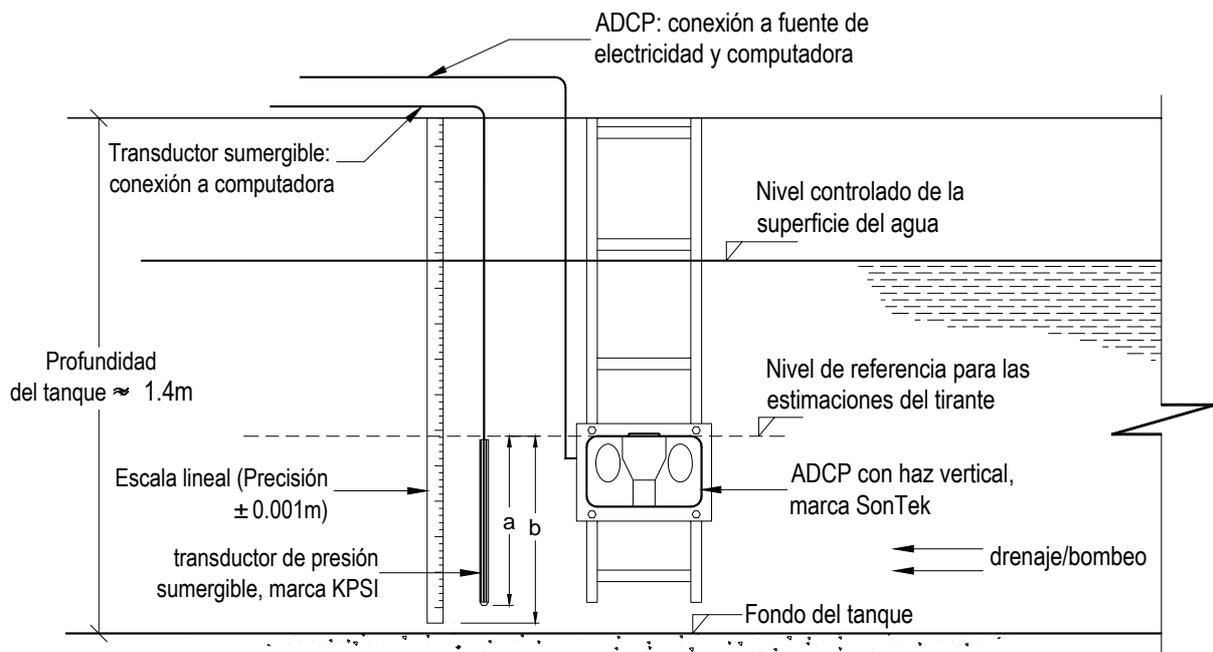


Figura 3- 3: Instalaciones para medir el tirante en un tanque



Foto 3- 1: Tanque de concreto vacío mostrando la escala lineal, transductor de presión y medidor ultrasónico

### 3.4.2. Especificaciones de los dispositivos probados

*Escala lineal graduada:* La escala lineal utilizada consistió en una cinta métrica de metal con una precisión de  $\pm 1$  mm.

*Transductor de presión sumergible:* Se utilizó un transductor de presión sumergible de la marca KPSI. Antes de instalar el dispositivo, se hicieron una serie de calibraciones para verificar su linealidad y exactitud y estabilidad a medio plazo (ver capítulo 2). Se muestra algunas especificaciones del transductor en la tabla 3-3.

Tabla 3- 3: Datos del transductor de presión sumergible utilizado(Pressure Systems, 2005)

Datos	PRESSURE SYSTEMS WATER MONITORS
Número de Producto	551
Número de Serie del Sensor	601842
Rango de Medición de la presión	0 - 3
Precisión de la Presión medida	$\pm 0.10\%$ FS TEB
Precisión de la temperatura medida	$\pm 0.2$

*Medidores Ultrasónicos:* Se probaron 2 medidores ultrasónicos de frecuencias distintas de marca SonTek (USA). En la tabla 3-4 se muestran algunas especificaciones de los medidores probados.

Tabla 3- 4: Datos y especificaciones de los medidores ultrasónicos probados (SonTek, 2005)

<i>Nombre del Producto</i>	<i>Argonaut-SL 3 MHz</i>	<i>Argonaut-SL 1.5 MHz</i>
<i>Número de Serie</i>	<i>E2019</i>	<i>E2033</i>
<i>Frecuencia de operación</i>	3000 kHz	1500 kHz
<i>Tirante Mínimo</i>	0.10 m (0.3 ft)	0.25 m (0.80 ft)
<i>Tirante Máximo</i>	5.0 m (16.0 ft)	10.0 m (33.0 ft)
<i>Precisión</i>	±0.1%, ±0.3 cm	±0.1%, ±0.3 cm

Los modelos de los medidores señalados en la tabla 3-4 son capaces de proporcionar lecturas en forma continua. La operación y configuración de esos dispositivos se lleva a cabo mediante el software "ViewArgonaut" versión 3.33.

### **3.4.3. Descripción de pruebas realizadas**

*Pruebas estáticas:* En estas pruebas se midieron una serie de tirantes constantes con los tres dispositivos. En cada caso, se dejó pasar un intervalo de tiempo suficiente para que la superficie de agua en el tanque se estabilizara. Además, el nivel de referencia para las estimaciones correspondió al nivel superior del haz vertical del medidor ultrasónico. Por lo tanto, fue necesario medir las distancias *a* y *b* señaladas en la figura 3-3 las cuales se determinaron con una regla.

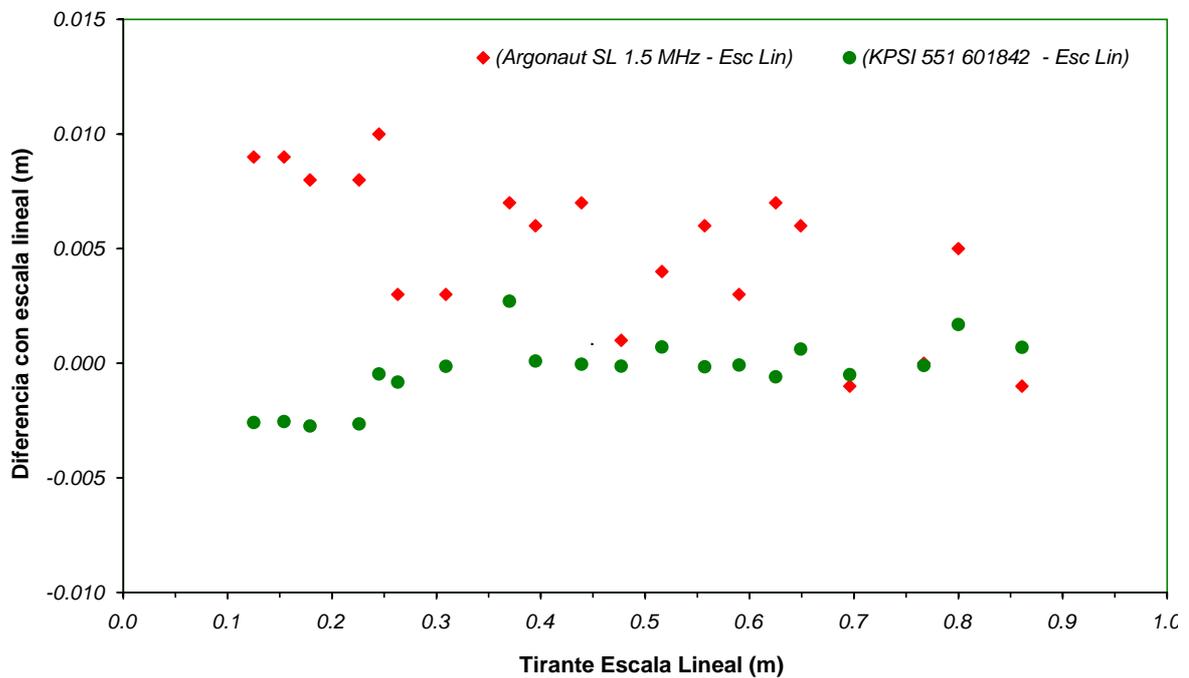
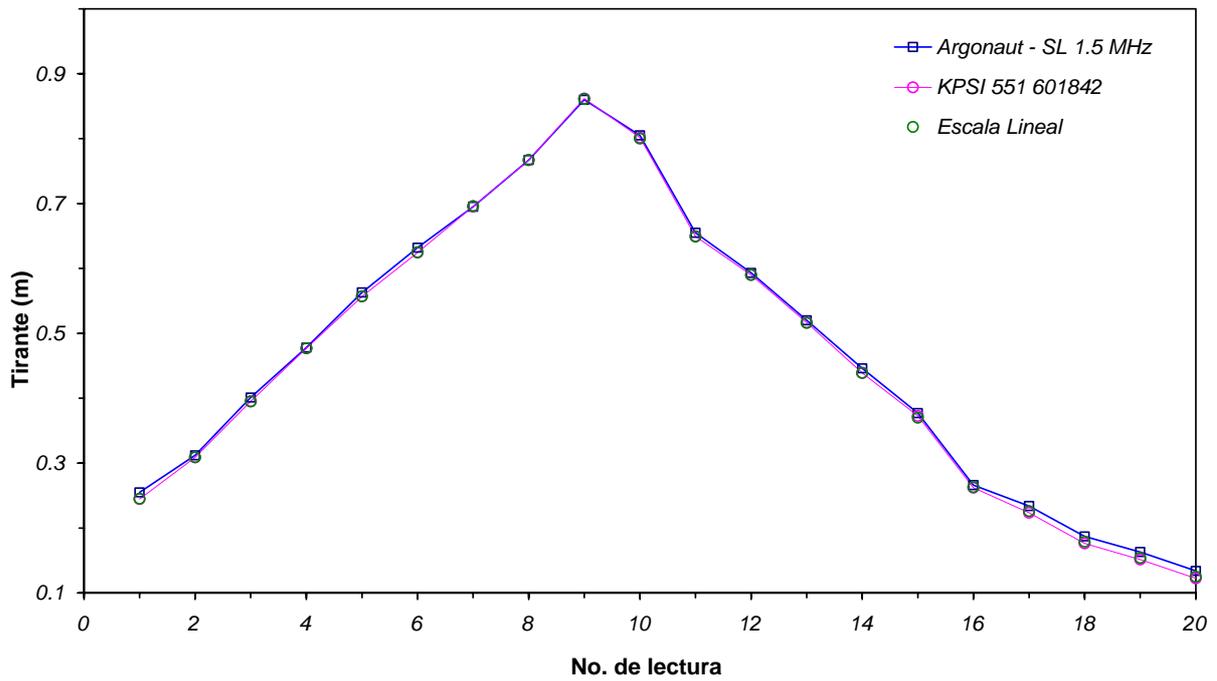
*Pruebas dinámicas:* En este caso se simulaban tirantes decrecientes en forma continua. Para variar el nivel de agua en el tanque se dejó la válvula parcialmente abierta de tal manera que se vació el tanque a lo largo de un día. Se programaron el medidor ultrasónico y transductor sumergible para tomar lecturas a intervalos relativamente pequeños (30 s, 60 s etc.); además, se tomaron lecturas de referencia con la escala lineal cada dos horas.

### **3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

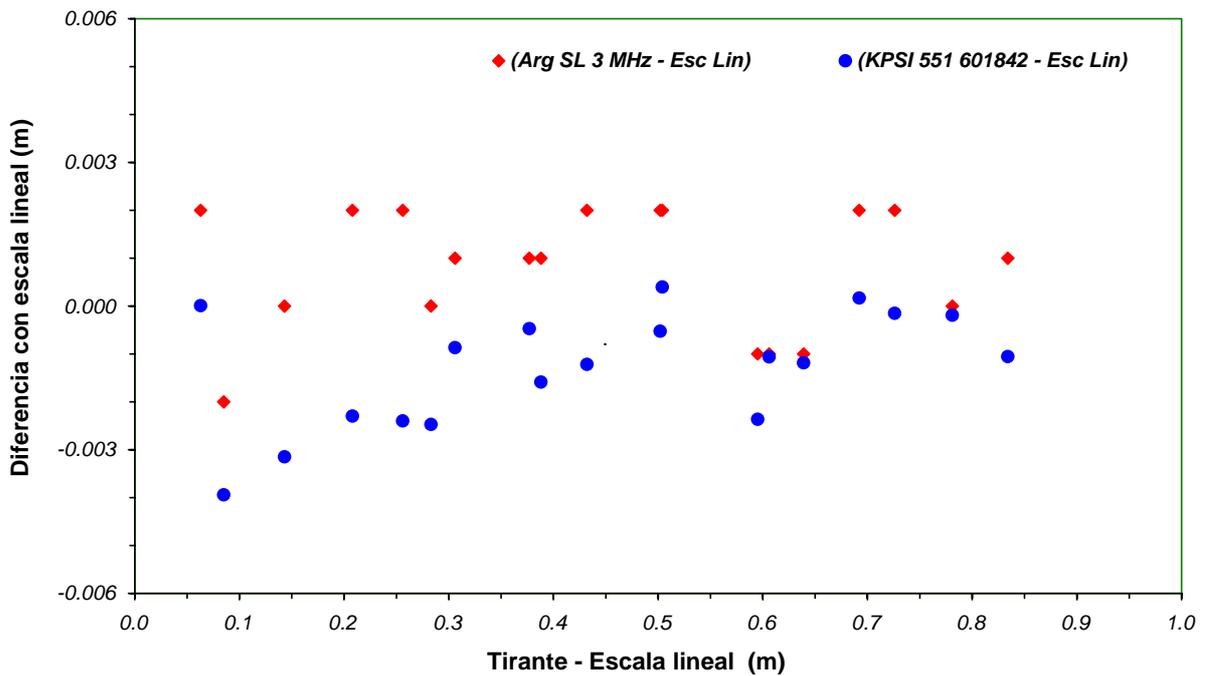
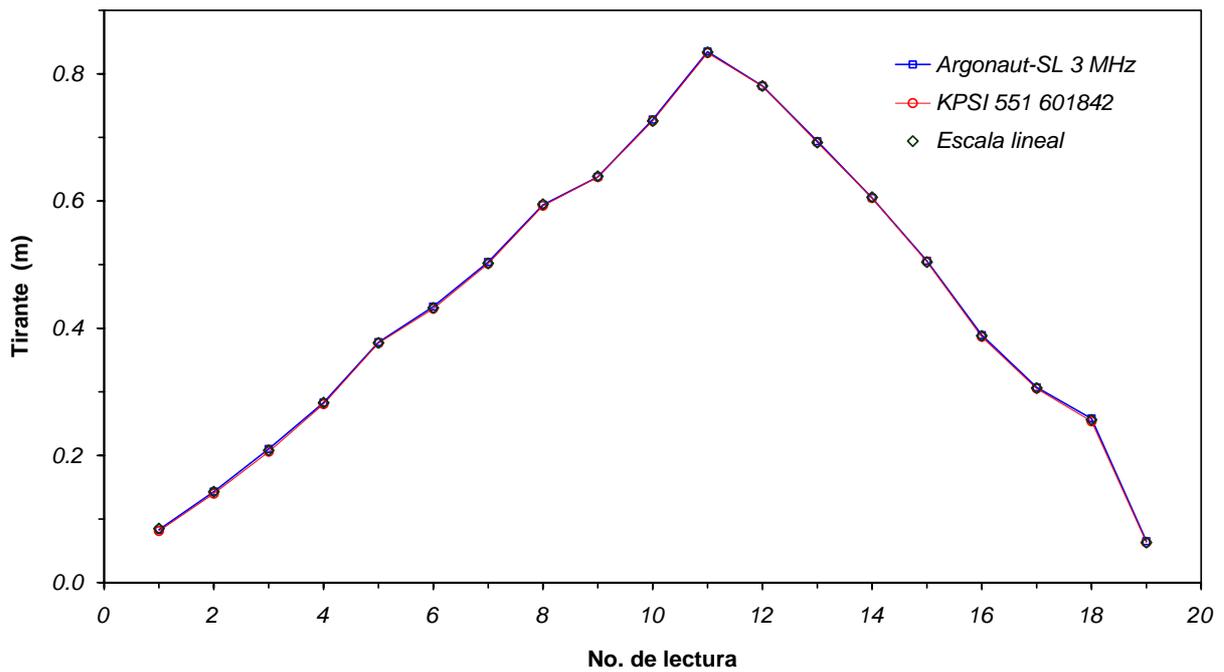
#### **3.5.1. Pruebas estáticas**

Se presentan algunos resultados de las pruebas estáticas en las gráficas 3-1 y 3-2. De un análisis comparativo se encontró que el medidor ultrasónico de 3 MHz dió resultados parecidos al transductor de presión KPSI. En general las lecturas obtenidas de este estuvieron dentro un rango de  $\approx \pm 3 \text{ mm}$  con respecto a la escala de referencia, el cual es consistente con las especificaciones del proveedor (ver la tabla 3-4). En el caso del medidor de 1.5 MHz se determinaron diferencias mayores a  $\pm 5 \text{ mm}$  con respecto a la escala y el caso extremo fue  $+ 12 \text{ mm}$ . Además, se observó que estas diferencias fueron inversamente proporcionales a la magnitud del tirante.

Según el fabricante, ambos medidores cuentan con una precisión de  $\pm 3 \text{ mm}$ , sin embargo, las pruebas estáticas indican que es probable que el medidor de 1.5 MHz tenga una precisión menor a este valor, particularmente cuando se trata de tirantes menores a 0.4 m. Con respecto a esta conclusión, se debe considerar que un medidor ultrasónico de 1.5 MHz cuenta un rango de medición que corresponde al doble del rango típico del medidor de 3 MHz. En ese sentido, un medidor de 1.5 MHz, a pesar de su menor resolución de medición, sería un equipo apto para medir el tirante en un canales con tirantes mayores a 5 m.



Gráfica 3- 1: Resultados de una prueba estática con el medidor ultrasónico 1.5 MHz



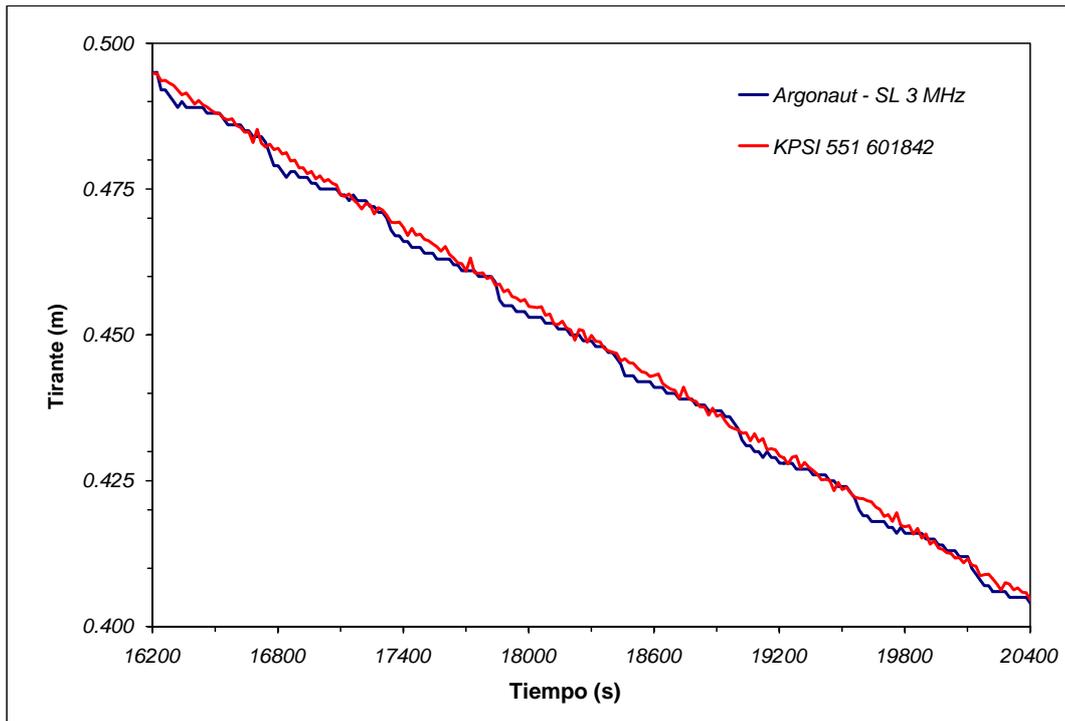
Gráfica 3- 2: Resultados de una prueba estática con el medidor ultrasónico de 3 MHz

### 3.5.2. Pruebas dinámicas

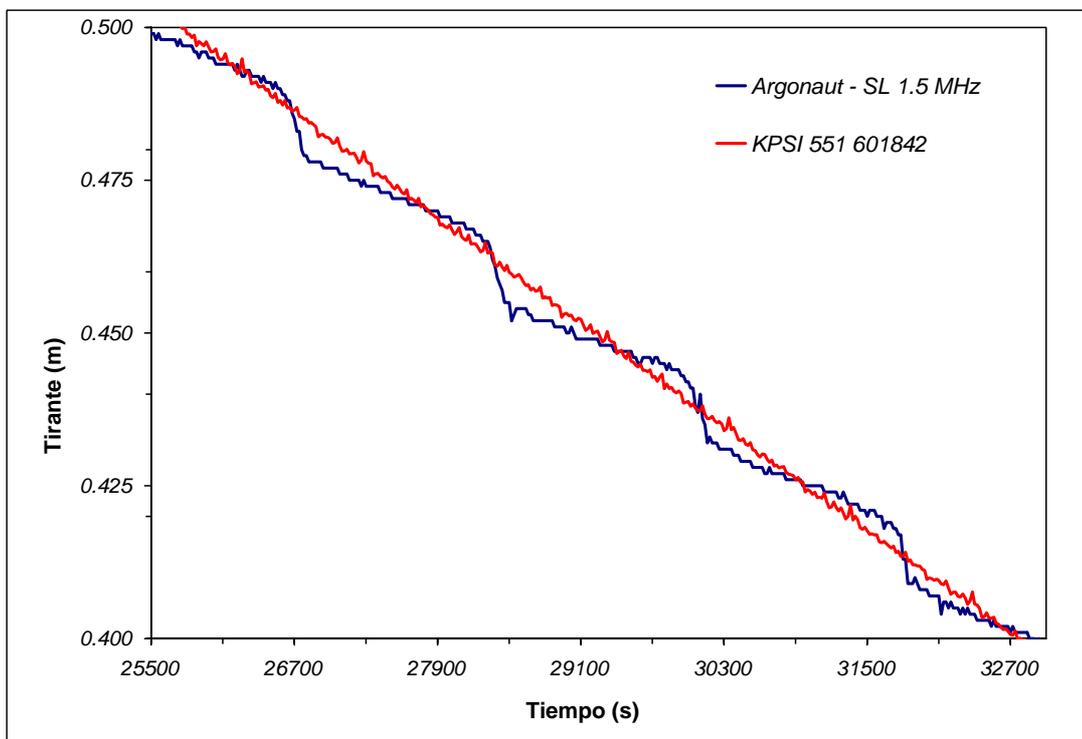
En las pruebas dinámicas se simularon tirantes decrecientes abriendo la válvula a una apertura fija. Bajo esta condición el gasto de salida es directamente proporcional al tirante en el tanque. Por lo tanto, si se representa la variación del nivel de agua con una curva de tirante contra tiempo, la pendiente de la curva debe disminuirse conforme al decaimiento del tirante. En las gráficas 3-3 y 3-4 se muestran resultados elegidos de pruebas dinámicas realizadas con los medidores ultrasónicos de 1.5 MHz y 3 MHz. Cabe mencionar que en esas gráficas no se indica el rango completo de tirantes utilizado en las pruebas respectivas.

En un sentido global, ambos medidores proporcionaron resultados congruentes con las variaciones de tirante simuladas en las pruebas. Sin embargo, a lo largo de las curvas de decaimiento se observó que los medidores mostraron un patrón cíclico caracterizado por variaciones pequeñas en la pendiente que se repitieron a intervalos aproximados de 10 minutos y 30 minutos para el medidor 3 MHz y 1.5 MHz respectivamente. Se puede ver este comportamiento en las figuras 3-3 y 3-4 en que se observa una pendiente gradual al inicio del ciclo, la cual, se transforma en una caída brusca al final de la misma. En las mismas figuras se aprecia que la pendiente de la curva de decaimiento del transductor de presión está más conforme a los resultados esperados en el experimento.

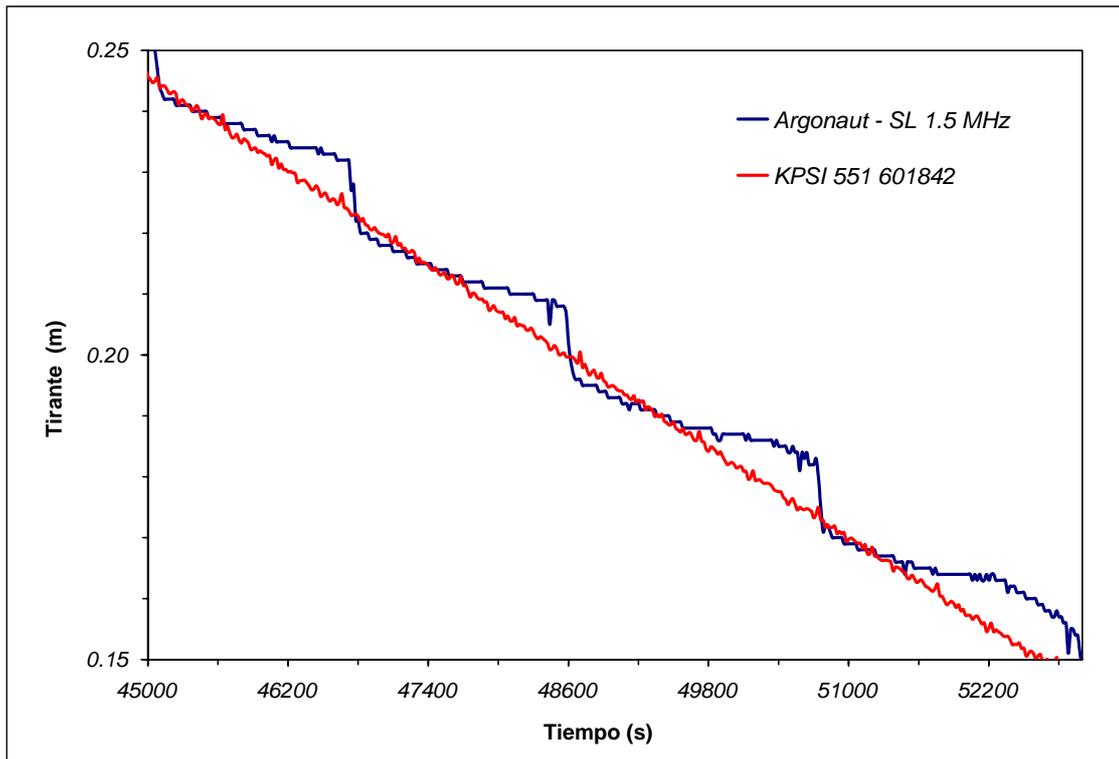
Con respecto a las magnitudes de los tirantes medidos durante las pruebas (a intervalos de 30 s), se obtuvieron resultados consistentes con las pruebas estáticas. En este caso, las lecturas de ambos medidores se compararon de manera satisfactoria con las estimaciones del transductor sumergible; las diferencias estuvieron siempre dentro de un rango de  $\pm 3 \text{ mm}$ . Sin embargo, para tirantes menores a 0.4 m se observó que las diferencias fueron mayores en el caso del medidor 1.5 MHz. Se puede apreciar este comportamiento, en la gráfica 3-5, la cual muestra resultados de la misma prueba mostrada en la gráfica 3-3, pero, para tirantes menores que 0.4 m. Como se puede observar, en el caso las curvas resultan ser más alejadas, tal que la diferencia entre lecturas en puntos selectos resulta ser mayor a 7 mm.



Gráfica 3- 3: Curvas de tirante decreciente obtenidas de las lecturas del medidor ultrasónico 3 MHz y el transductor de presión sumergible KPSI



Gráfica 3- 4: Curvas de tirante decreciente obtenidas de las lecturas del medidor ultrasónico 1.5 MHz y el transductor de presión sumergible KPSI



Gráfica 3- 5: Curvas de tirante decreciente obtenidos de las lecturas del medidor ultrasónico SonTek 1.5 MHz y el transductor de presión sumergible KPSI

### 3.6. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se consideró el empleo de medidores ultrasónicos para estimar el tirante en canales. Mediante pruebas de laboratorio se comparó esta técnica con una escala lineal y un transductor de presión sumergible. Los resultados indican que el medidor 3 MHz estimó el tirante de manera comparable con el transductor de presión y presentó discrepancias del orden de  $\approx \pm 3 \text{ mm}$  con respecto a la escala lineal, el cual está conforme con las especificaciones del proveedor. En el mismo sentido, se determinó que el medidor 1.5 MHz presentó una discrepancia más amplia ( $> \pm 5 \text{ mm}$ ) que el valor esperado con base en las especificaciones.

A diferencia de los transductores de presión sumergibles discutidos en el capítulo 2, los medidores ultrasónicos son equipos de calibración permanente, es decir, no se necesita hacer una calibración rutinario al equipo. En ese sentido, se pueden considerar como una buena alternativa a los transductores sumergibles para monitorear el tirante en forma continua. Sin embargo, se deben plantear trabajos adicionales para investigar el uso de esta técnica. Una consideración sería probar medidores de diferentes frecuencias en un rango más amplio de tirantes. Además, considerando que el principio de operación se basa en la reflexión de ondas ultrasónicas, la cual puede ser provocada por partículas sólidas en el agua, se puede verificar el funcionamiento de esta técnica en flujos con una alta composición de sedimentos en suspensión.

## Capítulo

---

# 4

### **AFORO CON MOLINETES, DETERMINACIÓN DE LA CORRECCIÓN A LA LÍNEA MOJADA**

#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

Cuando se mide la velocidad de flujo con un molinete, es necesario conocer la profundidad del instrumento para poder estimar la velocidad media y posteriormente, el caudal, aplicando el método área-velocidad. Este método tiene su fundamento en la distribución de velocidad en una vertical y el principio de la continuidad de flujo. Por lo tanto, los errores en la medición de la profundidad de molinete influyen en la precisión que se logra en la determinación del caudal.

La tarea de medir la profundidad del molinete se lleva a cabo suspendiendo el instrumento de una varilla rígida o un cable graduado (ISO, 1983). El uso de una varilla rígida, por su resistencia estructural, tiene el mérito de no presentar desviaciones en la alineación, que pueden ser inducidas por la componente horizontal de la fuerza de arrastre de la corriente. Se emplea este tipo de equipo de suspensión en canales con tirantes menores de 3 m y con velocidades hasta 2 m/s (ISO, 1983), ya que para valores mayores, es difícil manejar por un operario. Cuando se presentan profundidades y velocidades que impiden el uso de una varilla graduada, se emplea un cable graduado (cable de suspensión manual) con un contrapeso

conocido como “escandallo”. El escandallo está colocado al final del cable y sirve para mantener en su posición el molinete y evitar en lo posible que sea desviado de la vertical por la corriente (Kennedy *et al*, 2000).

Las variables principales a considerar en la selección de un peso adecuado del escandallo son el tirante y la velocidad media del flujo. La norma ISO 3454-1983 recomienda la siguiente relación para estimar el peso del escandallo:

$$m = 5\bar{v}D \quad (4.1)$$

donde,  $\bar{v}$ , es la velocidad media del flujo en m/s y  $D$  es el tirante en el canal en  $m$ . Además, esta norma estipula que el peso del escandallo no debe exceder 15 kg cuando se trata de un cable de suspensión manual. Otra consideración sería utilizar un escandallo de tal forma y tamaño que minimiza alteraciones al patrón de flujo (ISO, 1983).

A pesar del empleo de pesos que están conformes con la ecuación 4.1, en la práctica, no se puede evitar totalmente la desviación del cable de la vertical hacia aguas abajo. Se ilustra el problema en la figura 4-1. Esta condición se presenta más frecuentemente en canales relativamente profundos ( $H > 3$  m) con velocidades de flujo mayores que 2 m/s (ISO, 1983), y dificulta el empleo de cualquier método en la determinación del caudal. La selección de un método adecuado para la corrección de la profundidad, es entonces, una tarea de importancia que influye en la estimación del caudal.

Existen recomendaciones para determinar la corrección que se debe aplicar a la profundidad medida del instrumento, los cuales se han publicado en la norma ISO 748-1997 y el documento ISO/TR 9209-1989. Sin embargo, en la práctica en México la tendencia ha sido tratar de mitigar el efecto del arrastre en el campo, o ignorarlo, en vez de corregir los datos de aforo.

Con base en lo expuesto, *el objetivo de este capítulo es evaluar las recomendaciones de la norma ISO 748-1997 y el reporte técnico ISO/TR 9209-1989 para corregir la profundidad del molinete*. En el capítulo 5 se considera la importancia de esta corrección en la estimación de la velocidad media y el caudal.

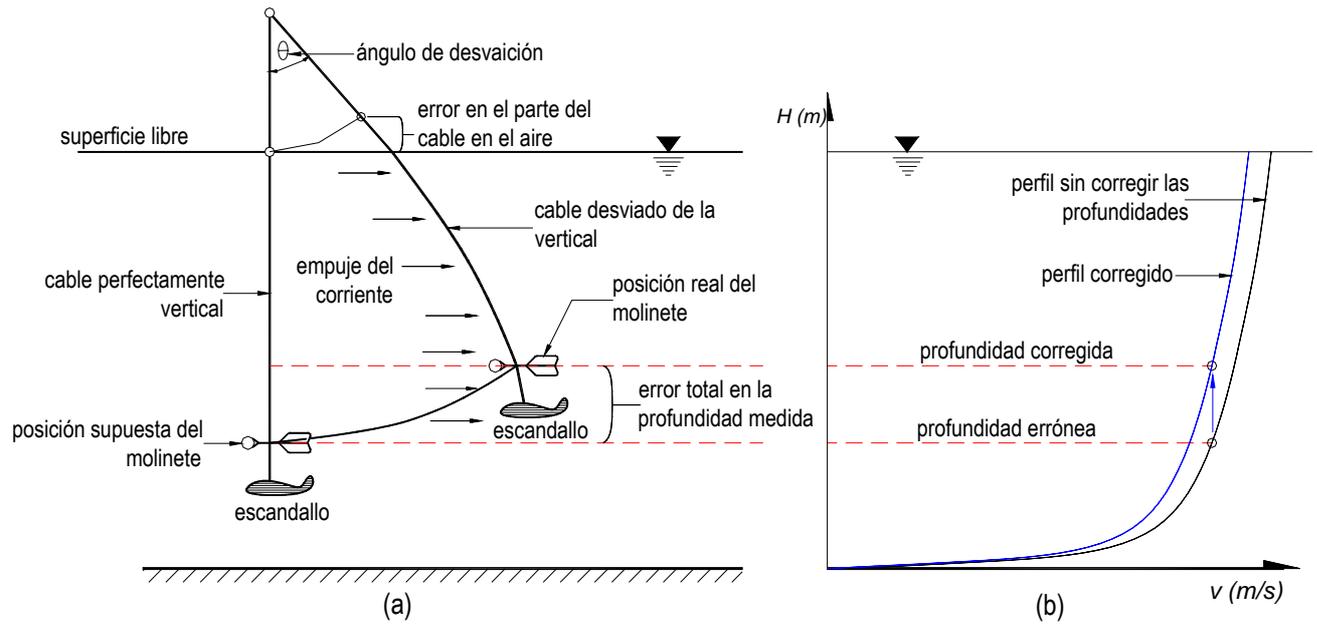


Figura 4- 1: Arrastre del cable cuando se afora en un canal profundo con alta velocidad  
 (a) Error en la profundidad del molinete (b) Efecto sobre el perfil de velocidad determinado

## **4.2. REVISIÓN DE RECOMENDACIONES**

Hasta la fecha, sólo se han publicado dos métodos para corregir la profundidad del molinete los cuales se encuentran en la norma ISO 748 y el documento ISO/TR 9209. En el sentido estricto, esos métodos fueron desarrollados para determinar la corrección a aplicar cuando se mide el tirante mediante un sondeo. Sin embargo, su aplicación ha sido extendida a la corrección de la profundidad del molinete. En dichos métodos, se distinguen entre dos componentes de la corrección, uno que se aplica a la parte del cable en el aire, y otro que corresponde a la parte sumergida (denominadas “airline correction” y “wetline correction” en inglés).

La corrección en el aire se determina de manera similar en los dos métodos. Además, para derivar la corrección en la parte sumergida del cable se hacen algunas suposiciones que se deben tomar en cuenta al utilizar las soluciones propuestas. Primero, se asume que el escandallo llega hasta el fondo del canal a pesar de la fuerza de la corriente. Este implica que el sondeo se realiza cuando el escandallo está en la plantilla, pero completamente sostenido por el cable. Adicionalmente, en ambos métodos se define la forma de la línea sumergida en términos de las fuerzas horizontales y verticales actuantes en el cable de suspensión. En ese sentido, se considera que la distribución de fuerzas horizontales a lo largo del cable este conforme a la distribución de la velocidad en la vertical. Con respecto a la primera suposición, se debe considerar que en la práctica, cuando se mide la velocidad con un molinete, es común que el escandallo queda suspendido en un punto por encima de la plantilla del canal. Por lo tanto, la condición de la localización del escandallo en el fondo no se cumple en todos los casos.

En los métodos se determina la corrección del cable sumergido considerando las suposiciones mencionadas, pero, aplicando principios distintos. A continuación se describen las bases teóricas y procedimientos para la determinación de la corrección aplicable a las partes del cable en el aire y el agua.

#### 4.2.1. Determinación de la corrección aplicable a la parte del cable en el aire

Se determina la corrección en el aire a partir de una relación trigonométrica básica. En la figura 4-2, que se muestra a continuación, esta corrección esta representada por el símbolo  $e$ .

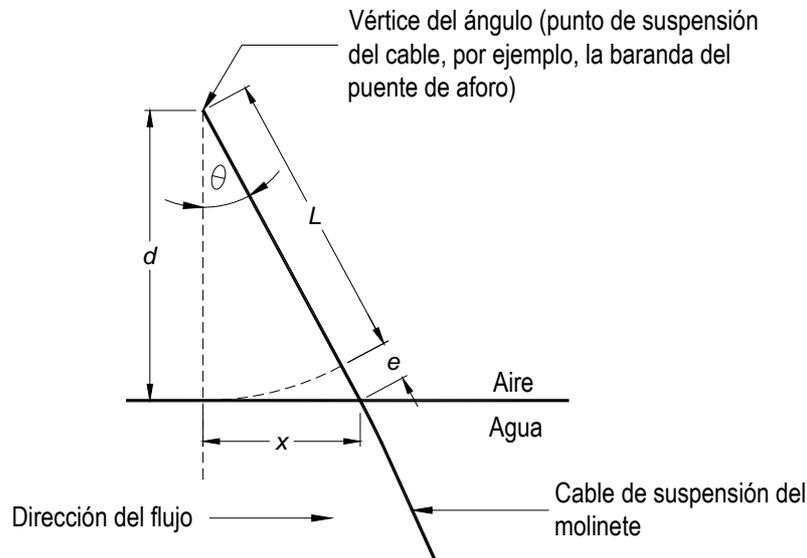


Figura 4- 2: Corrección aplicable a la parte del cable en el aire

La magnitud de  $e$  depende del ángulo con la vertical  $\theta$  y la distancia  $d$  y se deriva de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 d &= L \cos \theta \\
 \cos \theta &= \frac{d}{L + e} = \frac{d}{d + e} \\
 d + e &= \frac{d}{\cos \theta} \\
 e &= \frac{d}{\cos \theta} - d = d \left[ \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right] \text{ pero, } \sec \theta = 1 / \cos \theta
 \end{aligned}$$

entonces, 
$$e = d (\sec \theta - 1) \quad (4.2)$$

En la práctica se miden las distancias  $d$  y  $x$  con la finalidad de determinar el ángulo  $\theta$  mediante la relación siguiente:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{x}{d} \right). \quad (4.3)$$

#### 4.2.2. Corrección a la parte mojada del cable, Método de la ISO 748:1997

El método de la ISO 748-1997 tiene su fundamento en un principio elemental de la física: “Si se aplica una fuerza horizontal de magnitud conocida a un peso suspendido de una cuerda, la cuerda toma una posición de reposo con un ángulo respecto a la vertical. La tangente del ángulo es igual a la fuerza horizontal dividida entre la magnitud del peso. Si se aplican varias fuerzas horizontales y verticales a la cuerda, la tangente del ángulo en la cuerda encima de cualquier punto es igual a la suma de fuerzas horizontales bajo de este punto, dividida por la suma de fuerzas verticales por debajo del punto de análisis” (Rantz, 1989).

Aplicando este concepto al cable que se utiliza para sostener el molinete en una sección transversal de flujo, la distribución de la fuerza horizontal en el cable es conforme con el perfil de velocidad en la vertical y se determina el error total en la estimación de la profundidad medida mediante la suma de los productos de cada décimo de la profundidad y la función  $(1/\cos\theta) - 1$  de los ángulos correspondientes. Esta función está establecida para cada décimo de la profundidad mediante la relación tangente de las fuerzas actuantes abajo de cualquier punto.

En el desarrollo del método de la ISO 748 se considera que la fuerza de arrastre en el escandallo es despreciable. La solución general de este método ha sido publicada en una tabla, que se puede encontrar en el Anexo B (tabla B-2). Esta solución fue desarrollada con base en los conceptos explicados y estudios empíricos hechos en ríos en EEUU, y según la literatura, se mantiene para cualquier escandallo o cable diseñado para minimizar la resistencia de la corriente. Para utilizar la tabla B-2, se necesita conocer el ángulo entre el cable y la vertical  $\theta$  y la longitud de la parte sumergida del cable  $L_m$ , la cual se puede determinar aplicando el procedimiento expuesto en el Anexo B. Con el valor de  $\theta$ , se obtiene de la tabla B-2 el valor de la corrección expresado como un porcentaje que se debe restar de  $L_m$ . Entonces, se obtiene la profundidad corregida del molinete con la relación siguiente:

$$y_c = y_m - e - (L_m \omega) \quad (4.4)$$

donde,  $y_c$  es la profundidad corregida del molinete,  $y_m$ , es la profundidad medida del molinete,  $e$ , es la corrección aplicable a la parte del cable en el aire,  $L_m$ , la longitud de la parte sumergida del cable y  $\omega$  el valor de la corrección obtenido de la tabla B-2.

### 4.2.3. Corrección a la línea mojada: Método del ISO/TR 9209-1989

Este método fue desarrollado por la Secretaría de Recursos Hídricos y Electricidad de la República Popular de China y se encuentra publicado en el reporte técnico ISO/TR 9209-1989. En contraste con el método de la ISO 748, no se desprecia la fuerza horizontal en el escandallo en reposo en la plantilla del canal. Esto se debe a que en el caso de corrientes rápidas en canales poco profundos se pueden presentar presiones considerables en esta zona del flujo. Además, se toma en cuenta diferentes pesos de escandallo y diámetros de cables de suspensión.

#### Base teórica del método ISO/TR 9209-1989

En la derivación de la corrección a la línea mojada, se hace referencia a la figura 4-3. Para cualquier punto de la línea de sondeo  $E(x,y)$  considerado como un cuerpo libre, se puede derivar las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_x + Q_x}{G_o} = \frac{dx}{dy} \quad (4.5)$$

donde,  $P_x$  es la fuerza de arrastre de la línea de sondeo en  $kg$ ,  $Q_x$ , la fuerza de arrastre del escandallo en  $kg$  y,  $G_o$ , es el peso del escandallo en  $kg$ .

La velocidad de flujo en el punto  $E(x,y)$  esta definida por la siguiente relación:

$$v_y = v_o \sqrt{1 - P\eta^2} \quad (4.6)$$

donde,  $v_y$  es la velocidad al punto  $E$ ,  $v_o$ , la velocidad en la superficie del agua,  $P$  el parámetro de distribución de velocidad y,  $\eta$  es la profundidad relativa.

$$\eta = \frac{y}{H} \quad (4.7)$$

donde,  $H$  es tirante del agua.

Se expresa la fuerza horizontal de arrastre del cable  $P_x$  en un punto en términos de la gradiente de velocidades desde el punto de análisis hasta el fondo del canal.

$$P_x = K_1' \frac{\rho/g}{2} d \int_y^H v_y^2 dy = K_1 \int_y^H v_y^2 dy \quad (4.8)$$

donde,

$K_1'$ , es el coeficiente de resistencia de la línea de sondeo,

$K_1 = K_1' \frac{\rho/g}{2} d$ , es el coeficiente impulsivo de la línea de sondeo,

$\rho/g = 102 \text{ kg s}^2 \text{ m}^{-4}$ , y

$D$  es el diámetro de la línea de sondeo (m).

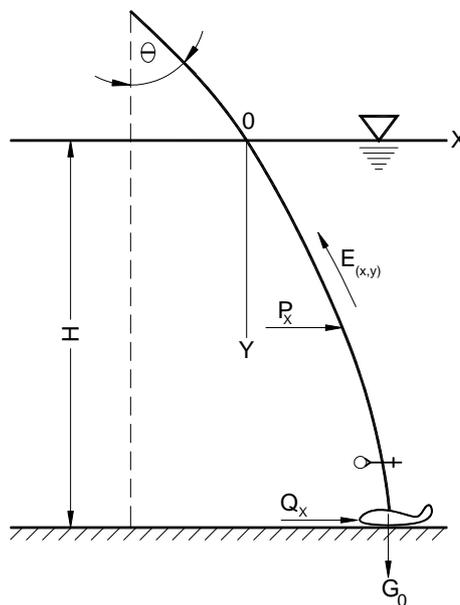


Figura 4- 3: Fuerzas actuando en una línea de sondeo

Si se sustituye la ecuación 4.6 en la ecuación 4.8 se llega a la siguiente relación para  $P_x$ :

$$P_x = K_1 v_o^2 H \left[ (1-\eta) - \frac{P}{3} (1-\eta^3) \right] \quad (4.9)$$

La fuerza de resistencia en el escandallo esta dada por la siguiente ecuación:

$$Q_x = K_2 \frac{\rho/g}{2} \Omega v_H^2 = K_2 v_o^2 (1-P) \quad (4.10)$$

donde,  $K_2'$  es el coeficiente de resistencia del peso de sondeo,  $K_2$ , el coeficiente impulsivo del peso de sondeo,  $\Omega$ , es el área frontal del escandallo en  $m^2$  y,  $v_H$  es la velocidad de flujo en el fondo del canal en  $m/s$ .

$$\beta = \frac{K_2}{K_1} \quad (4.11)$$

donde,  $\beta$  es el parámetro impulsivo.

Si se sustituye las ecuaciones 4.9, 4.10 y 4.11 en la ecuación 4.5, se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{K_1 v_o^2 H}{G_o} (1-\eta) - \frac{P}{3} (1-\eta^3) + \frac{\beta}{H} (1-P) \quad (4.12)$$

Cuando  $\eta = 0$ ,  $\frac{dx}{dy} = \tan \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo oblicuo. Aplicando esta consideración en la ecuación 4.11, se tiene:

$$\frac{K_1 v_o^2 H}{G_o} = \frac{\tan \theta}{\left(1 - \frac{P}{3}\right) + \frac{\beta}{H} (1-P)} \quad (4.13)$$

De la combinación de la ecuación 4.12 y 4.13, se obtiene la siguiente relación para la gradiente de la línea de sondeo:

$$\frac{dx}{dy} = 1 - \frac{\eta \left(1 - \frac{P}{3} \eta^2\right)}{\left(1 - \frac{P}{3}\right) + \frac{\beta}{H} (1-P)} \tan \theta \quad (4.14)$$

Por otra parte, se expresa la longitud de la línea mojada mediante la siguiente integral:

$$L_m = H \int_0^1 \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2} d\eta \quad (4.15)$$

Donde,  $L_m$  es la longitud de la línea mojada

La corrección  $\Delta W'$  en el sondeo es la diferencia entre la longitud de la línea mojada y el tirante  $H$  del agua ( $\Delta W' = L_m - H$ ), la cual se expresa como el porcentaje de la longitud de la parte mojada del cable y es equivalente a la siguiente relación:

$$K_H = \frac{\Delta W}{L_m} = 1 - \frac{1}{\int_0^1 \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2} d\eta} \quad (4.16)$$

Entonces,

$$\Delta W = K_H L_m \quad (4.17)$$

Debido a la naturaleza del problema del arrastre, no es posible determinar la magnitud de  $H$ . Por lo tanto, se determina  $\Delta W$  empleando una solución empírica, la cual tiene su base en mediciones realizadas en ríos en la República Popular de China. Lo anterior se puede consultar en tablas que relacionan  $\Delta W$  con longitud mojada del cable  $L_m$ , el ángulo con la vertical  $\theta$ , y características del flujo, cable y escandallo. Se presentan las soluciones empíricas de este método en las tablas B-3, B-4 y B-5 del Apéndice B.

### **Selección de Parámetros**

Previo a la utilización de la solución empírica presentada en las tablas del Apéndice B, se recomienda establecer valores adecuados de los siguientes parámetros:

#### **El parámetro de impulso $\beta$**

El parámetro de impulso depende de la selección de los coeficientes impulsivos de la línea de sondeo y el escandallo respectivamente, los cuales se obtienen de las relaciones siguientes:

$$K_1 = K_1' \frac{\rho l g}{2} d \quad (4.18)$$

$$K_2 = K_2' \frac{\rho l g}{2} \Omega \quad (4.19)$$

Si se supone en la ecuación 4.18 que el coeficiente de resistencia  $K_1'$  de la línea de sondeo es constante,  $K_1$  será proporcional a  $d$ .

De una serie de experimentos realizados con líneas de diferentes diámetros a velocidades de flujo entre 1.03 m/s y 3.04 m/s, se ha determinado que (ISO, 1989):

$$K_{1mean}' = 1.5 \quad (4.20)$$

Por lo tanto, se determina el valor empírico correspondiente de  $K_1$  utilizando la siguiente relación:

$$K_1 = 0.0765 d \quad (4.21)$$

De experimentos similares hechos con escandallos de pesos entre 35 kg a 375 kg y velocidades entre 0.75 m/s a 4.25 m/s se determinó la siguiente relación para  $K_2$ :

$$K_2 = 0.031 G_o^{2/3} \quad (4.22)$$

donde,  $G_o$ , es el peso del escandallo en agua.

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación 4.8 se llega a las siguientes relaciones para la determinación del parámetro de impulso:

$$\beta = 0.3 \frac{G^{2/3}}{d} \quad (4.23)$$

$$\beta = 0.5 \frac{G^{2/3}}{d} \text{ (si el escandallo es de fierro)} \quad (4.24)$$

### **Parámetro de distribución de velocidad $P$**

El parámetro de distribución de velocidad, varía con el coeficiente de Chezy,  $C$  del material del canal. Se ha determinado que para un rango de  $C$  entre 40 y 60 el valor medio de  $P$  es 0.6 (ISO, 1989).

### **Aplicación del método de la ISO 9209-1989**

1. Primero, se determina el ángulo entre el cable y la vertical  $\theta$ , y la longitud de la parte sumergida del cable  $L_m$ .

2. Se calcula el valor de  $\beta$  empleando las ecuaciones 4.22 o 4.23, conforme al peso del escandallo en el aire,  $G$ , en  $kg$ , y el diámetro  $d$  de la línea de sondeo que se utilizará en  $mm$ .
3. Con el valor de  $\beta$  determinado en el paso 2 se selecciona la tabla aplicable.
4. Con los valores de  $\theta$  y  $L_m$ , se obtiene la corrección  $\Delta W$ , correspondiente.

El valor de  $\Delta W$  es equivalente a la corrección que se debe restar de  $L_m$ . Entonces, para determinar la profundidad del molinete se utiliza la siguiente relación:

$$y_c = y_m - e - \Delta W \quad (4.25)$$

donde,  $y_c$  es la profundidad corregida del molinete,  $y_m$ , es la profundidad medida del molinete,  $e$ , es la corrección aplicable a la parte del cable en el aire, y  $\Delta W$  es el valor de la corrección obtenido de la (tablas B-2, B-4 o B-5).

### **4.3. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES**

Con la finalidad de verificar la importancia de corregir la profundidad del molinete, se realizó un análisis comparativo entre las siguientes soluciones:

1. Método de la ISO 748-1997
2. Método de la ISO/TR 9209-1989
3. Suposición de un cable tenso de gradiente constante
4. Despreciar la corrección a la línea mojada; considerando solo la corrección a la parte del cable en el aire.

Para eso, se optó por utilizar un conjunto de datos experimentales obtenidos de pruebas de campo realizadas por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en noviembre de 2007. El sitio se encuentra en el canal principal de la presa Josefa Ortiz de Domínguez en el estado de Sinaloa (*Foto 4-1*). En el experimento se efectuó una serie de aforos intensivos con caudales diferentes empleando diversas técnicas y métodos. En el análisis, se aplicaron los métodos a los datos de aforo para determinar el error total en la profundidad del molinete, el cual implicaba estimar la corrección aplicable a la parte del cable en el aire y agua. Para facilitar la comparación entre los métodos, se eligió el método de la ISO 748 como un método de referencia, ya que este es el único método publicado para aplicarse a aforos de canales. Con los datos corregidos se trazaron curvas de velocidad contra profundidad, las cuales se compararon con las curvas obtenidas de los datos originales.

#### **4.3.1. Descripción de datos experimentales utilizados**

Se realizó el análisis para 3 caudales diferentes, los cuales se indican en la tabla 4-1 junto con los tirantes correspondientes que se presentaron en el canal. Para las mediciones hechas con molinetes, se utilizaron cables de suspensión manual con escandallos que fueron arrastrados por la fuerza de la corriente (*Foto 4-2*). Se dividió el canal en dovelas de 0.33 m de ancho en las cuales se midió la velocidad en 8 puntos en la vertical<sup>1</sup>. Por ejemplo, en la figura 4-4 se muestra las dovelas y distribución hipotética de los puntos de medición para la prueba No.3. Los aforadores trabajaron desde el puente de aforo y midieron las distancias denominadas  $x$  y  $d$  (figura 4-7) para cada punto de medición, esto facilitaba el cálculo del ángulo de

<sup>1</sup> Se midió la velocidad en 8 puntos en la vertical en la parte central del canal. En las zonas de los taludes no se pudo lograr este número de puntos en todos los casos debido a la reducción de la profundidad de la dovela.

desviación, el cual se utilizó en aplicar los métodos empíricos para corregir las profundidades del instrumento.



Foto 4- 1: Vista del canal principal de la presa Josefa Ortiz con el puente de aforo

Tabla 4- 1: Caudales y tirantes correspondientes a las pruebas analizadas

<i>Prueba No.</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</i>	9.3	16.8	32.8
<i>Tirante (m)</i>	1.09	1.54	2.2



Foto 4- 2: Aforadores midiendo la velocidad con molinetes durante una prueba

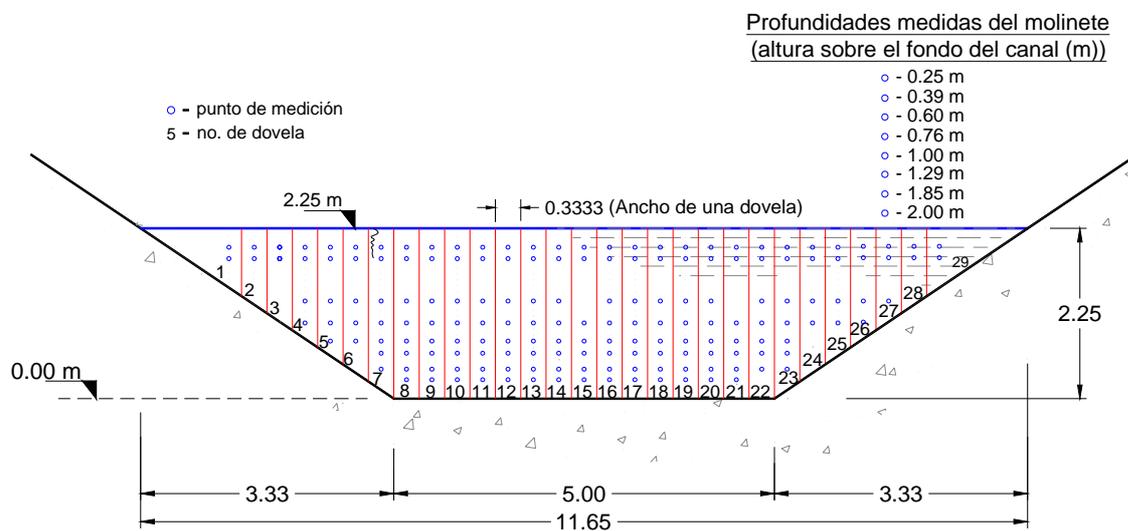


Figura 4- 4: Dovelas y distribución hipotética de los puntos de medición

**4.3.2. Características geométricas e hidráulicas del sitio de medición**

Tabla 4- 2: Datos del sitio de medición en el canal de la Presa Josefa Ortiz de Domínguez, Sinaloa

Característica	Magnitud / Descripción
Material de la sección :	Concreto
Forma geométrica:	Trapezoidal
Ancho de la base (m):	5
Ancho a altura de corona (m):	16
Talud (m:m):	1.513:1
Profundidad (m):	4
Se tiene un puente de aforo:	sí
Pendiente (m:m)	≈0.0003
Tirante mínimo de operación (m)	0.5
Tirante máximo de operación (m)	3.8
Gasto mínimo de operación (m³/s)	0.5
Gasto máximo de operación (m³/s)	100

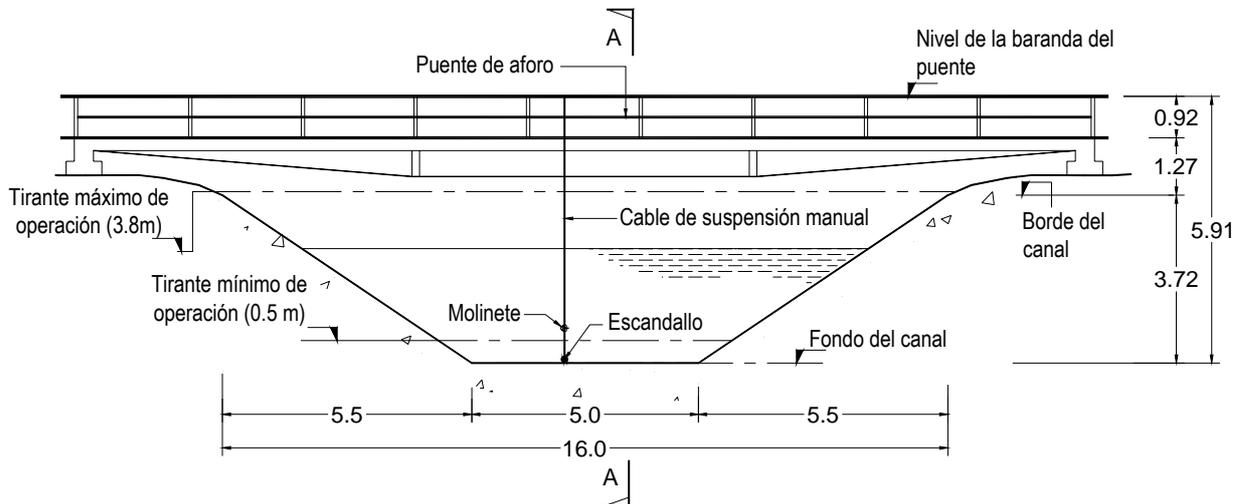


Figura 4- 5: Sección transversal del sitio de medición

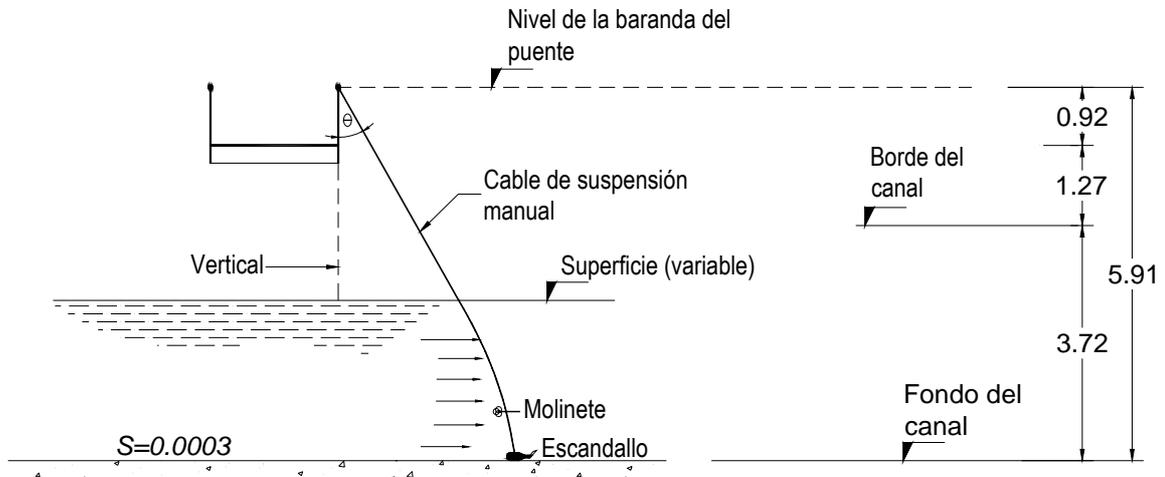


Figura 4- 6: Sección longitudinal del sitio de medición

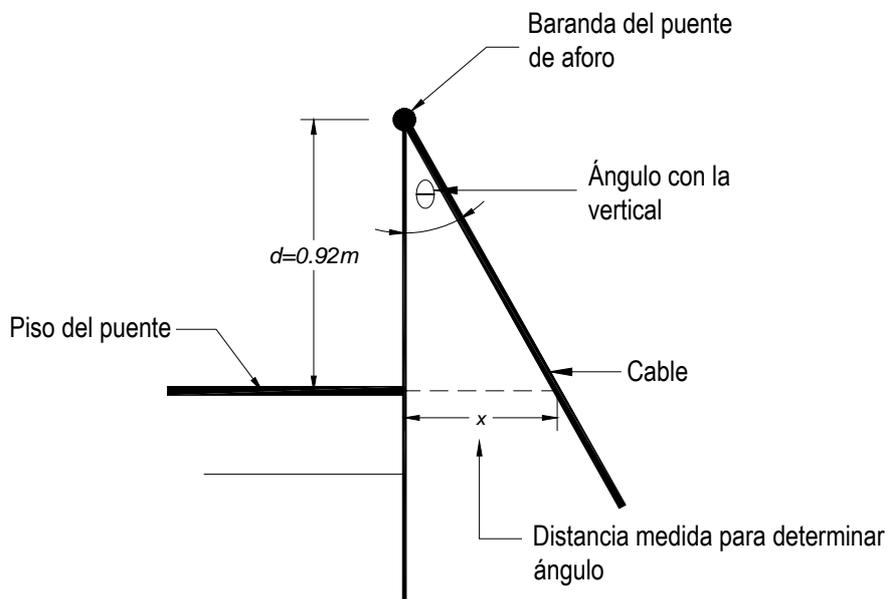


Figura 4- 7: Medición para determinar el ángulo entre el cable y la vertical

### 4.3.3. Instrumentación

- Molinetes

Los molinetes utilizados son del tipo "Price AA" de la marca Gurley Precision Instruments y fueron calibrados en fábrica.

- Sistema de Suspensión

El sistema de suspensión incluyó un cable graduado de diámetro  $9\text{ mm}$  con una precisión de  $\pm 1\text{ cm}$ .

- Escandallo

Se utilizaron escandallos de peso  $7\text{ kg}$  en todos los casos.

- Escala Lineal

Las mediciones de las distancias horizontales y verticales  $x$  y  $d$ , figura 4-7, permitieron determinar el ángulo de desviación y fueron realizadas con una escala lineal de precisión  $\pm 1\text{ cm}$ .

#### 4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Anexo C se presentan resultados elegidos para el análisis y en la tabla 4-3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos aplicando el método de la ISO 748.

**Velocidades, ángulos y correcciones determinados:** Como se puede observar en las tres pruebas, el peso del escandallo utilizado es menor que lo recomendado con base en la ecuación 4.1. En general, el rango de velocidades de flujo fue similar en las tres pruebas. Sin embargo, se presentaron ángulos mayores en las pruebas 2 y 3. La corrección total en la profundidad alcanzó valores máximos de 18 cm, 32 cm y 73 cm en las pruebas 1, 2 y 3 respectivamente. Se observa que la mayor parte de la corrección proviene de la parte del cable en el aire. De hecho, en las pruebas 2 y 3 la corrección de la línea mojada resulta ser menor a 2 cm mientras que la corrección en el aire alcanzó valores mayores que 30 cm. Este se debe a que la distancia  $d$  era mayor que  $L_H$  en todas las pruebas realizadas.

Tabla 4-3: Resumen de resultados obtenidos con el método de la ISO 748-1997

<b>Prueba No.:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Tirante (m) :</b>	1.09	1.54	2.25
<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s):</b>	9.3	16.8	32.8
<b>Rango de velocidades (m/s):</b>	1.1 - 1.7	1.4 - 2.1	1.3 - 2.2
<b>Peso de escandallo utilizado (kg):</b>	7	7	7
<b>Peso de escandallo mínimo recomendado (ecuación 4.1, <math>m=5vD</math>) (kg) :</b>	8	14	22
<b>Rango de ángulos con la vertical :</b>	3° - 15°	9° - 21°	6° - 34°
<b>Corrección en el aire (cm):</b>	1 - 18	6 - 30	2 - 67
<b>Corrección a la línea mojada Método de la ISO 748) (cm):</b>	0 - 0.2	0.1 - 2	0.3 - 6
<b>Corrección total ( Método de ISO 748) (cm):</b>	1 - 18	6 - 32	2 - 73

**Comparación entre los métodos empíricos:** En general se observó que los métodos empíricos proporcionaron resultados similares para las 3 pruebas. Típicamente, la diferencia entre las correcciones obtenidas con esos métodos fueron menores que 5 mm.

**Suposición de una inclinación constante en el cable:** Esta simplificación del problema proporcionó resultados similares a los métodos empíricos para ángulos menores que  $15^\circ$ . Para ángulos mayores a este valor, las diferencias entre los resultados tienden a aumentarse y llegan a tener magnitudes mayores que 3 cm y hasta 9 cm en el caso de la prueba 3.

**El efecto de despreciar la corrección de la línea mojada:** Para la prueba No.1 esta simplificación proporcionó resultados similares a los métodos empíricos dentro del rango de ángulos que se presentan en el experimento. Sin embargo, en la prueba 3 se obtuvieron discrepancias significativas (mayores de 6 cm) debido a que se presentaron ángulos mayores durante su realización.

#### **4.5. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES**

Dando un enfoque a las observaciones señaladas en el apartado anterior, se puede concluir que dentro del rango de tirantes utilizados, las soluciones empíricas de la ISO 748-1997 y el documento ISO TR 9209-1989 proporcionan resultados similares en la mayoría de los casos. El método basado en la suposición de una inclinación constante en el cable, dado que presenta una hipótesis simplificada sobre la forma que toma la línea mojada, proporciona resultados no congruentes con los derivados de los métodos más confiables, particularmente en el caso de ángulos mayores que  $15^\circ$ . Adicionalmente, se observó que en la práctica la corrección en el aire puede tener una importancia mayor, particularmente cuando se presentan tirantes pequeños y ángulos menores que  $15^\circ$ . En tales casos, se puede aplicar una solución simplificada, en la cual se desprecia la corrección a la línea mojada.

Debido a las limitaciones del experimento en el canal de la presa de Josefa Ortiz de Domínguez, no fue posible hacer este tipo de análisis para casos de tirantes más grandes y con escandallos y cables de suspensión de diferentes especificaciones. Estas condiciones facilitarían la aplicación de las tablas 5 y 6 del ISO TR 9209 que corresponden a  $\beta=3$ , 4 y  $\beta=5$  respectivamente.

Un objetivo para futuras investigaciones sería verificar la aplicabilidad y limitaciones de diferentes escandallos para aforar en canales profundos. En México se acostumbra a utilizar escandallos de 7 y 15 kg. Sin embargo, hemos visto que este peso resulta inadecuado en flujos con tirantes mayores que 2 m y velocidades mayores que 2 m/s. Por ejemplo, en la prueba 3 se determinó que conforme a la estipulación de la norma ISO 3454 un escandallo con un peso de 22 kg podría ser adecuado bajo las condiciones de flujo que se presentaron en el canal. En ese sentido, se debe considerar la implementación de escandallos con mayores pesos para aforar en canales con tirantes mayores a 2 m. De hecho, se puede desarrollar una selección de pesos con base en la relación 4-1 y tomando en cuenta las características geométricas y hidráulicas de los canales en diferentes regiones del país.

El error en la estimación de la profundidad del molinete debe evaluarse en términos de la incertidumbre en la estimación del caudal. Se tratará de este tema en el capítulo siguiente.

---

**Capítulo****5****EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA APLICADOS A AFOROS CON MOLINETES****5.1. INTRODUCCIÓN**

En la estimación de los caudales en los canales y ríos se emplea frecuentemente el método denominado de “área-velocidad”, el cual consiste en determinar el área de una sección transversal y la velocidad media del agua fluyendo a través de esta. Para determinar el caudal se utiliza la siguiente relación entre los componentes de velocidad en una sección transversal (French, 1988).

$$Q = \int_s \underline{v} \underline{n} ds \quad (5.1)$$

donde,

$\underline{v}$  es el vector velocidad en la sección transversal;  $\underline{n}$ , la componente normal al plano transversal y  $s$ , es la superficie o área de la sección transversal.

En la relación anterior, es difícil determinar el campo de velocidades continuo ( $\underline{v}$ ), por lo tanto, para una aplicación práctica se utiliza una aproximación discreta de la integral definida en la ecuación (5.1). La relación discreta tiene su fundamento en la suma de los caudales parciales ( $q$ ) para un área ó franja de la

sección ( $a_i$ ), y una velocidad media ( $v_i$ ) (figura 5.1), entonces el caudal total se estima sumando los caudales parciales obtenidos en cada dovela, por medio de la expresión siguiente (Kennedy, 2000):

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i v_i = \sum_{i=1}^n q_i \quad (5.2)$$

Donde,  $Q$  es el caudal total en la sección en  $m^3/s$ ,  $a_i$ , el área de la dovela  $i$  en  $m^2$ ,  $v_i$ , la velocidad media en la dovela  $i$  en  $m/s$  y  $q_i$  es el caudal en la dovela  $i$ .

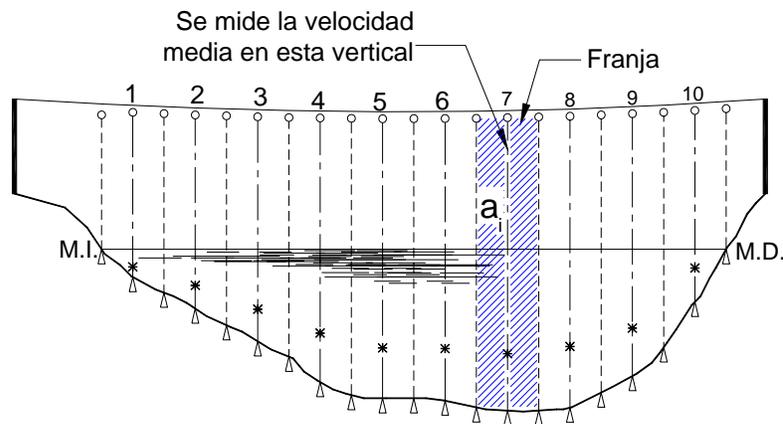


Figura 5- 1: División en franjas de una sección transversal de una corriente

Para minimizar la incertidumbre en la estimación del caudal, la sección en la cual se hacen las mediciones debe cumplirse con ciertas condiciones, las relevantes a considerar son (ISO 748, 1997):

1. El tramo del canal del sitio de medición debe ser recto y con una pendiente y sección transversal uniforme.
2. Las direcciones de flujo en los puntos en cualquier vertical en el ancho completo del canal deben ser paralelos entre ellas y perpendicular a la sección transversal.
3. Las curvas de la distribución de velocidad deben ser regulares en planos horizontales y verticales de medición.

4. La profundidad del flujo en la sección debe ser suficiente en el rango completo de tirantes que se presentan para facilitar la inmersión completa del molinete.

Si cumplen las condiciones de localización de aforo, entonces de manera hipotética en esa sección se tienen las siguientes condiciones de flujo; no olvidando que el número de dovelas contribuye en la exactitud en la determinación del caudal (ISO, 1997):

1. La velocidad máxima en canales ordinarios ocurre bajo la superficie libre a una distancia 0.05 a 0.025 de la profundidad de flujo y este porcentaje aumenta con incrementos en la profundidad del canal y acercando a las orillas.
2. La velocidad media en una vertical de un canal se presenta a 0.6 de la profundidad.
3. La curva de variación vertical de la velocidad se aproxima a una parábola de eje vertical, es decir aumenta de la superficie del agua hacia abajo, hasta llegar al punto de velocidad máxima y a partir de este comienza a disminuir.

Las afirmaciones presentadas con anterioridad son el resultado de un conjunto de condiciones incluyendo la presencia de la superficie libre, la forma y cambios de la sección, la rugosidad de las paredes, el gasto y la acción de corrientes secundarias. No obstante las condiciones anteriores y debido al efecto de la turbulencia del flujo, la magnitud de la incertidumbre en la estimación del caudal estaría definida por la metodología utilizada en la determinación de la velocidad media.

*En este capítulo se evalúan los métodos más utilizados para estimar la velocidad media en los aforos de campo realizados con molinetes. Esta evaluación se basa en un análisis comparativo aplicado a los datos experimentales corregidos en el capítulo anterior. Además, se examina la importancia de la corrección de profundidad con respecto a la estimación del caudal.*

## **5.2. MÉTODOS DE AFORO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD MEDIA**

En la práctica, se selecciona una metodología adecuada para estimar la velocidad media dando consideración a ciertos factores, los más importantes siendo el tiempo disponible para realizar el aforo, el ancho y profundidad del canal, las condiciones en el fondo de la sección de aforo y tramo aguas arriba, variación del nivel de la superficie del agua y el nivel de precisión requerida en la estimación (ISO 748, 1997).

En la Norma ISO 748-1997 se presenta la siguiente clasificación de los métodos comúnmente utilizados para estimar la velocidad media.

- a) Método distribución de velocidad
- b) Métodos de puntos reducidos
- c) Método de Integración

### **5.2.1. Método de distribución de velocidad (ISO 748-1997)**

El método de distribución de velocidad requiere un alto número de mediciones de la velocidad y, por lo tanto, exige más tiempo para realizar el aforo, pero es más confiable. En este método, se mide la velocidad en diferentes profundidades cuidadosamente seleccionadas, el cual permite determinar la distribución de velocidad en cada vertical. Se traza la distribución de velocidades que, al ser integrada, permite estimar la velocidad media y caudal en la dovela.

### **5.2.2. Métodos de puntos reducidos (ISO 748-1997)**

Los métodos de puntos reducidos son la forma más sencilla y rápida para determinar la velocidad media, y que sólo requieren la medición de la velocidad a profundidades específicas en la vertical. Las variaciones más utilizadas en la práctica son las siguientes:

- a) la medición de la velocidad a 0.6 de la profundidad, este valor se toma como la velocidad media en la vertical.

- b) la medición de la velocidad a 0.2 y 0.8 de la profundidad, la velocidad media siendo el promedio aritmético de las dos velocidades.
- c) la medición de la velocidad a 0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad, la velocidad media siendo el promedio aritmético de las tres velocidades.

En la práctica usual en México, los aforos de los gastos se estiman por el método de puntos reducidos, que limita las mediciones de velocidad a 0.8, 0.6 y 0.2 de la profundidad de la vertical. Como se indica en las tablas 1-1 y 1-2 del capítulo 1, la incertidumbre asociada con esos métodos es del orden  $\pm 5\%$ , la cual es adecuada para la mayoría de aplicaciones prácticas.

### **5.2.3. Método de integración (ISO 748-1997)**

El uso del método de integración ha sido muy limitado en la práctica. En este método se obtiene la velocidad media de forma dinámica desplazando el molinete en la vertical, desde el fondo del canal hasta la superficie libre del agua a una velocidad constante. La velocidad media se calcula como el cociente del número total de revoluciones del molinete entre el tiempo que tarda en desplazarse desde el fondo hasta la superficie del canal.

### **5.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS MÉTODOS**

Existen modelos que definen la distribución de la velocidad en la vertical, y que se han derivado de investigaciones acerca del comportamiento de flujo a superficie libre y los fenómenos que ocurren dentro del agua. El principio fundamental de la hidráulica que forma la base para los modelos de distribución de velocidad se denomina “el concepto de la capa límite”. Este principio establece que la velocidad de las partículas en contacto con una frontera es cero y la distribución de la velocidad en cualquier flujo sobre dicha frontera resulta de la influencia que la fuerza de fricción generada sobre la frontera ejerce hacia el interior del flujo (Nezu y Nakagawa, 1993). A continuación se explica los conceptos teóricos más relevantes a la distribución de la velocidad.

#### **5.3.1. Relación entre la capa límite y la distribución de velocidad**

En la mayoría de los problemas de flujo que se presentan en la práctica, los números de Reynolds corresponden a flujos turbulentos donde los efectos de la viscosidad son despreciables. En general, los efectos viscosos se confinan a una capa muy delgada, en la inmediata vecindad de las fronteras sólidas, que se conoce como capa límite (Sotelo, 1999). Los primeros trabajos relacionados con este principio fueron desarrollados por Ludwig Prandtl en 1904 y han contribuido considerablemente al entendimiento de muchos fenómenos que se enfrentan en la hidráulica moderna.

Se puede entender el concepto de la capa límite considerando un flujo uniforme horizontal, de velocidad constante  $V_0$ , entrando en un canal como se muestra en la figura 5.2. Se ha observado que al entrar el canal, la distribución de velocidades en la sección transversal varía con la distancia en la dirección  $x$ , debido a la rugosidad de la frontera. Si el flujo es uniforme y estable, y el canal es prismático de rugosidad constante, la distribución de velocidades llegará a tener un patrón constante. En esta situación hipotética, se presentan las siguientes condiciones (Chow, 1959):

1. El flujo entrando el canal es laminar y de una distribución de velocidad uniforme.
2. No existe ningún obstáculo en la entrada del canal que puede presentar perturbaciones a la superficie libre del agua y la distribución de velocidades.

3. La profundidad del canal es considerablemente grande y por lo tanto, la profundidad del flujo es constante.

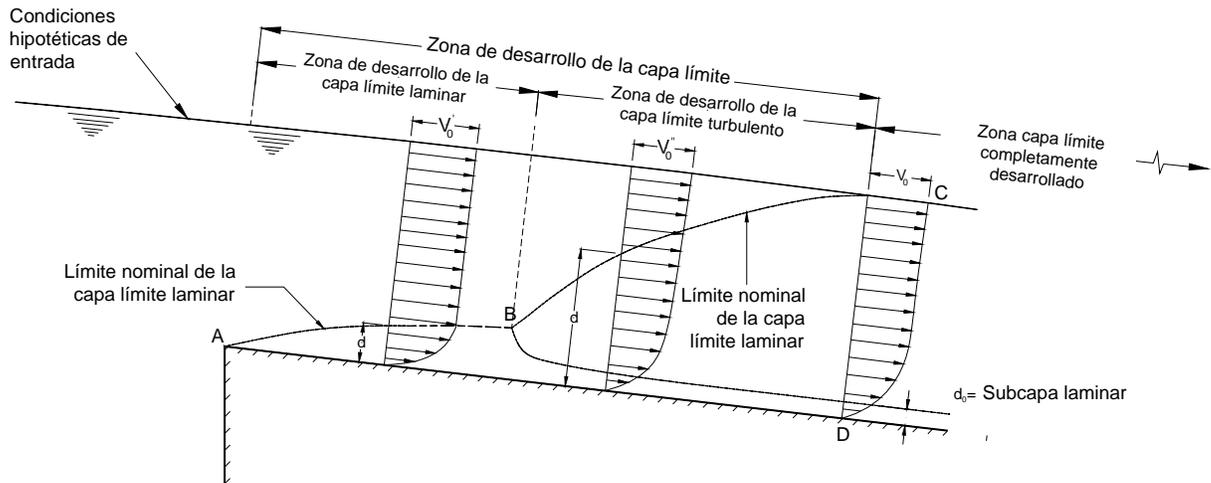


Figura 5- 2: Desarrollo de la capa límite en un canal abierto con condiciones ideales de entrada (Chow, 1959)

En la figura 5.2 se presenta el efecto en la distribución de velocidad en la dirección  $x$  debido a la rugosidad de la frontera con la línea ABC. La región dentro de ABC se conoce como capa límite y su espesor designado  $\delta$  aumenta conforme a la distancia del punto A. Dentro de la capa límite, se presentan las siguientes condiciones (Sotelo, 1999):

- La velocidad del fluido, en contacto con la frontera, es igual a cero.
- El gradiente transversal de velocidades y por lo tanto, el esfuerzo cortante, alcanzan valores máximos en la frontera y disminuye a medida que el punto se aleja de ésta.
- Fuera de la capa límite, el gradiente de velocidad es prácticamente cero, porque, también lo es el esfuerzo cortante y los efectos viscosos.

- d) Fuera de la capa límite las líneas de corriente se conforman, según un flujo con potencial, sufriendo un ligero desplazamiento hacia el exterior de la pared.

Al principio del canal se presenta un flujo laminar y la capa límite se desarrolla en la superficie del canal siguiendo la curva AB. La distribución de velocidad en esta capa es aproximadamente parabólica. El flujo en la capa límite se convierte a un flujo turbulento con el avance del agua a lo largo del canal, este cambio ocurre desde el punto B y hacia adelante. Aguas abajo del punto B se desarrolla una capa límite turbulento BC caracterizado por una distribución de velocidad aproximadamente logarítmica. En la figura 5-2 la capa límite laminar se desarrolla completamente en la sección CD, la distribución de velocidad tiene un patrón estable de este punto y en adelante. En la gran mayoría de los problemas prácticos se presentan la distribución de velocidad característica de la capa límite turbulento por lo que se han establecido varias relaciones que se presentarán en las secciones posteriores.

### 5.3.2. Distribución de la velocidad sobre fondos lisos

A pesar de que en la gran mayoría de los problemas de flujo en canales y ríos el agua fluye sobre un fondo rugoso, los primeros esfuerzos a desarrollar relaciones que describen la distribución de la velocidad fueron enfocados al caso hipotético de un fondo liso. En general las relaciones aplicables al caso de fondos rugosos son versiones modificadas de las anteriores, que incorporan el efecto de la rugosidad mediante un parámetro representativo denominado rugosidad, y este define la naturaleza de la superficie sobre la cual se da el flujo.

El entendimiento de las estructuras que operan en la condición de flujo turbulento, ha resultado en la identificación de tres sub-regiones en el flujo, tal como se ilustra en la figura 5-3 (Nezu y Nakagawa, 1993).

1. Región de la pared [ $y/h < (0.15 - 0.2)$ ] - corresponde a la capa interior en la teoría clásica de la capa límite. Las escalas lineal y de velocidad correspondientes son  $\nu / U_*$  y  $U_*$  respectivamente, donde  $\nu$  es la velocidad cinética del fluido, y  $U_*$  es la velocidad de fricción definida por la relación siguiente:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g R_h S} \quad (5.3)$$

donde,  $\tau_b$  es el esfuerzo tangencial en el fondo del canal,  $\rho$ , la densidad del fluido,  $R_h$ , el radio hidráulico de la sección,  $S$ , la pendiente del canal y  $g$ , la aceleración de la gravedad.

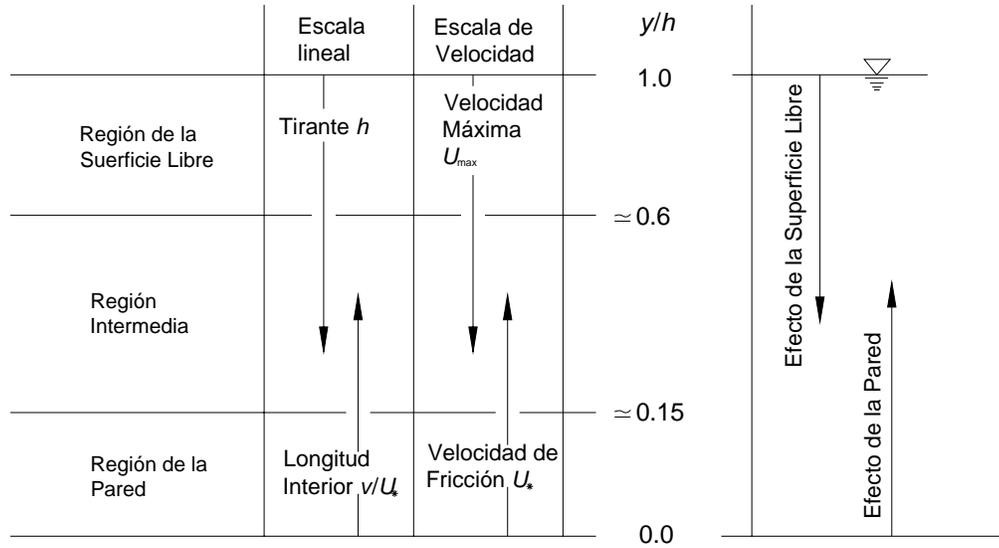


Figura 5- 3: Sub-división del campo de flujo a superficie libre (Nezu y Nakagawa, 1993)

2. Región de la superficie libre  $[0.6 < y/h \leq 1.0]$  - Las escalas lineal y de velocidad son el tirante  $h$  y la velocidad máxima  $U_{max}$ .
3. Región intermedia  $[(0.15 - 0.2) \leq y/h \leq 0.6]$  - En esta región no se predominan las influencias de la pared ni la superficie.

Dentro de la región de la pared en canales amplios con fondo liso, la distribución de la velocidad está definida por las relaciones siguientes en la subcapa laminar (Nezu y Nakagawa, 1993):

$$U^+ = y^+ \quad (y^+ \ll B) \quad (5.4)$$

Donde

$$U^+ = \frac{U}{U_*}, \quad y^+ = \frac{yU_*}{\nu} \quad y \quad B \approx 26 \quad (\text{Nezu y Rodi, 1986})$$

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{K} \ln(y^+) + A \quad (B < y^+ \leq 0.2U_* h/\nu) \quad (5.5)$$

donde  $K$  es el constante de Kármán y  $A$ , una constante de integración.

Investigaciones recientes han indicado que la ley logarítmica (ecuación 5.5) es válida sólo dentro de la región de la pared. Sin embargo, debido a la falta de información concluyente acerca de la longitud de mezclado en la región externa ( $y/h > 2$ ), esta ley ha sido utilizada para describir la distribución de velocidad sobre la profundidad completa de flujo a superficie libre. En el tratamiento de casos en que el comportamiento hidráulico del flujo se desvía de la ley logarítmica, se recomienda agregar una función de perturbación aerodinámica conocida como “wake function” y que toma en cuenta estas desviaciones, por lo tanto, la relación 5.5 toma la forma siguiente:

$$U^+ = \frac{1}{K} \ln(y^+) + w(y/h) \quad (5.6)$$

donde,  $w(y/h)$  es la función de perturbación aerodinámica.

En la aplicación de la relación anterior a situaciones específicas se ajusten los constantes  $k$  y  $A$  con los datos experimentales disponibles. Una alternativa ha sido adoptar los valores de flujo en tuberías de Nikuradse, esos siendo  $k=0.4$  y  $A = 5.5$  (Nezu y Nakagawa, 1993).

### 5.3.3. Distribución de la velocidad sobre fondos rugosos

Para el caso de un flujo sobre un fondo rugoso se representa el efecto de los elementos de viscosidad en la pared por medio de la rugosidad equivalente de arena de Nikuradse  $k_s$ . En general,  $k_s$  depende de la forma, espesor, el ancho y distribución espacial de la rugosidad. Mediante observaciones experimentales Schlichting en 1955, mostró que entre más uniforme y regular estén los elementos distribuidos en el fondo del canal,  $k_s$  es lo más cercano al espesor de las protuberancias (Nezu y Nakagawa, 1993).

En la mayoría de los casos, para materiales conocidos, se puede determinar la rugosidad equivalente de la ley de fricción derivada de la ley logarítmica. Una alternativa para determinar el valor de  $k_s$ , es utilizar la distribución de la velocidad media sólo cuando esta, coincida con la ley logarítmica en la región de la pared.

Se pueden clasificar los regímenes de flujo turbulento dependiendo de la razón entre la escala lineal y la escala viscosa  $k_s^+ = U_* k_s / \nu$ , a la cual se le denomina parámetro adimensional de rugosidad o número de Reynolds de rugosidad. Schlichting en 1968 definió la siguiente clasificación para estas regímenes.

1. Hidráulicamente liso,  $k_s^+ \leq 50$
2. Hidráulicamente de transición,  $5 \leq k_s^+ \leq 70$
3. Hidráulicamente rugoso,  $k_s^+ > 70$

En la condición de un fondo hidráulicamente liso, no se presentan efectos de rugosidad debido a la subcapa viscosa, y en caso contrario, cuando el fondo es completamente rugoso. En los regímenes característicos de los fondos en transición se presentan tanto efectos viscosos como rugosos.

En la aplicación de la ley logarítmica a flujo en condiciones rugosas se modifica la relación 5.6 incorporando los efectos de rugosidad a través de la escala lineal, se obtiene la relación siguiente:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + A_r + w(y/h) \quad (5.7)$$

Donde

$$A_r \equiv \frac{1}{k} \ln(k_s^+) + A \quad (5.8)$$

En la región de la pared,  $y/h < 0.2$ , se desprecia la función de perturbación aerodinámica y la ecuación (5.7) coincide con la ley logarítmica convencional. Según mediciones hechas por Nikuradse, en un flujo turbulento de régimen completamente rugoso  $Ar=8.5$ . En la mayoría de las aplicaciones, la tendencia ha sido suprimir la función de perturbación. Por lo tanto, para describir la distribución de la velocidad en la profundidad completa del canal, se utiliza la ecuación (5.7) en la forma siguiente:

$$\frac{U}{U_*} \equiv \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + 8.5$$

o bien

$$(5.9)$$

$$\frac{U}{U_*} \equiv \frac{1}{k} \ln\left(\frac{30y}{k_s}\right)$$

#### 5.3.4. Ley exponencial de Chen

La ley exponencial propuesta por Chen (1991) representa un modelo alternativo para la distribución vertical de la velocidad en canales con flujo a superficie libre. En su forma general, esta ley se expresa mediante la relación siguiente (Nezu y Nakagawa, 1993):

$$\frac{U}{U_*} = a \left(\frac{y}{y'}\right)^m \quad (5.10)$$

donde,

$y'$  es la posición física dentro de la capa límite en donde  $u = 0$

$a$  y  $m$  son coeficientes constantes

En el caso de flujos completamente rugosos se puede derivar una relación entre  $y'$  y  $k_s$  de la ley logarítmica de la forma siguiente:

$$y' = \frac{k_s}{e^{kA_r}} \quad (5.11)$$

o emplear la relación alternativa propuesta por Chen, (1991)

$$y' = \frac{k_s}{30} \quad (5.12)$$

Chen en 1991, analizó los rangos de aplicabilidad de diferentes exponentes y determinó que un valor de  $m = 1/6$  es válido para un amplio rango de canales y condiciones de flujo.

#### 5.3.5. Determinación de la velocidad de fricción $U_*$

Existen los siguientes métodos para determinar la velocidad de fricción  $U_*$ .

1. El método más sencillo aplicable a condiciones de flujo uniforme y permanente implica el uso de la relación siguiente, ya mencionada en la sección 5.3.2:

$$U_* = \sqrt{g R_h S_o} \quad (5.13)$$

Donde,  $R_h$ , es radio hidráulico,  $S_o$ , es la pendiente del canal, y  $g$ , es la aceleración de gravedad. En el caso de flujo permanente no-uniforme, se sustituye la pendiente de la línea de energía  $S_f$  en el lugar de  $S_o$ . En algunos casos debido a la dificultad en determinar la pendiente  $S_f$  del canal en la proximidad de la sección de medición, es difícil aplicar este método.

2. Determinación de  $U_*$  de la distribución de velocidad medida  $U(y)$  con la ley logarítmica.
3. Determinación de  $U_*$  de la distribución medida de Reynolds  $-\overline{uv}(y)$  con la relación:

$$\frac{\tau}{\rho} \equiv -\overline{uv} + \nu \frac{\partial U}{\partial y} = U_*^2 \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (5.14)$$

4. Determinación de  $U_*$  de mediciones directas del esfuerzo cortante.

Todos los métodos anteriores requieren la realización de mediciones precisas como las que se logran en experimentos de laboratorio y por lo tanto, no se pueden aplicar en la práctica para canales abiertos. Un método alternativo, aplicado con frecuencia en la práctica para determinar  $U_*$ , se basa en el mejor ajuste de la distribución medida de la velocidad media a la ley logarítmica, caso 2 y que fue utilizado en la determinación de  $U_*$  en este documento.

### 5.3.6. Derivación de la velocidad media

La derivación de la velocidad media se lleva a cabo considerando la función que define la variación de la velocidad en una vertical. En la curva representativa del perfil de velocidad de la figura 5.4, el área del segmento  $U_{AB} \Delta y$  es equivalente al gasto por unidad de ancho que fluye a través de la profundidad  $\Delta y$ .

Si se consideran segmentos adicionales en la profundidad completa del canal, la suma de las áreas se aproxima al gasto por unidad de ancho, para la dovela correspondiente. En el caso extremo de segmentos de anchos infinitesimalmente pequeños, el área contenida entre la curva  $U(y)$  y el eje y correspondería a la siguiente expresión:

$$A = q = \int_0^{y_0} U(y) dy \tag{5.15}$$

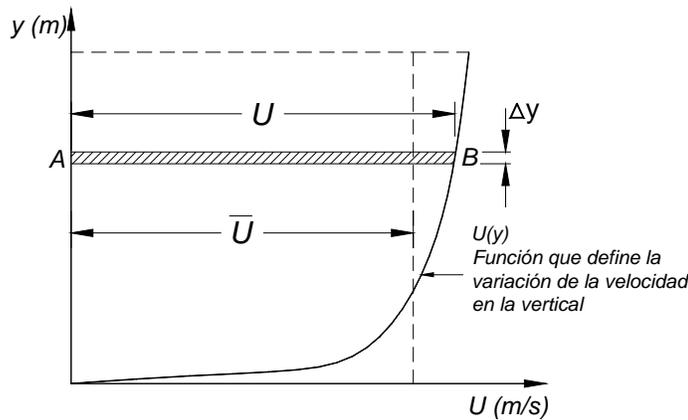


Figura 5- 4: Derivación de la velocidad media, a partir de la distribución de velocidad en una vertical

Donde,  $U(y)$  es la función que define la distribución de la velocidad en la vertical,  $y_0$ , el tirante del agua y  $q$  el gasto unitario que pasa por la dovela.

Se determina la velocidad media  $\bar{U}$  dividiendo este gasto entre el tirante  $y_0$ . En términos matemáticos:

$$\bar{U} = \frac{1}{y_0} \int_0^{y_0} U(y) dy \tag{5.16}$$

A continuación se aplica el concepto en la derivación de las relaciones de la velocidad media correspondientes a la ley exponencial y la ley universal de la distribución de la velocidad.

**5.3.7. Velocidad media derivada de la ley exponencial**

La ley exponencial de la distribución de la velocidad toma la forma siguiente:

$$\frac{U}{U_*} = a \left( \frac{y}{y'} \right)^m \Rightarrow U = \left( \frac{a \cdot U_*}{y'^m} \right) y^m$$

Donde,  $U_*$  y  $y'$  son constantes

Aplicando la relación 5.16, obtenemos la siguiente expresión para la velocidad media:

$$\bar{U} = \frac{1}{y_0} \left( \frac{a \cdot U_*}{y'^m} \right) \int_0^{y_0} y^m dy$$

o bien,

$$\bar{U} = \frac{c}{y_0} \int_0^{y_0} y^m dy \quad \text{donde } c = \left( \frac{a U_*}{y'^m} \right)$$

que resulta en la siguiente relación para la velocidad media

$$\bar{U} = c \frac{y_0^m}{m+1} \quad (5.17)$$

### 5.3.8. Velocidad media derivada de la ley logarítmica

La ley logarítmica de la distribución de la velocidad toma la forma siguiente:

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{y}{k_s} \right) + A_r \Rightarrow U = \frac{U_*}{k} \ln \left( \frac{y}{k_s} \right) + A_r$$

Aplicando la relación 5.16 obtenemos,

$$U = \frac{U_*}{k} \int_y^{y_0} \ln \frac{y}{k_s} + A_r$$

Debido a la naturaleza de la integral definitiva, no se puede llegar a una solución introduciendo un límite menor de cero. Por lo tanto se introduce un límite menor igual a  $y'$  (Nezu y Nakagawa, 1993), que corresponde a la posición física dentro de la capa límite en donde  $U = 0$ . La solución de la integral 5.16 se obtuvo haciendo uso del programa MAPPLE.

$$\bar{U} = \frac{U_*}{y_0 \cdot k} \left[ y_0 \ln \left( \frac{y_0}{y'} \right) - y_0 + y' \right] \quad (5.18)$$

El parámetro  $y'$  es una función de la rugosidad canal y se determina por la siguiente relación propuesta por Chen (Nezu y Nakagawa, 1993):

$$y' = \frac{k_s}{30}$$

Donde,  $k_s$  es la rugosidad equivalente del canal.

### 5.3.9. Coincidencia de los perfiles teóricos con datos de aforos

El problema principal que se presenta con el uso de relaciones teóricas que definen la distribución de la velocidad es la falta de coincidencia entre los perfiles derivados y las velocidades medidas. Por lo tanto, no se puede lograr un ajuste adecuado que justifique el empleo de los modelos de distribución de velocidad en todos los casos de flujo en canales. Adicionalmente, en las zonas del flujo cerca de la superficie libre y el fondo del canal, las diferencias entre perfiles extrapolados y los datos pueden ser considerables, debido a los fenómenos que ocurren.

Nezu y Rodi (1985) encontraron, mediante mediciones de corrientes secundarias con un LDV (anemómetro laser Doppler), que el flujo depende de la razón  $\alpha \equiv b/h$  (denominado “aspect ratio” en el lenguaje técnico en inglés), donde  $b$  es el ancho del canal y  $h$  es el tirante del flujo. Los mismos investigadores derivaron la siguiente clasificación de canales:

1. Canal estrecho ( $\alpha \leq \alpha_c \approx 5$ )- La existencia de corrientes secundarias debido a efectos de los taludes resulta en una deformación de la distribución de velocidad cerca de la superficie, tal que la velocidad máxima se encuentra en un punto debajo de la superficie del agua.
2. Canal amplio ( $\alpha > \alpha_c$ )- La influencia de las corrientes secundarias debido a los efectos del talud están disminuidos en la zona central del canal dentro de una sección del ancho igual a  $(b - \alpha_c h)$ . Por lo tanto, propiedades bidimensionales de flujo están presentes en esta región en

las estructuras de largo plazo promediadas sobre la turbulencia, siempre y cuando la variación de la fuerza cortante en el fondo no es periódico.

Para explicar las implicaciones de las ideas presentadas con anterioridad consideramos la figura 5.4 en la cual se observa que dentro del rango de medición la curva teórica de la distribución de velocidad no describe adecuadamente la variación de la velocidad en la vertical. En la parte superior del flujo los datos de aforo reflejan una disminución en la magnitud de la velocidad, mientras que la curva teórica indica una situación contraria. Por lo tanto, se requiere una combinación de relaciones para describir, la distribución de la velocidad en las diferentes zonas de la vertical. La alternativa sencilla de una relación lineal para la parte superior da resultados satisfactorios en este caso.

La situación mostrada con los datos experimentales en la figura 5.4 puede presentarse para el caso de canales estrechos, en que el efecto de los taludes resulta en una deformación del perfil de velocidad, tal que, la velocidad máxima queda en un punto intermedio en la vertical. Otra consideración sería considerar la distribución de la velocidad en la parte inferior de la sección en que no se puede medir, debido a limitaciones con el instrumento de medición.

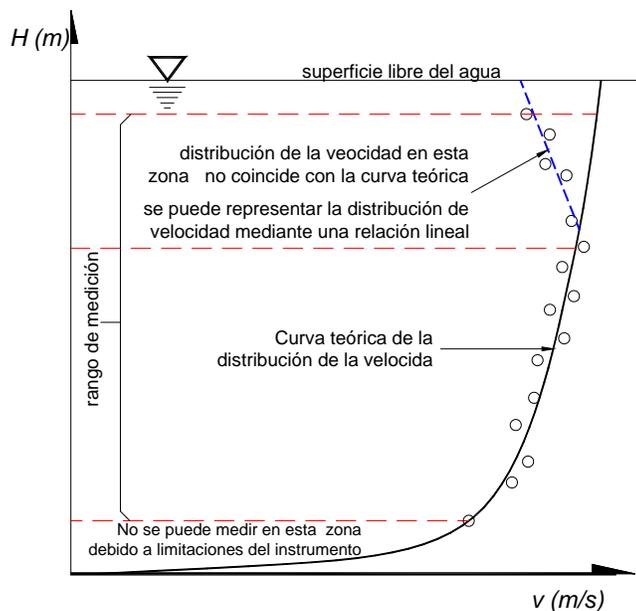


Figura 5- 5: Concordancia entre un perfil de velocidad teórico y datos de medición

#### 5.4. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Para el análisis presentado en este capítulo se utilizaron los datos originales y corregidos de los aforos del experimento realizado en el canal principal de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, ya descrito en el capítulo 4.

Básicamente los datos experimentales son una serie de puntos de velocidad y profundidad correspondiente en cada vertical. Debido a la fuerza de arrastre de la corriente, no se pudo mantener el molinete en las profundidades originalmente planteadas para el aforo. Como se mencionó en el capítulo 4, este problema produce errores en la estimación del gasto debido al desplazamiento vertical del perfil de la distribución de la velocidad. Adicionalmente impidió la medición de la velocidad en la parte inferior del canal.

Para facilitar el análisis comparativo entre diferentes métodos para determinar la velocidad media, se aplicaron los siguientes métodos a los datos experimentales corregidos en cada dovela:

- a) Promedio algebraico de todas las velocidades medidas en cada vertical.
- b) Integración de perfiles de velocidad basada en la ley logarítmica y la ley exponencial.
- c) Método de puntos reducidos basado en la medición de la velocidad a 0.6 de la profundidad medida desde la superficie libre del agua.
- d) El método de puntos reducidos basado en la medición de la velocidad a 0.2 y 0.8 de la profundidad medida desde la superficie libre del agua. Siendo la velocidad media el promedio de esas velocidades.

Se evaluó la magnitud del error producido en el gasto para diferentes ángulos de desviación del cable, comparando caudales determinados con los datos originales y corregidos utilizando el método ISO-748 presentado en el capítulo 4.

Se debe mencionar que debido a las dificultades que se presentaron en ubicar los molinetes utilizados en la prueba del canal de la presa Josefa Ortiz, no se cuenta con velocidades en las profundidades

0.2, 0.6 y 0.8. Por lo tanto, las velocidades correspondientes a esas profundidades fueron generadas mediante extrapolaciones de los perfiles teóricos de los datos corregidos.

#### 5.4.1. Determinación de parámetros

- **Rugosidad equivalente de Nikuradse  $k_s$**

En la práctica una de las tareas más difíciles relacionada con la aplicación de relaciones de fricción, ha sido la determinación de la rugosidad equivalente  $k_s$  en las fronteras de los canales. En el caso de canales naturales, se complica la determinación de  $k_s$  debido a la no uniformidad del espesor y forma de los elementos de rugosidad (Nezu y Nakagawa, 1993). Muchos investigadores han realizado experimentos con rugosidades artificiales, empleando cubos, esferas, conos, escalones rectangulares y triangulares, etc., para cuantificar no sólo el efecto de la altura de los obstáculos, sino también su separación o densidad de distribución.

Para el análisis del flujo en el canal se utiliza un valor de  $k_s = 3.0\text{mm}$ , determinado para el caso de un conducto fabricado de concreto el cual es el tipo de material utilizado en la construcción del canal de la presa Josefa Ortiz de Domínguez (Sotelo, 2000).

Velocidad de fricción  $U_*$

Se estimó la velocidad de fricción  $U_*$  mediante el mejor ajuste de los datos de medición a la ley logarítmica. Este método presenta la alternativa más práctica debido a la dificultad en determinar los parámetros requeridos para los otros métodos señalados con anterioridad (sección 5.3.5).

- **Parámetro  $y'$**

Para la determinación de  $y'$  se utilizó la ecuación 5.11.

- **Coefficiente  $a$  y exponente  $m$  de la Ley Exponencial**

Con los valores determinados de  $U_*$  y  $y'$  se estimó los parámetros  $a$  y  $m$  mediante una regresión no-lineal aplicando los datos de aforo a la relación exponencial.

En el análisis, los métodos de estimación de la velocidad media fueron aplicados al nivel de las dovelas para 2 caudales diferentes correspondientes a las pruebas 1 y 3 señalados en la tabla del capítulo 4-1. Se determinó el caudal pasando por cada dovela, y después en la sección transversal completa del canal, aplicando las ecuaciones 5.1 y 5.2 respectivamente.

## 5.5. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Una consideración importante en cualquier estudio relacionado con la distribución de la velocidad en flujo a superficie libre es la variación de la velocidad media con el tiempo. En los flujos en general se presentan fluctuaciones aleatorias en la velocidad y tendencias no estacionarias en el gasto medio. Para tener estimaciones fiables de la distribución de la velocidad se debe asegurar que las velocidades tengan patrones estables, en el intervalo de tiempo que se utiliza para medirlas.

Para verificar la estabilidad de las velocidades medidas se necesita contar con mediciones continuas en los puntos seleccionados para el aforo. Se puede evaluar la estabilidad de los datos mediante un análisis estadístico de la desviación estándar y velocidad media de la serie de datos correspondientes a cada punto de aforo.

Es preferible hacer este tipo de evaluación cuando se utilizan equipos automatizados, capaces de medir la velocidad en intervalos predeterminados, tal es el caso de los medidores acústicos de efecto Doppler o tiempo de travesía. En este estudio, no se verificó la estabilidad de la serie de tiempo de los datos de velocidad. Eso se debe al gran número de puntos en que se midió la velocidad, ya que se requería mucho tiempo para hacer mediciones repetitivas en cada punto. Además, como se indicó anteriormente, el molinete no es un dispositivo adecuado para este tipo de análisis.

En las tablas 5-1, 5-2, 5-3 y 5-4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis comparativo realizado. Se han destacados las siguientes observaciones importantes relacionadas con los resultados:

*Coefficientes determinados para las relaciones teóricas:* Como se indicó anteriormente, fue necesario ajustar las relaciones teóricas con los datos experimentales, lo cual permitió la determinación de los coeficientes y valores constantes en esas relaciones. Se observó que la magnitud de la velocidad de fricción  $U_*$ , varió entre 0.06 m/s y 0.09 m/s mientras que los valores de  $a$  y  $y'$  (relación exponencial) fueron del orden 4.9 y 0.000092 m respectivamente. Se verificó la variabilidad de la velocidad de fricción mediante la desviación estándar la cual, en general, fue menor al  $\pm 5\%$

*Coincidencia entre resultados derivados de la ley logarítmica y la ley exponencial:* Como se puede observar en las tablas 5-1 y 5-4, se obtuvieron resultados similares aplicando la ley exponencial y la ley logarítmica. En general las diferencias entre las velocidades medias y caudales obtenidos de estas relaciones no excedieron  $\pm 2\%$ . En el anexo D se presentan gráficas de perfiles de velocidad generados para dovelas selectas del aforo. Ahora bien, cabe señalar que a pesar de la coincidencia entre los resultados, en la parte inferior cercano al fondo no se obtuvieron datos experimentales, lo cual no permitió verificar en esta zona la bondad de la ley de velocidad logarítmica y exponencial. En el anexo D se observan separaciones típicas entre las curvas en la parte superior e inferior de la vertical.

*Coincidencia entre los perfiles teóricos y datos experimentales:* Para definir de forma adecuada el perfil de velocidad, se debe medir la velocidad en un gran número de puntos en la vertical. Sin embargo, en este estudio se intentó definir el perfil de velocidad ajustando las relaciones teóricas a datos correspondientes a 8 puntos de medición en cada vertical. En la prueba No.1 los datos coincidieron de manera satisfactoria con los perfiles teóricos. Sin embargo, en la prueba 3 se observó que los datos se alejaron de las curvas teóricas, particularmente en la parte superior de la vertical, de tal forma que las relaciones tienden a sobreestimar la velocidad y dan una velocidad máxima en la superficie del canal. Los datos experimentales, por el otro lado, indican que la velocidad máxima queda en un punto bajo de la superficie libre. Este resultado está conforme con las observaciones Nezu y Rodi (sección 5.3.9) considerando que el valor de  $\alpha$  resulta ser menor que 5 en este caso.

*Importancia de la corrección de la profundidad del molinete:* De las comparaciones entre los resultados obtenidos con los datos originales y datos corregidos se determinó que la diferencia entre los caudales alcanzó valores máximos de 2% y 5% en las pruebas 1 y 3 respectivamente. En la medición de flujo a superficie libre la incertidumbre de  $\pm 2\%$  se considera un valor aceptable (Tabla 1-1, ISO-748, 1997). Sin embargo, el error sistemático por corrección de profundidad, es solo un componente del error total, el cual debe incluir las incertidumbres en la estimación del área (medición de nivel capítulo 2 y 3), y la medición de la velocidad por el instrumento. Entonces, para un análisis global de incertidumbre en la estimación del caudal se puede seguir el procedimiento definido tanto en el ISO-748, como el indicado en la ISO-1088 y en forma más general se puede consultar el ISO-GUM.

*Coincidencia entre los métodos reducidos y de integración:* Los métodos de puntos reducidos proporcionaron velocidades medias y gastos correspondientes con diferencias del orden 7% con respecto al método de integración. Esta diferencia es mayor que la esperada considerando que los métodos de puntos reducidos tienen su base en perfiles teóricos, que definen la variación de la velocidad entre la superficie y fondo del canal.

Tabla 5- 1: Análisis comparativo de las velocidades medias derivadas de diferentes métodos aplicados a datos de aforo sin y con correcciones de profundidad para la prueba No. 1

Dovela No.	Área	Velocidades medias estimadas en verticales del aforo (m/s)						
		Métodos de Puntos Reducidos (ISO 748)			Método de Integración con Perfiles Teóricas			
		0.6 $Y_0$	Promedio (0.2 $y_0$ + 0.8 $y_0$ )	Promedio algebraico	Aforo sin corrección		Aforo corregido método ISO 748	
					Ley Exponencial	Ley Logaritmica	Ley Exponencial	Ley Logaritmica
1	0.3017	1.147	1.167	1.165	1.069	1.082	1.064	1.078
2	0.2506	1.220	1.241	1.209	1.154	1.159	1.142	1.150
3	0.3257	1.341	1.363	1.331	1.275	1.280	1.255	1.266
4	0.3633	1.387	1.409	1.389	1.307	1.320	1.293	1.310
5	0.3633	1.423	1.446	1.416	1.357	1.363	1.331	1.345
6	0.3633	1.452	1.475	1.447	1.386	1.393	1.356	1.372
7	0.3633	1.485	1.509	1.478	1.418	1.424	1.388	1.403
8	0.3633	1.504	1.529	1.499	1.437	1.444	1.405	1.421
9	0.3633	1.505	1.529	1.504	1.442	1.449	1.404	1.422
10	0.3633	1.510	1.534	1.507	1.444	1.451	1.410	1.427
11	0.3633	1.516	1.541	1.514	1.450	1.457	1.416	1.433
12	0.3633	1.505	1.529	1.505	1.442	1.449	1.404	1.422
13	0.3633	1.522	1.546	1.521	1.457	1.464	1.420	1.438
14	0.3633	1.524	1.549	1.523	1.459	1.466	1.423	1.440
15	0.3633	1.542	1.567	1.540	1.476	1.483	1.439	1.457
16	0.3633	1.540	1.565	1.539	1.474	1.481	1.437	1.456
17	0.3633	1.510	1.535	1.504	1.442	1.448	1.411	1.427
18	0.3633	1.360	1.382	1.356	1.301	1.307	1.270	1.285
19	0.3186	1.318	1.340	1.309	1.257	1.263	1.233	1.245
20	0.2506	1.280	1.301	1.267	1.209	1.214	1.198	1.206
21	0.3017	1.244	1.266	1.215	1.201	1.196	1.168	1.170

Tabla 5- 2: Análisis comparativo de los gastos derivados de diferentes métodos aplicados a datos de aforo sin y con correcciones de profundidad para la prueba No. 1

Dovela No.	Área	Gastos estimados en dovelas del aforo (m <sup>3</sup> /s)						
		Métodos de Puntos Reducidos ISO 748			Método de Integración con Perfiles Teóricas			
		ISO 748 0.6 Y <sub>0</sub>	Promedio (0.2y <sub>0</sub> + 0.8y <sub>0</sub> )	Promedio algebraico	Datos Originales		Datos corregidos Método ISO 748	
					Ley Exponencial	Ley Logaritmica	Ley Exponencial	Ley Logaritmica
1	0.3017	0.35	0.35	0.35	0.32	0.33	0.32	0.33
2	0.2506	0.31	0.31	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29
3	0.3257	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.41
4	0.3633	0.50	0.51	0.50	0.47	0.48	0.47	0.48
5	0.3633	0.52	0.53	0.51	0.49	0.50	0.48	0.49
6	0.3633	0.53	0.54	0.53	0.50	0.51	0.51	0.50
7	0.3633	0.54	0.55	0.54	0.52	0.52	0.52	0.51
8	0.3633	0.55	0.56	0.54	0.52	0.52	0.51	0.52
9	0.3633	0.55	0.56	0.55	0.52	0.53	0.51	0.52
10	0.3633	0.55	0.56	0.55	0.52	0.53	0.51	0.52
11	0.3633	0.55	0.56	0.55	0.53	0.53	0.51	0.52
12	0.3633	0.55	0.56	0.55	0.52	0.53	0.51	0.52
13	0.3633	0.55	0.56	0.55	0.53	0.53	0.52	0.52
14	0.3633	0.55	0.56	0.55	0.53	0.53	0.52	0.52
15	0.3633	0.56	0.57	0.56	0.54	0.54	0.52	0.53
16	0.3633	0.56	0.57	0.56	0.54	0.54	0.52	0.53
17	0.3633	0.55	0.56	0.55	0.52	0.53	0.51	0.52
18	0.3633	0.49	0.50	0.49	0.47	0.47	0.46	0.47
19	0.3186	0.42	0.43	0.42	0.40	0.40	0.39	0.40
20	0.2506	0.32	0.33	0.32	0.30	0.30	0.30	0.30
21	0.3017	0.38	0.38	0.37	0.36	0.36	0.35	0.35
<b>Gasto Total (m<sup>3</sup>/s)</b>		<b>10.30</b>	<b>10.47</b>	<b>10.27</b>	<b>9.83</b>	<b>9.87</b>	<b>9.65</b>	<b>9.73</b>
<b>Diferencia Relativa (%)</b>		<b>6.78</b>	<b>8.53</b>	<b>6.46</b>	<b>1.89</b>	<b>2.37</b>	<b>-0.83</b>	<b>Referencia</b>

Tabla 5- 3: Análisis comparativo de las velocidades medias derivadas de diferentes métodos aplicados a datos de aforo sin y con correcciones de profundidad para la prueba No. 3

Dovela No.	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidades medias estimadas en verticales del aforo (m/s)						
		Métodos de Puntos Reducidos (ISO 748)			Método de Integración con Perfiles Teóricas			
		0.6 Y <sub>0</sub>	Promedio (0.2y <sub>0</sub> + 0.8y <sub>0</sub> )	Promedio algebraico	Aforo sin corrección		Aforo corregido método ISO 748	
Ley Exponencial	Ley Logaritmica				Ley Exponencial	Ley Logaritmica		
1	0.5945	1.33	1.35	1.34	1.26	1.26	1.24	1.25
2	0.3366	1.48	1.50	1.51	1.38	1.40	1.36	1.39
3	0.4117	1.47	1.50	1.50	1.35	1.38	1.33	1.37
4	0.4869	1.68	1.71	1.67	1.61	1.60	1.54	1.55
5	0.5621	1.82	1.84	1.67	1.69	1.67	1.61	1.62
6	0.6372	1.86	1.89	1.78	1.73	1.73	1.67	1.69
7	0.7124	1.91	1.93	1.77	1.78	1.77	1.71	1.72
8	0.7500	1.91	1.93	1.89	1.86	1.86	1.79	1.81
9	0.7500	1.91	1.94	1.88	1.91	1.89	1.80	1.81
10	0.7500	1.95	1.98	1.93	1.96	1.93	1.83	1.85
11	0.7500	1.96	1.99	1.94	1.97	1.95	1.84	1.86
12	0.7500	1.99	2.02	1.98	2.01	1.99	1.87	1.89
13	0.7500	2.01	2.04	1.99	2.03	2.00	1.89	1.91
14	0.7500	2.03	2.06	2.02	2.05	2.03	1.90	1.93
15	0.7500	1.88	1.92	2.05	1.81	1.87	1.68	1.78
16	0.7500	2.09	2.12	2.08	2.11	2.09	1.96	1.99
17	0.7500	2.10	2.14	2.09	2.13	2.10	1.97	2.00
18	0.7500	2.13	2.16	2.12	2.15	2.13	2.00	2.02
19	0.7500	2.13	2.16	2.11	2.15	2.13	2.00	2.02
20	0.7500	2.14	2.17	2.13	2.17	2.14	2.00	2.03
21	0.7500	2.12	2.15	2.10	2.14	2.11	1.98	2.01
22	0.7500	1.92	1.95	2.10	1.80	1.87	1.71	1.82
23	0.7124	2.07	2.10	2.05	2.06	2.04	1.94	1.97
24	0.6372	2.01	2.04	1.93	2.10	2.04	1.92	1.91
25	0.5621	1.98	2.01	1.96	1.98	1.96	1.86	1.87
26	0.4869	1.78	1.81	1.78	1.77	1.76	1.66	1.68
27	0.4117	1.66	1.69	1.67	1.60	1.61	1.55	1.57
28	0.3366	1.61	1.63	1.65	1.50	1.53	1.48	1.52
29	0.5945	1.50	1.53	1.52	1.42	1.43	1.39	1.41

Tabla 5- 4: Análisis comparativo de los gastos derivados de diferentes métodos aplicados a datos de aforo sin y con correcciones de profundidad para la prueba No. 3

Dovela No.	Área (m <sup>2</sup> )	Gastos estimados en dovelas del aforo (m <sup>3</sup> /s)						
		Métodos de Puntos Reducidos ISO 748			Método de Integración con Perfiles Teóricas			
		ISO 748 0.6 Y <sub>0</sub>	Promedio (0.2y <sub>0</sub> + 0.8y <sub>0</sub> )	Promedio algebraico	Datos Originales		Datos corregidos Método ISO 748	
					Ley Exponencial	Ley Logarítmica	Ley Exponencial	Ley Logarítmica
1	0.59	0.79	0.80	0.80	0.75	0.75	0.74	0.75
2	0.34	0.50	0.50	0.51	0.46	0.47	0.46	0.47
3	0.41	0.61	0.62	0.62	0.56	0.57	0.55	0.56
4	0.49	0.82	0.83	0.81	0.78	0.78	0.75	0.76
5	0.56	1.02	1.04	0.94	0.95	0.94	0.90	0.91
6	0.64	1.19	1.20	1.13	1.10	1.10	1.06	1.08
7	0.71	1.36	1.38	1.26	1.27	1.26	1.22	1.22
8	0.75	1.43	1.45	1.42	1.40	1.39	1.34	1.36
9	0.75	1.43	1.45	1.41	1.43	1.42	1.35	1.36
10	0.75	1.46	1.48	1.44	1.47	1.45	1.37	1.39
11	0.75	1.47	1.49	1.46	1.48	1.46	1.38	1.40
12	0.75	1.50	1.52	1.48	1.51	1.49	1.40	1.42
13	0.75	1.51	1.53	1.49	1.52	1.50	1.42	1.43
14	0.75	1.52	1.55	1.51	1.54	1.52	1.43	1.45
15	0.75	1.41	1.44	1.54	1.36	1.40	1.26	1.33
16	0.75	1.57	1.59	1.56	1.59	1.56	1.47	1.49
17	0.75	1.58	1.60	1.57	1.60	1.58	1.48	1.50
18	0.75	1.60	1.62	1.59	1.62	1.59	1.50	1.52
19	0.75	1.60	1.62	1.59	1.62	1.59	1.50	1.52
20	0.75	1.61	1.63	1.60	1.63	1.60	1.50	1.52
21	0.75	1.59	1.61	1.58	1.60	1.58	1.49	1.51
22	0.75	1.44	1.47	1.57	1.35	1.41	1.29	1.36
23	0.71	1.48	1.50	1.46	1.47	1.45	1.38	1.40
24	0.64	1.28	1.30	1.23	1.34	1.30	1.22	1.22
25	0.56	1.11	1.13	1.10	1.11	1.10	1.04	1.05
26	0.49	0.87	0.88	0.86	0.86	0.86	0.81	0.82
27	0.41	0.68	0.70	0.69	0.66	0.66	0.64	0.65
28	0.34	0.54	0.55	0.55	0.51	0.52	0.50	0.51
29	0.59	0.89	0.91	0.90	0.85	0.85	0.83	0.84
<b>Gasto Total (m<sup>3</sup>/s)</b>		<b>35.84</b>	<b>36.39</b>	<b>35.67</b>	<b>35.36</b>	<b>35.18</b>	<b>33.25</b>	<b>33.77</b>
<b>Diferencia Relativa (%)</b>		<b>6.13</b>	<b>7.76</b>	<b>5.62</b>	<b>4.71</b>	<b>4.17</b>	<b>-1.52</b>	<b>Referencia</b>

## 5.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general, las metodologías utilizadas en la determinación del caudal tienen su base en estudios hechos en ríos con secciones irregulares y rugosidades y pendientes variantes. Sin embargo, el comportamiento de un flujo turbulento puede explicarse con los principios destacados en la sección 5.3, los cuales aplican al caso general de flujo sobre un fondo rugoso. Por lo tanto, en la práctica, las metodologías se extienden a canales prismáticos y con diferentes rugosidades.

Para el caso investigado, los métodos de puntos reducidos producen resultados que se alejan considerablemente (>5%) de los resultados obtenidos de los métodos más confiables basados en la extrapolación de perfiles de velocidad. Estas diferencias pueden tener una importancia grande en la práctica puesto que en la mayoría de las aplicaciones, se utilizan los métodos de puntos reducidos para estimar la velocidad media y caudal.

Las relaciones teóricas analizadas para la distribución de la velocidad comparan de modo satisfactorio en la estimación de la velocidad media y caudal, la cual valida el empleo de la relación exponencial como una ecuación alternativa para describir la distribución de la velocidad en la vertical. Un punto importante en el empleo de perfiles teóricos es la necesidad de lograr un ajuste adecuado con los datos de medición. Como ya se había mencionado (sección 5.5), puede presentarse que el perfil teórico no coincide con los datos de aforo en la profundidad completa del canal. Además, en casos de flujo de alta turbulencia, la distribución de los datos es tal que dificulta la aplicación de un perfil teórico. Por lo tanto, se recomienda emplear estas metodologías cuando se cuenta con un número grande de mediciones en puntos uniformemente distribuidos entre el fondo del canal y la superficie del agua.

---

**Capítulo****6****CONCLUSIÓN GENERAL**

En este trabajo se examinaron aspectos específicos de la medición del tirante y velocidad mediante análisis comparativos con base en datos experimentales obtenidos de mediciones realizadas en el laboratorio y campo. Para facilitar las comparaciones, se eligió una referencia en cada caso tomando en cuenta factores como la confiabilidad, precisión y experiencia relacionada con el uso de los métodos y técnicas considerados. Se hicieron las siguientes aportaciones con respecto al tema de aforo de canales:

**Medición del tirante con transductores de presión sumergibles:** se estableció el limnómetro como la técnica de referencia en este análisis. Se comprobó que un sensor de presión sumergible es capaz de medir el tirante con una precisión de  $\pm 2$  mm. Sin embargo, en condiciones de campo, se pueden presentar cambios graduales en la calibración de esos dispositivos de tal manera que pierdan su precisión y por lo tanto, se requiere una calibración rutinaria.

**Medición del tirante con medidores ultrasónicos de nivel:** el medidor de 3MHz es capaz de medir el tirante con una precisión  $\approx \pm 3$  mm, y para tirantes constantes como variables proporciona lecturas congruentes a las de un transductor de presión sumergible. Ahora bien, el medidor de 1.5 MHz muestra un rango de incertidumbre mayor que el de 3MHz, y para tirantes menores a 0.4 m las discrepancias entre lecturas obtenidas de los medidores son mayores de  $\approx \pm 5$  mm.

**Corrección de la profundidad del molinete:** se obtuvieron resultados satisfactorios para la evaluación del error en la medición de la profundidad aplicando los métodos empíricos de las normas ISO 748 e ISO/TR 9209. La importancia de la corrección a la profundidad fue evaluada en el contexto del error introducido en el caudal. Se determina que este error sistemático fue del orden de 5% para los caudales y tirantes utilizados en esta investigación.

**Estimación de la velocidad media:** se determinaron perfiles de velocidad a partir de relaciones teóricas con base en la relación exponencial y la ley logarítmica. Para los datos analizados esas relaciones estiman la velocidad media de manera similar. Además, para determinar la velocidad media, se observó que los métodos de puntos reducidos promocionaron resultados no congruentes con el método de integración. En general las diferencias entre las velocidades obtenidas de esos métodos fueron mayores que 6%.

Los comentarios anteriores son basados en estudios realizados bajo condiciones específicas de prueba y ciertas técnicas o equipos de medición. Para hacer extensivo los resultados obtenidos en este trabajo, es necesario generar escenarios nuevos, así como el uso de más técnicas o equipos, con lo cual se tendrá un panorama más extenso de los métodos, técnicas y procedimientos que se deben aplicar en la determinación del caudal en canales y ríos.

## Referencias Bibliográficas

---

1. Buchanan, T.J., Somers, W.P., (1982), *Stage Measurement at Gaging Stations, Chapter A7, Book 3, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey Series*, United States Government Printing Office, Washington, DC, EEUU. 28 pp.
2. Chow, V.T, (1959), *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, Kogakusha, Japón. 680 pp.
3. Fair, G., Geyer, J., Okun, D., (1996), *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*, Editorial Limusa, S.A. DE C.V Grupo Noriega Editores, Distrito Federal, México 764 pp.
4. Freeman, L.A., Carpenter, M.A., Roseberry, D.O., Rousseau, J.P., Unger,R., Mclean, J.S., (2004), *Use of Submersible Pressure Transducers in Water-Resources Investigations*, Chapter A-Section A Book 8, U.S Geological Survey, Reston Virginia. 52 pp.
5. French R., (1992), *Hidráulica de canales abiertos*, MacGraw-Hill Inc., D.F, México. 724 pp.
6. Grant D.M., Dawson B.D. (2001). *ISCO open channel flow measurement handbook*. ISCO (ed.), Lincoln (Nebraska), EEUU. pp. 1 - 37.
7. González, Juan A., Melching, Charles S., Oberg, Kevin A., (1996), *Análisis of Open-Channel Velocity Measurements Collected with an Acoustic Doppler Current Profiler*, Artículo presentado en primer congreso Internacional sobre nuevos/emergente conceptos de ríos, organizado por la Asociación Internacional de Recursos de Agua, Septiembre 22-26, 1996, Chicago, Illinois, USA. 12 pp.  
Se puede consultar en el siguiente sitio del Internet:  
<http://hydroacoustics.usgs.gov/publications/rivtech.pdf>.
8. ISO. 1983b. *Liquid flow measurement in open channels – Direct depth sounding and suspension equipment (ISO 3454: 1983 (E)*, International Organization for Standardization (ISO), Genève, 4 pp.
9. ISO. 1985a. *Liquid flow measurement in open channels- Velocity-area methods- Collection and processing of data for determination of errors in measurement (ISO 1088-1985 (E))*, International Organization for Standardization (ISO), Genève, 20 pp.

10. ISO. 1989a. *Measurement of liquid flow in open channels- Determination of the wetline correction (ISO/TR 9209: 1989 (E))*, International Organization for Standardization (ISO), Genève, 8 pp.
11. ISO. 1995b. *Measurement of liquid flow in open channels - Water-level measuring devices (ISO 4373: 1995(E))*. International Organization for Standardization (ISO), Genève., 23 pp.
12. ISO. 1996a. *Measurement of liquid flow in open channels- Establishment and operation of gauging station (ISO 1100-1:1996 (E))*, International Organization for Standardization (ISO), Genève, 20 pp.
13. ISO. 1997b. *Measurement of liquid flow in open channels - Velocity-area methods (ISO 748: 1997 (E))*. International Organization for Standardization (ISO), Genève, 41 pp.
14. ISO. 1997c. *Measurement of liquid flow in open channels- General guidelines for selection of method (ISO/TR 8363:1997 (E))*, International Organization for Standardization (ISO), Genève, 7 pp.
15. ISO. 2004b. *Hydrometry-Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method (ISO 6416:2004(E))*, International Organization for Standardization (ISO), Genève, 50 pp.
16. Kennedy. A., Fragoza. F., Peña. E., Eduardo. J., (2000), *Manual de Aforos*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, 137 pp.
17. Nezu. I., Nakagawa, H., (1993) *Turbulence en Open-Channel Flows*, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 281 pp.
18. Panton, R., (1984), *Incompressible Flow*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 780 pp.
19. Pressure Systems, Inc., (2005), *WaterMonitor Submersible Datalogging Series 550 User's Manual*, Hampton, USA, 57 pp.
20. Rantz. S. E., 1982, *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*, Geological Survey Water-Supply Paper 2175 (WSP 2175), United States Government Printing Office, Washington, EEUU, pp. 1 - 284.

21. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, *Ley de Aguas Nacionales, artículo 7, fracción III*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, 2004, pp. 1 - 97.
22. SonTek/YSI, Inc., (2005), *Argonaut-SL System Manual Firmware Version 11.0*, SonTek/YSI Inc., San Diego, 218 pp.
23. Sotelo Ávila G., (2002), *Hidráulica de canales*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F México, 836 pp.
24. Tamari S., Aguilar A., Mejía V., Álvarez R., Ortega S., (2006), Instrumentación de la estación hidrométrica "Los Aldamas", Nuevo León. En: Gómez-Balandra M.A. et al. (ed.), *Anuario IMTA*, pp. 25 - 35.
25. U.S Department of Interior Bureau of Reclamation (1997), *Water Measurement Manual*, U.S. Government Printing Office, Washington, EEUU, 317 pp.
26. Wang, F., Huang, H., (2005), *Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler (HADCP) For Real-Time Open Channel Flow measurement: Flow calculation model and field validation*, Artículo presentado en el Congreso XXXI IAHR, September 11-16, Seoul, Korea, 8 pp.  
Se puede consultar en el siguiente sitio de Internet: [http://www.hydroacousticsoft.com/Application\\_Q-Monitor.pdf](http://www.hydroacousticsoft.com/Application_Q-Monitor.pdf).
27. White. F., (1991), *Vicous Fluid Flow*, Second edition, McGraw-Hill, Inc., San Francisco, 614 pp.

***Especificaciones de los dispositivos probados para medir el tirante (Capítulos 2 y 3)***

---

En este anexo se presentan especificaciones de los transductores de presión sumergibles KPSI y los medidores ultrasónicos de nivel probados (información obtenida de los manuales de los equipos).



## Submersible Datalogging Level Transducer

ISO-9001:2000 Certified

**KPSI™ Transducers**

**Series 550**

### FEATURES

- Stores up to 600,000 Measurements (Level, Temperature, and Time Stamp)
- Level Ranges to 700 feet (210 m) H<sub>2</sub>O
- Accuracy of ±0.05% FS Total Error Band
- Networkable RS-485 Interface
- Small Diameter 316 SS Construction
- On-board Surge Protection
- Quick-Disconnect Cable Attachment
- Field-Replaceable Battery, 3 Year Life
- Wide Variety of Logging Modes
- On-board Temperature Measurement
- Field-Upgradeable Firmware



### APPLICATIONS

- |                   |                                    |                           |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------|
| ● Well Monitoring | ● Ground Water Monitoring          | ● Open Channel Monitoring |
| ● Down Hole       | ● Lake, Stream, & Reservoir Levels | ● Water Shed Management   |

The Series 550 waterMONITOR represents the leading edge of level sensing technology available today. The waterMONITOR is a submersible hydrostatic level transducer with embedded datalogging offering the highest level of functionality and accuracy available. The transducer meets the demanding requirements of the USGS Office of Surface Water (OSW) accuracy specification for stage monitoring.

The waterMONITOR combines a highly accurate pressure sensor assembly with power conservative microcomputer circuitry. An internal battery powers the electronics providing years of datalogging using linear, linear averaging, event triggered, and logarithmic sampling modes. The battery is easily field-replaceable via an innovative quick-disconnect cable assembly.

The waterMONITOR firmware can be upgraded in the field as new features and capabilities are released. The waterMONITOR features a networkable RS-485 communications interface utilizing the SDI-12 protocol. The unit is supplied with sophisticated yet easy to use applications software for use with a laptop or desktop computer to facilitate the following functionality.

- |                                      |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| ● Logging set-up and initialization  | ● Extraction of logged data |
| ● Tabular and graphical data display | ● Real time data sampling   |

Both the applications software as well as firmware upgrades are posted on Pressure Systems' website and available at no charge.

**Pressure Systems, Inc.**  
An Esterline Company  
34 Research Drive  
Hampton, VA 23666  
USA  
Phone: (757) 865-1243  
Toll Free: 800-328-3665  
Fax: (757) 865-8744  
E-mail: sales@PressureSystems.com

**Order On-line!**  
Web: [PressureSystems.com](http://PressureSystems.com)  
Updates: [PressureSystems.com/updates.html](http://PressureSystems.com/updates.html)  
E-commerce: [LEVELandPRESSURE.com](http://LEVELandPRESSURE.com)

**PSI Ltd.**  
124, Victoria Road  
Farnborough, Hants  
GU14 7PW  
United Kingdom  
Phone: +44 1252 510000  
Fax: +44 1252 510099  
E-mail: psi@WestonAero.com

## Series 550

## Specifications

Specifications subject to change without notice.

Parameter	550	551	Units	Comments
<b>LEVEL RANGES</b>				
Full Scale Level Ranges <sup>3</sup>	10, 35, 50, 70, 230, 692 (3, 10, 15, 21, 70, 211)		ft H <sub>2</sub> O (m H <sub>2</sub> O)	
Proof Pressure	1.5		x FS	
Burst Pressure	2.0		x FS	
<b>MEASUREMENT ACCURACY</b>				
Level	±0.05 ±0.10  ±0.01 ±0.1		%FS TEB <sup>1</sup> %FS TEB <sup>1</sup>  ft H <sub>2</sub> O % of reading	<b>Standard</b> for level ranges > 10 ft (3m) H <sub>2</sub> O for level ranges ≤ 10 ft (3m) H <sub>2</sub> O  <b>USGS OSW compliant</b> when reading ≤ 10 ft (3m) H <sub>2</sub> O when reading > 10 ft (3m) H <sub>2</sub> O
Temperature	±1.0	±0.2	°C	
<b>DATA LOGGING SPECIFICATIONS</b>				
Modes of Sampling	Linear, Linear Avg, Event, Logarithmic			software selectable
Pressure Units Available	psi, ft H <sub>2</sub> O, mm H <sub>2</sub> O, cm H <sub>2</sub> O, m H <sub>2</sub> O, kPa			user-specified also available by entering slope and offset.
Sampling Rate <sup>2</sup>	Programmable, 15 readings per second max			
Internal Non Volatile Memory	2	4	Mbyte	
Maximum Pressure Scans	196,560	393,120		Pressure with Time-Stamp
Maximum Pressure and Temperature Scans	144,144	288,288		Pressure and Temperature with Time-Stamp
Time-Stamp Accuracy	±2		min/year	over the compensated temp range
Data Upload Time	100		scans/sec	(Pressure and Temperature with Time-Stamp) per second @ 19200 baud
<b>ENVIRONMENTAL</b>				
Wetted Material	316 Stainless Steel; Viton®			Viton® is a registered trademark of DuPont.
Compensated Temp Range	-10 to 40		°C	
Operating Temp Range	-20 to 50		°C	
Non Submerged Storage Temp	-40 to 80 -20 to 50		°C °C	without batteries with batteries

## Notes:

- 1 Total Error Band (TEB) includes the combined errors due to nonlinearity, hysteresis, nonrepeatability, and thermal effects over the compensated temperature range per ISA S51.1.
- 2 For sampling rates greater than 3 Hz, the pressure/temperature averaging must be reduced as required.
- 3 Intermediate level ranges are available between 10 ft (3m) and 692 ft (211 m) H<sub>2</sub>O.

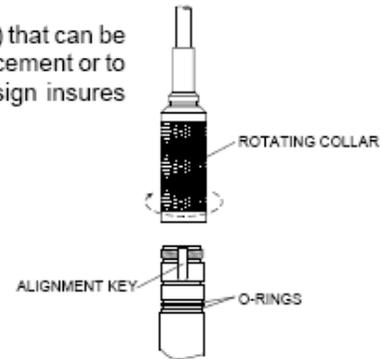
## Series 550

## Accessories

### Submersible Quick-Disconnect Cable Assembly

The waterMONITOR employs a submersible cable assembly (Model 850) that can be easily disconnected from the transducer to facilitate internal battery replacement or to alter cable length for deployment. The innovative quick-disconnect design insures trouble-free operation through:

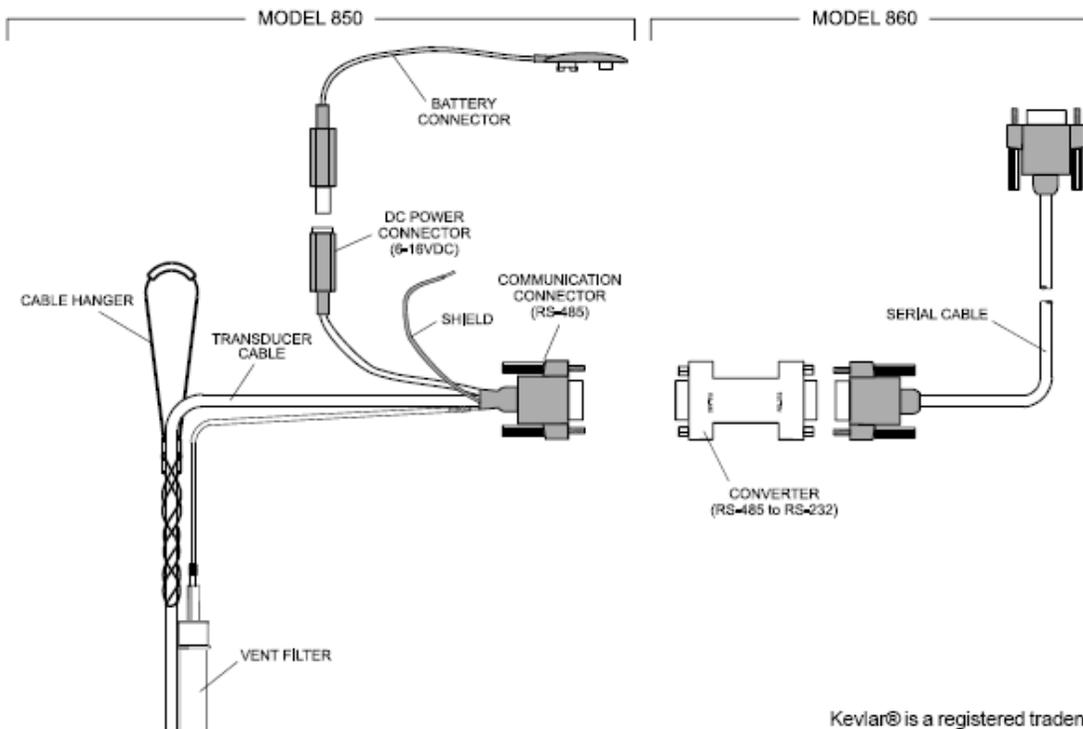
- Robust electrical connection impervious to vibration
- Failsafe key alignment ensuring mistake free connection
- Free-turning knurled collar for simple removal
- Redundant o-ring design for reliable seal



The cable incorporates a polyurethane-jacket incorporating Kevlar® strength members to prevent errors due to cable elongation, and a water block liner to prevent water intrusion due to minor cuts to the cable. Cable length is determined from the cable end of the transducer and any length 5 feet or more may be ordered.

The Model 850 cable assembly comes installation-ready with:

- Vent filter for moisture protection of the cable vent tube
- Cable hanger for transducer suspension
- DC power connector with detachable battery connection for external supply input
- RS-485 communication connector (shown with Model 860 optional converter and serial cable)
- Drain wire for cable shield grounding



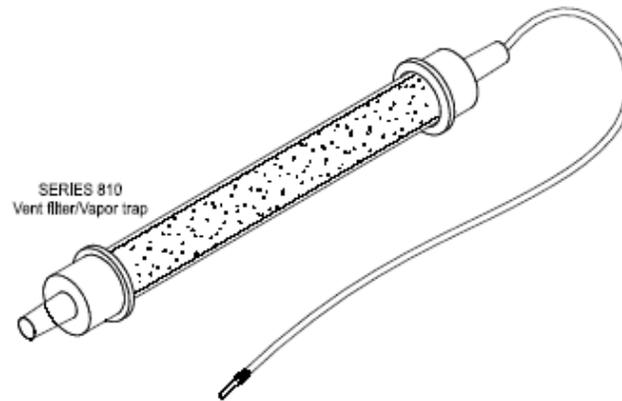
Kevlar® is a registered trademark of DuPont.

## Series 550

## Accessories

### Moisture Protection

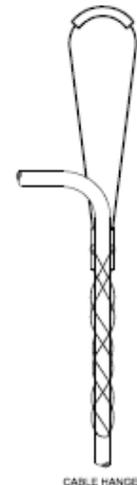
Our submersible transducers are equipped with custom, vented cable. The vent provides an atmospheric reference for the sensor, which is necessary for ensuring the highest possible accuracy when making a level measurement. It must be noted that if left unprotected, it provides a pathway for water vapor to enter the level transducer. The vapor will condense into water and could create an offset in the transducer output, or cause permanent damage. For these reasons, a Series 810 desiccant-filled vent filter is provided free of charge with each Model 850 we ship. These filters must be periodically replaced as the desiccant becomes spent, which is apparent by a change in desiccant color from blue to pink. Replacement filters are available from the factory.



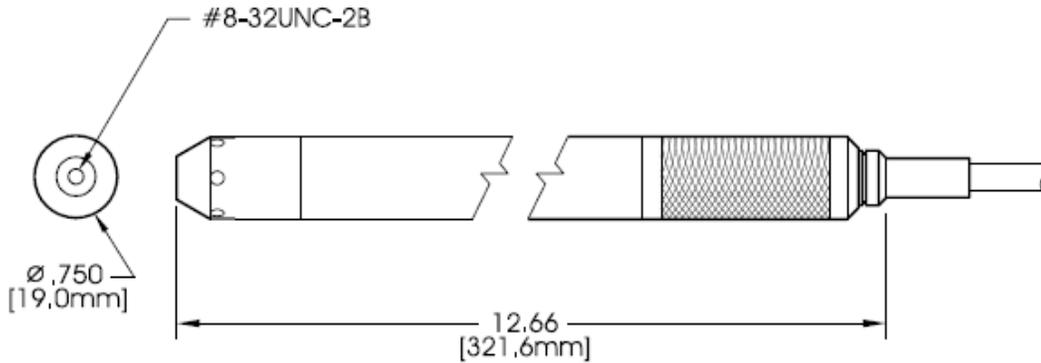
### Installation Tips

When suspending the cable, use our cable hanger (PN# 12-90-0931) supplied with the cable assembly. The cable hanger can be positioned anywhere on the cable by pushing the ends together. Once positioned, the cable hanger contracts to provide a snug grip.

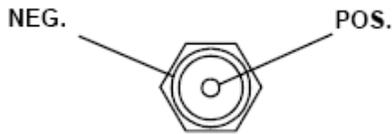
**Note:** In all installations, care should be taken to ensure no damage occurs to the cable. Cable damage represents one of the most frequent causes of transducer failure.



# Series 550 Technical Data

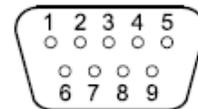


**Series 550 Transducer**

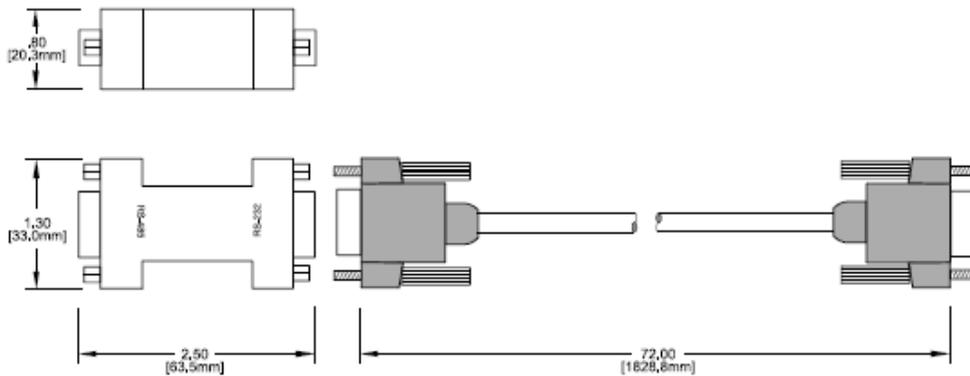


**DC Power Connector**

PIN #	SIGNAL
2	RS-485A
3	RS-485B
4	GND

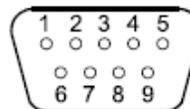


**RS-485 Connector**



**Model 860 RS-485 to RS-232 Converter with Serial Cable**

PIN #	SIGNAL	PIN #	SIGNAL
1	DCD	6	DSR
2	RD	7	RTS
3	TD	8	CTS
4	DTR	9	RI
5	GND		



**RS-232 Connector**

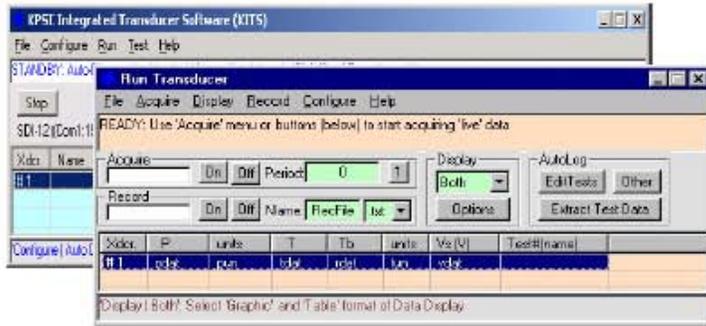


# Series 550 Software

Our easy-to-use **KITS** software is the key to operating your Series 550 waterMONITOR transducer. This software is distributed free of charge to all our transducer users.

With **KITS**, you can:

- Run and monitor from one to sixteen transducers, communicating over a serial interface (or multi-drop network).
- Operate your waterMONITOR transducer without having to write any custom software or know any of the low-level transducer commands.
- Collect and display data in real-time or at a future time with simple keystrokes.
- View both table and graphical data simultaneously.
- Easily export data to a spreadsheet, such as Excel®.
- Download the latest **KITS** version from our website, [www.PressureSystems.com/KPSI\\_software.html](http://www.PressureSystems.com/KPSI_software.html)

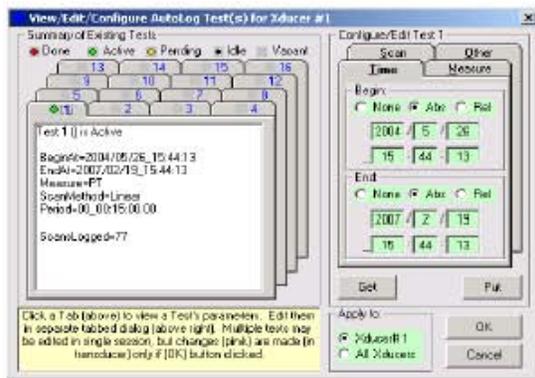


The **KITS** opening form is "home" to all waterMONITOR configuration functions. This form and its companion **Run** form are all you need for obtaining waterMONITOR data. Use "Auto Disc." on the "home" form to automatically find and communicate with any waterMONITOR transducer on your network.

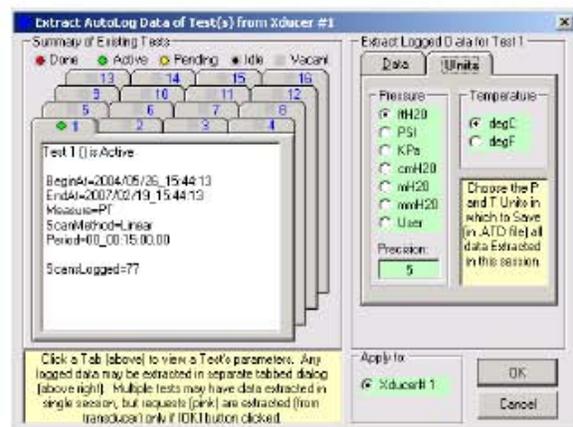
Use default configurations or define your own site net parameters and use the **Run** form to run each individual transducer or the collection of all selected transducers for acquisition of both "live" and "AutoLog" data. Real-time data may be displayed both numerically and graphically, as well as logged to a file on your computer's hard disk.



Using "AutoLog," create up to sixteen independent logging profiles for downloading to your transducer(s).



Extract logged test data from any or all of the sixteen tests and automatically create data files for viewing or graphing.



SonTek/YSI, Inc.

**Table 3-1. Summary of Argonaut-SL Specifications**

Specification	Details																
Water velocity	Range: $\pm 6$ m/s (19.5 ft/s) Resolution: 0.1 cm/s (0.003 ft/s) Accuracy: $\pm 1\%$ of measured velocity, $\pm 0.5$ cm/s (0.015 ft/s)																
Sampling volume size (user programmable)	500 kHz: 1.5 to 120 m (5.0 to 390 ft) 1500 kHz: 0.5 to 20 m (1.6 to 65.0 ft) 3000 kHz: 0.2 to 5 m (0.7 to 16.0 ft)																
Water level measurement (vertical beam)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>500 kHz</th> <th>1500 kHz</th> <th>3000 kHz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min. depth</td> <td>0.4 m (1.3 ft)</td> <td>0.25 m (0.80 ft)</td> <td>0.10 m (0.3 ft)</td> </tr> <tr> <td>Max. depth</td> <td>18.0 m (59.0 ft)</td> <td>10.0 m (33.0 ft)</td> <td>5.0 m (16.0 ft)</td> </tr> <tr> <td>Accuracy</td> <td><math>\pm 0.1\%</math>, <math>\pm 0.6</math> cm</td> <td><math>\pm 0.1\%</math>, <math>\pm 0.3</math> cm</td> <td><math>\pm 0.1\%</math>, <math>\pm 0.3</math> cm</td> </tr> </tbody> </table>		500 kHz	1500 kHz	3000 kHz	Min. depth	0.4 m (1.3 ft)	0.25 m (0.80 ft)	0.10 m (0.3 ft)	Max. depth	18.0 m (59.0 ft)	10.0 m (33.0 ft)	5.0 m (16.0 ft)	Accuracy	$\pm 0.1\%$ , $\pm 0.6$ cm	$\pm 0.1\%$ , $\pm 0.3$ cm	$\pm 0.1\%$ , $\pm 0.3$ cm
	500 kHz	1500 kHz	3000 kHz														
Min. depth	0.4 m (1.3 ft)	0.25 m (0.80 ft)	0.10 m (0.3 ft)														
Max. depth	18.0 m (59.0 ft)	10.0 m (33.0 ft)	5.0 m (16.0 ft)														
Accuracy	$\pm 0.1\%$ , $\pm 0.6$ cm	$\pm 0.1\%$ , $\pm 0.3$ cm	$\pm 0.1\%$ , $\pm 0.3$ cm														
Physical parameters	<p>Dimensions:</p> <p>500 kHz: 33.2 cm (13.1 in) x 17.8 cm (7.0 in) x 12.4 cm (4.9 in) 1500 &amp; 3000 kHz: 15.2 cm (6 in) diameter x 18.0 cm (7.1 in) length</p> <p>Weight:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>500 kHz</th> <th>1500 &amp; 3000 kHz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>In air:</td> <td>6.3 kg (14.0 lb)</td> <td>2.5 kg (5.5 lb)</td> </tr> <tr> <td>In water:</td> <td>1.8 kg (4.0 lb)</td> <td>-0.3 kg (-0.7 lb)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pressure rating:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>500 kHz</th> <th>1500 &amp; 3000 kHz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>30 m (100 ft)</td> <td>200 m (650 ft)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Operating temperature: <math>-5^{\circ}\text{C}</math> to <math>40^{\circ}\text{C}</math> (<math>23^{\circ}\text{F}</math> to <math>104^{\circ}\text{F}</math>) Storage temperature: <math>-10^{\circ}\text{C}</math> to <math>50^{\circ}\text{C}</math> (<math>14^{\circ}\text{F}</math> to <math>122^{\circ}\text{F}</math>)</p>		500 kHz	1500 & 3000 kHz	In air:	6.3 kg (14.0 lb)	2.5 kg (5.5 lb)	In water:	1.8 kg (4.0 lb)	-0.3 kg (-0.7 lb)		500 kHz	1500 & 3000 kHz		30 m (100 ft)	200 m (650 ft)	
	500 kHz	1500 & 3000 kHz															
In air:	6.3 kg (14.0 lb)	2.5 kg (5.5 lb)															
In water:	1.8 kg (4.0 lb)	-0.3 kg (-0.7 lb)															
	500 kHz	1500 & 3000 kHz															
	30 m (100 ft)	200 m (650 ft)															
Power requirements	<p>Input power: 7-15 VDC</p> <p>Power consumption:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 500 kHz: 1.0-1.3 W</li> <li>▪ 1500 kHz: 0.7-1.3 W</li> <li>▪ 3000 kHz: 0.7-1.3 W</li> </ul>																
Temperature sensor	Resolution: $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ Accuracy: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$																
Recorder size	4 MB (over 50,000 samples)																
Pressure sensor (option)	Strain gauge: 0.25% accuracy																
Communication protocols	RS-232 and SDI-12 standard; RS-422 optional																
Multi-cell profiling (option)	10 cells (in addition to the single, horizontally-integrated cell)																
Analog outputs (option)	<p>Available output types (only one type can be used for a deployment, but two modules can be used per system):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 4-20 mA</li> <li>▪ 0-5 VDC</li> </ul> <p>Available output parameters (one module required for each parameter; maximum of two output modules per system):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ X velocity</li> <li>▪ Y velocity</li> <li>▪ Velocity magnitude</li> <li>▪ Temperature</li> <li>▪ Pressure</li> <li>▪ Average SNR (signal-to-noise ratio)</li> <li>▪ Water level</li> <li>▪ Flow</li> <li>▪ Volume</li> <li>▪ Cell end location</li> </ul>																

SonTek/YSI, Inc.



Figure 5-13. 500-kHz Argonaut-SL with Standard Equipment



Figure 5-14. 1500 or 3000-kHz Argonaut-SL with Standard Equipment

### Soluciones empíricas para la corrección de la línea mojada

En este anexo se presentan las soluciones empíricas de las normas ISO 748-1997 y ISO/TR-1989. Esas soluciones han sido publicadas en tablas que proporcionan el valor que se debe restar de la profundidad medida del molinete. Las variables que se necesitan para consultar las tablas son las siguientes:

- El ángulo ( $\theta$ ) de desviación, entre el cable de suspensión y la vertical. La metodología para determinar este ángulo esta explicada en la sección 4.2.1.
- La longitud ( $L_H$ ) de la parte del cable que se encuentra sumergida en el agua a la cual se denomina el término línea mojada. Se puede aplicar el procedimiento ilustrado en la figura B-1 que se muestra a continuación.
- En el caso del método de la ISO/TR 9209-1989 se necesita determinar el valor del parámetro impulsivo  $\beta$  para la cual se utiliza la ecuación 4.10.

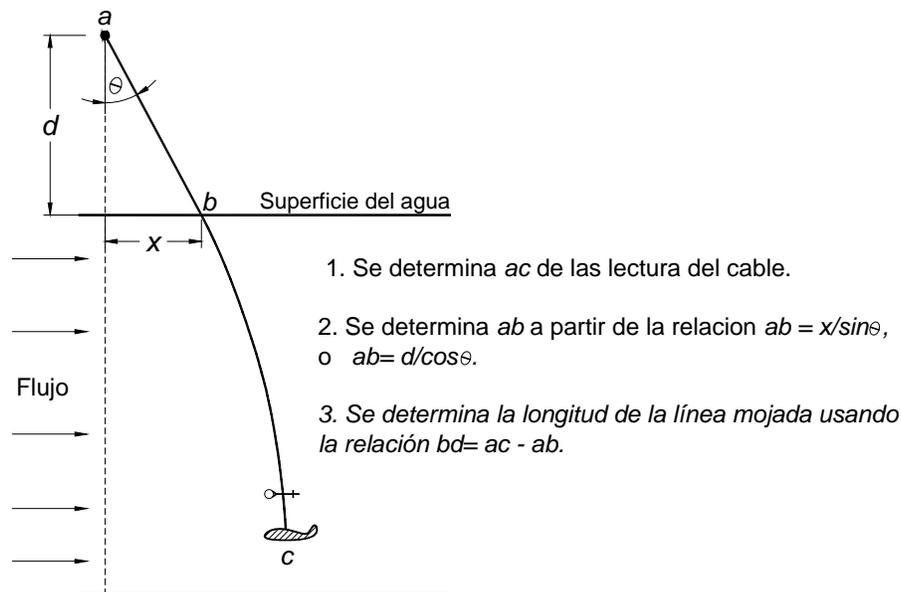


Figura B- 1: Determinación de la longitud de la línea mojada

---

**Método de la ISO 748-1997**

*Tabla B- 1: Corrección en el aire para diversos ángulos  
(Tabla C.1, Página 31, Anexo C, ISO 748-1997)*

<b>Ángulo Vertical</b>	<b>Corrección %</b>	<b>Ángulo Vertical</b>	<b>Corrección %</b>
4°	0.24	16°	5.15
6°	0.55	18°	6.42
8°	0.98	20°	7.85
10°	1.54	22°	9.46
12°	2.23	24°	11.26
14°	3.06	26°	13.26
16°	4.03	28°	15.47

*Tabla B- 2: Corrección a la línea mojada para diversos ángulos  
(Tabla C.2, Página 32, Anexo C, ISO 748-1997)*

<b>Ángulo Vertical</b>	<b>Corrección %</b>	<b>Ángulo Vertical</b>	<b>Corrección %</b>
4°	0.06	16°	1.64
6°	0.16	18°	2.04
8°	0.32	20°	2.48
10°	0.50	22°	2.96
12°	0.72	24°	3.50
14°	0.98	26°	4.08
16°	1.28	28°	4.72

---

**Método de la ISO/TR 9209-1989**


---

Tabla B- 3: Corrección de la línea mojada en m para diferentes ángulos con la vertical y longitudes de la línea mojada y aplicable a valores de  $\beta$  entre 1 y 2

(Tabla 4, Página 6, ISO 9209-1989)

Valores en metros

**Corrección de Línea Sumergida,  $\Delta W$ , para  $\beta= 1$  a 2**

Longitud de Línea Sumergida, $L_H$ (m)	Ángulo Oblicuo, $\theta$													
	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°
1	0	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07
2	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.1	0.12
3	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16
4	0	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.1	0.13	0.15	0.18	0.21
5	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.1	0.13	0.15	0.18	0.21	0.25
6	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.1	0.13	0.15	0.18	0.21	0.25	0.29
7	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.14	0.17	0.21	0.25	0.29	0.34
8	0.01	0.02	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.13	0.16	0.19	0.23	0.28	0.32	0.38
9	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.11	0.14	0.18	0.22	0.26	0.31	0.36	0.42
10	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.12	0.16	0.19	0.24	0.29	0.34	0.4	0.46
11	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.1	0.13	0.17	0.21	0.26	0.3	0.37	0.44	0.51
12	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.11	0.14	0.18	0.23	0.28	0.34	0.4	0.47	0.55
13	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.12	0.16	0.2	0.25	0.3	0.36	0.43	0.51	0.59
14	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.13	0.17	0.21	0.27	0.33	0.39	0.46	0.54	0.63
15	0.01	0.02	0.04	0.07	0.1	0.14	0.18	0.23	0.28	0.35	0.42	0.5	0.58	0.68
16	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.14	0.19	0.24	0.3	0.37	0.44	0.53	0.62	0.72
17	0.01	0.03	0.05	0.08	0.11	0.15	0.2	0.26	0.32	0.39	0.47	0.56	0.65	0.76
18	0.01	0.03	0.05	0.08	0.12	0.16	0.21	0.27	0.34	0.41	0.5	0.59	0.69	0.81
19	0.01	0.03	0.05	0.09	0.12	0.17	0.22	0.29	0.35	0.43	0.52	0.62	0.73	0.85
20	0.02	0.03	0.06	0.09	0.13	0.18	0.23	0.3	0.37	0.46	0.55	0.65	0.76	0.89
21	0.02	0.03	0.06	0.09	0.14	0.19	0.25	0.31	0.39	0.48	0.57	0.68	0.8	0.94
22	0.02	0.04	0.06	0.1	0.14	0.2	0.26	0.33	0.41	0.5	0.6	0.71	0.84	0.98
23	0.02	0.04	0.07	0.1	0.15	0.2	0.27	0.34	0.43	0.52	0.63	0.74	0.88	1.02
24	0.02	0.04	0.07	0.11	0.15	0.21	0.29	0.36	0.44	0.54	0.65	0.78	0.91	1.06
25	0.02	0.04	0.07	0.11	0.16	0.22	0.29	0.37	0.46	0.56	0.68	0.81	0.95	1.1
26	0.02	0.04	0.07	0.12	0.17	0.23	0.3	0.38	0.48	0.59	0.71	0.84	0.98	1.15
27	0.02	0.04	0.08	0.12	0.17	0.24	0.31	0.4	0.5	0.61	0.73	0.87	1.02	1.19
28	0.02	0.04	0.08	0.12	0.18	0.25	0.32	0.41	0.52	0.63	0.76	0.9	1.06	1.23
29	0.02	0.05	0.08	0.13	0.19	0.26	0.34	0.43	0.53	0.65	0.78	0.93	1.09	1.28
30	0.02	0.05	0.08	0.13	0.19	0.26	0.35	0.44	0.55	0.67	0.81	0.96	1.13	1.32

### Método de la ISO 9209-1989

Tabla B- 4: Corrección de la línea mojada en m para diferentes ángulos con la vertical y longitudes de la línea mojada y aplicable a valores de  $\beta$  entre 3 y 4

(Tabla 5, Página 7, ISO 9209-1989)

Valores en metros

#### Corrección de Línea Sumergida, $\Delta W$ , para $\beta = 3$ a 4

Longitud de Línea Sumergida, $L_H$	Ángulo Oblicuo, $\theta$													
	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°
1	0	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
2	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.1	0.11	0.14	0.16
3	0	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.11	0.13	0.15	0.18	0.2
4	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.11	0.13	0.15	0.18	0.22	0.25
5	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.15	0.18	0.22	0.26	0.3
6	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.14	0.17	0.21	0.25	0.29	0.34
7	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.13	0.16	0.2	0.24	0.28	0.33	0.39
8	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.09	0.11	0.14	0.18	0.22	0.26	0.31	0.37	0.43
9	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.12	0.16	0.2	0.24	0.29	0.34	0.4	0.47
10	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.1	0.14	0.17	0.21	0.26	0.32	0.37	0.44	0.51
11	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15	0.19	0.23	0.28	0.34	0.41	0.48	0.56
12	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.12	0.16	0.2	0.25	0.31	0.37	0.45	0.51	0.6
13	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.13	0.17	0.22	0.27	0.33	0.4	0.47	0.55	0.64
14	0.01	0.03	0.04	0.07	0.1	0.14	0.18	0.23	0.29	0.35	0.42	0.5	0.59	0.68
15	0.01	0.03	0.05	0.07	0.11	0.15	0.19	0.24	0.3	0.37	0.45	0.53	0.62	0.73
16	0.01	0.03	0.05	0.08	0.11	0.15	0.2	0.26	0.32	0.39	0.47	0.56	0.66	0.77
17	0.01	0.03	0.05	0.08	0.12	0.16	0.21	0.27	0.34	0.42	0.5	0.59	0.7	0.81
18	0.01	0.03	0.05	0.09	0.12	0.17	0.23	0.29	0.36	0.44	0.53	0.63	0.73	0.85
19	0.01	0.03	0.06	0.09	0.13	0.18	0.24	0.3	0.38	0.46	0.55	0.66	0.77	0.9
20	0.02	0.03	0.06	0.1	0.14	0.19	0.25	0.31	0.39	0.48	0.58	0.69	0.81	0.94
21	0.02	0.04	0.06	0.1	0.14	0.2	0.26	0.33	0.42	0.5	0.6	0.72	0.84	0.98
22	0.02	0.04	0.07	0.1	0.15	0.2	0.27	0.34	0.43	0.52	0.63	0.75	0.88	1.03
23	0.02	0.04	0.07	0.11	0.16	0.21	0.28	0.36	0.45	0.55	0.66	0.78	0.92	1.07
24	0.02	0.04	0.07	0.11	0.16	0.22	0.29	0.37	0.46	0.57	0.68	0.81	0.95	1.11
25	0.02	0.04	0.07	0.12	0.17	0.23	0.3	0.39	0.48	0.59	0.71	0.84	0.99	1.15
26	0.02	0.04	0.08	0.12	0.17	0.24	0.32	0.4	0.5	0.61	0.74	0.87	1.03	1.2
27	0.02	0.05	0.08	0.12	0.18	0.25	0.33	0.42	0.52	0.63	0.76	0.91	1.06	1.24
28	0.02	0.05	0.08	0.13	0.19	0.26	0.34	0.43	0.54	0.65	0.79	0.91	1.1	1.25
29	0.02	0.05	0.09	0.13	0.19	0.26	0.35	0.44	0.55	0.68	0.81	0.97	1.14	1.32
30	0.02	0.05	0.09	0.14	0.2	0.27	0.36	0.46	0.57	0.7	0.84	1	1.17	1.37

## Método de la ISO 9209-1989

Tabla B- 5: Corrección de la línea mojada en (m) para diferentes ángulos con la vertical y longitudes de la línea mojada y aplicable a valores de  $\beta=5$

(Tabla 5, Página 8, ISO 9209-1989)

### Corrección de Línea Sumergida, $\Delta W$ , para $\beta=5$

Longitud de Línea Sumergida, $L_H$	Ángulo Oblicuo, $\theta$													
	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°
1	0	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.07	0.08	0.09	0.1
2	0	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17
3	0	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.17	0.2	0.23
4	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.17	0.21	0.24	0.28
5	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.14	0.17	0.2	0.24	0.28	0.33
6	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.1	0.13	0.16	0.19	0.23	0.27	0.32	0.37
7	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.11	0.14	0.18	0.21	0.26	0.31	0.36	0.42
8	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.12	0.16	0.19	0.24	0.28	0.34	0.4	0.46
9	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07	0.1	0.13	0.17	0.21	0.26	0.31	0.37	0.43	0.51
10	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15	0.18	0.23	0.28	0.34	0.4	0.47	0.55
11	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.12	0.16	0.2	0.25	0.3	0.36	0.43	0.51	0.59
12	0.01	0.02	0.04	0.07	0.09	0.13	0.17	0.21	0.27	0.32	0.39	0.46	0.54	0.63
13	0.01	0.03	0.04	0.07	0.1	0.14	0.18	0.23	0.28	0.35	0.42	0.5	0.58	0.68
14	0.01	0.03	0.05	0.07	0.11	0.14	0.19	0.24	0.3	0.37	0.44	0.53	0.62	0.72
15	0.01	0.03	0.05	0.08	0.11	0.15	0.2	0.26	0.32	0.39	0.47	0.56	0.66	0.76
16	0.01	0.03	0.05	0.08	0.12	0.16	0.21	0.27	0.34	0.41	0.5	0.59	0.69	0.81
17	0.01	0.03	0.05	0.09	0.12	0.17	0.22	0.29	0.36	0.43	0.52	0.62	0.73	0.85
18	0.01	0.03	0.06	0.09	0.13	0.18	0.23	0.3	0.37	0.46	0.55	0.65	0.77	0.89
19	0.02	0.03	0.06	0.09	0.14	0.19	0.25	0.31	0.39	0.48	0.57	0.68	0.8	0.93
20	0.02	0.04	0.06	0.1	0.14	0.2	0.26	0.33	0.41	0.5	0.6	0.71	0.84	0.98
21	0.02	0.04	0.07	0.1	0.15	0.2	0.27	0.34	0.43	0.52	0.63	0.75	0.88	1.02
22	0.02	0.04	0.07	0.11	0.16	0.21	0.28	0.36	0.45	0.54	0.65	0.78	0.91	1.06
23	0.02	0.04	0.07	0.11	0.16	0.22	0.29	0.37	0.46	0.56	0.68	0.81	0.95	1.11
24	0.02	0.04	0.07	0.12	0.17	0.23	0.3	0.39	0.48	0.59	0.71	0.84	0.98	1.15
25	0.02	0.04	0.08	0.12	0.18	0.24	0.31	0.4	0.5	0.61	0.73	0.87	1.02	1.19
26	0.02	0.05	0.08	0.12	0.18	0.25	0.32	0.41	0.52	0.63	0.76	0.9	1.06	1.23
27	0.02	0.05	0.08	0.13	0.19	0.26	0.34	0.43	0.53	0.65	0.78	0.93	1.1	1.28
28	0.02	0.05	0.09	0.13	0.19	0.26	0.35	0.44	0.55	0.67	0.81	0.96	1.13	1.32
29	0.02	0.05	0.09	0.14	0.2	0.27	0.36	0.46	0.57	0.7	0.84	0.99	1.17	1.36
30	0.02	0.05	0.09	0.14	0.21	0.28	0.37	0.47	0.59	0.72	0.86	1.03	1.21	1.4

**Resultados elegidos del Capítulo 4: Corrección de la profundidad del molinete**

---

En este anexo se presentan resultados elegidos de los datos experimentales corregidos para el error en la profundidad del molinete. Los resultados están ilustrados en las formas siguientes:

**Gráficas de velocidad contra profundidad:** En esas graficas se ilustran la variación de la velocidad con profundidad en dovelas específicas de la sección transversal del canal. Se compararon los siguientes métodos para corregir la profundidad del molinete:

- a) Método de la ISO 748
- b) Método de la ISO/TR 9209
- c) Suposición de una inclinación constante en el cable
- d) Despreciar la corrección aplicable a la parte sumergida del cable de suspensión (solo considerar la corrección en el aire)

**Tablas de Análisis comparativo:** Como se mencionó en la sección 4.4, se eligió el método de la ISO 748 como un método de referencia en las comparaciones realizadas en este análisis. En las tablas presentadas en este anexo, se comparan las correcciones obtenidas empleando este método con los otros métodos evaluados. Además, se expresó la diferencia entre los resultados obtenidos como un porcentaje de la corrección obtenida del método de la ISO 748. Para simplificar la presentación de los resultados, solo se muestran valores medios correspondientes a rangos de ángulos con la vertical.

**Prueba No.1: (tirante=1.09m, caudal=9.3 m<sup>3</sup>/s)**

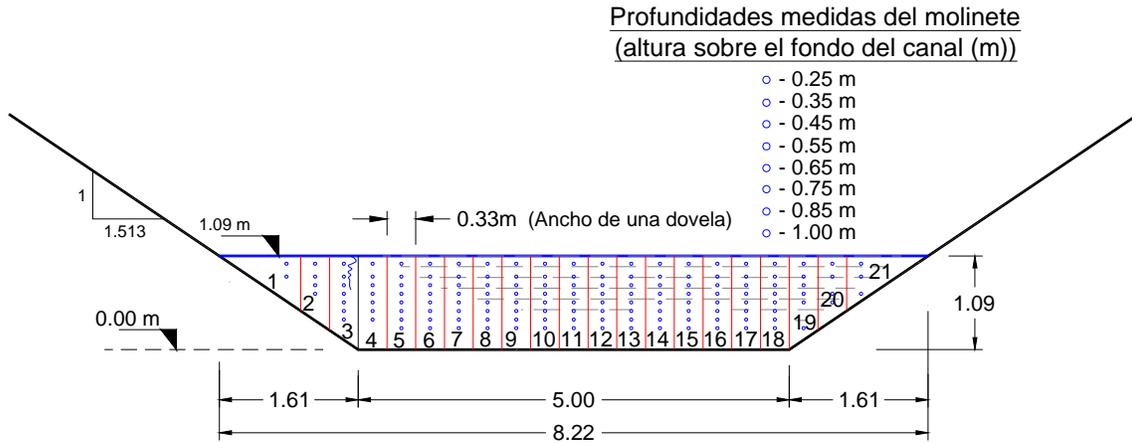
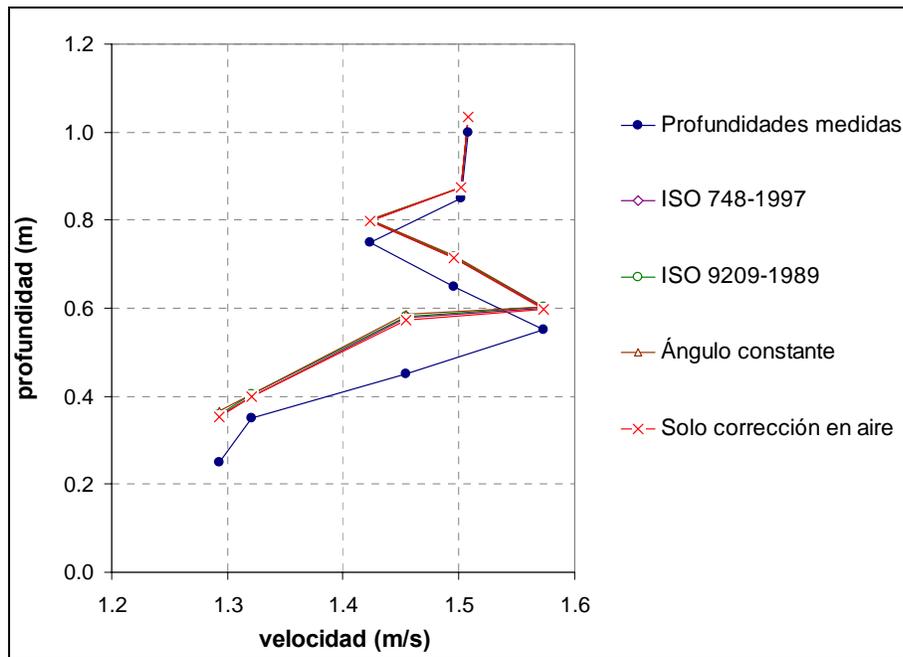
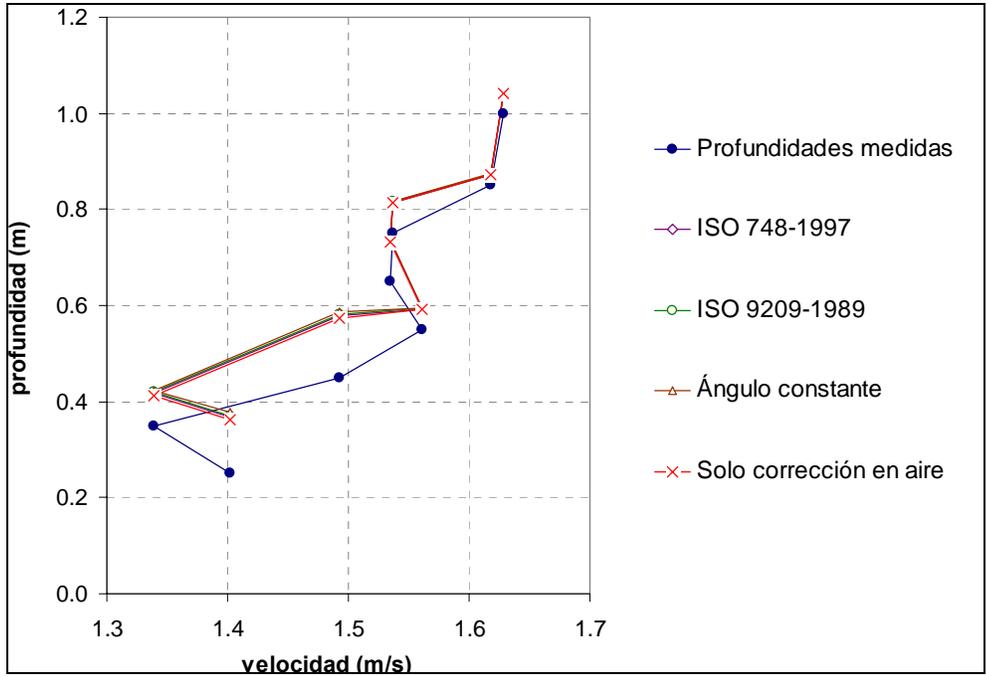


Figura C- 1: Distribución hipotética de los puntos de medición para la prueba No. 1

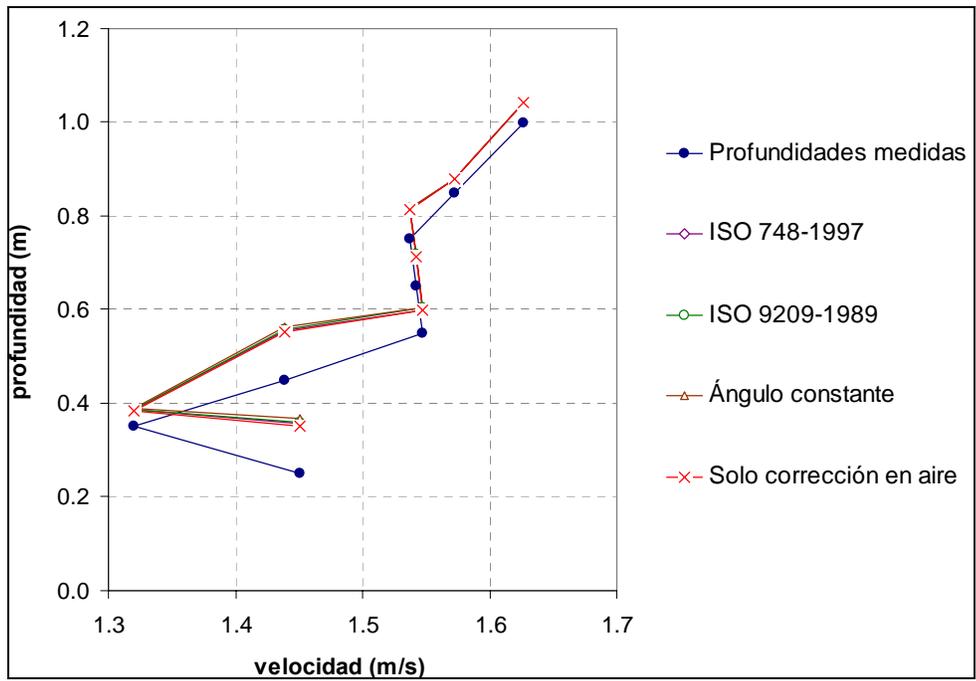
**Gráficas de datos corregidos**



Gráfica C- 1: Datos de aforo corregidos en la dovela No.6 utilizando diferentes métodos



Gráfica C- 2: Datos de aforo corregidos en la dovela No.11 utilizando diferentes métodos



Gráfica C- 3: Datos de aforo corregidos en la dovela No.17 utilizando diferentes métodos

### Análisis comparativo entre métodos para corregir la profundidad del molinete

Tabla C- 1: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos

Rango de Ángulo $\theta$ (°)	Corrección media determinada en la profundidad del molinete para diferentes rangos de ángulos con la vertical (m)			
	ISO 748-1997	ISO TR 9209-1989	Considerando solo corrección en el aire	Cable de inclinación constante
3° - 4°	0.009	0.009	0.009	0.010
4° - 5°	0.014	0.014	0.014	0.015
5° - 6°	0.022	0.021	0.021	0.023
6° - 7°	0.032	0.032	0.031	0.033
7° - 8°	0.042	0.043	0.041	0.044
8° - 9°	0.053	0.056	0.051	0.056
9° - 10°	0.069	0.071	0.067	0.072
10° - 11°	0.104	0.097	0.092	0.103
11° - 12°	0.104	0.097	0.092	0.103
12° - 13°	0.126	0.129	0.120	0.136
14° - 15°	0.157	0.162	0.152	0.166
15° - 16°	0.177	0.179	0.175	0.182

Tabla C- 2: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos

Rango de Ángulo $\theta$ (°)	Diferencia absoluta en (m) entre las correcciones obtenidas aplicando diferentes métodos y el método de la ISO 748-1997			
	ISO 748-1997	ISO TR 9209-1989	Considerando solo corrección en el aire	Ángulo constante
3° - 4°	Método de Ref.	0.000	0.000	0.001
4° - 5°	Método de Ref.	0.000	0.000	0.001
5° - 6°	Método de Ref.	0.000	0.000	0.001
6° - 7°	Método de Ref.	0.000	0.001	0.001
7° - 8°	Método de Ref.	0.001	0.001	0.002
8° - 9°	Método de Ref.	0.003	0.002	0.004
9° - 10°	Método de Ref.	0.002	0.002	0.003
10° - 11°	Método de Ref.	0.007	0.013	0.001
11° - 12°	Método de Ref.	0.007	0.013	0.001
12° - 13°	Método de Ref.	0.004	0.005	0.010
14° - 15°	Método de Ref.	0.006	0.005	0.010
15° - 16°	Método de Ref.	0.002	0.002	0.005
<b>Error medio para el rango completo de ángulos (3° - 15°)</b>		<b>0.003</b>	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>

**Prueba No. 2: (tirante=1.54m, caudal=16.8 m<sup>3</sup>/s)**

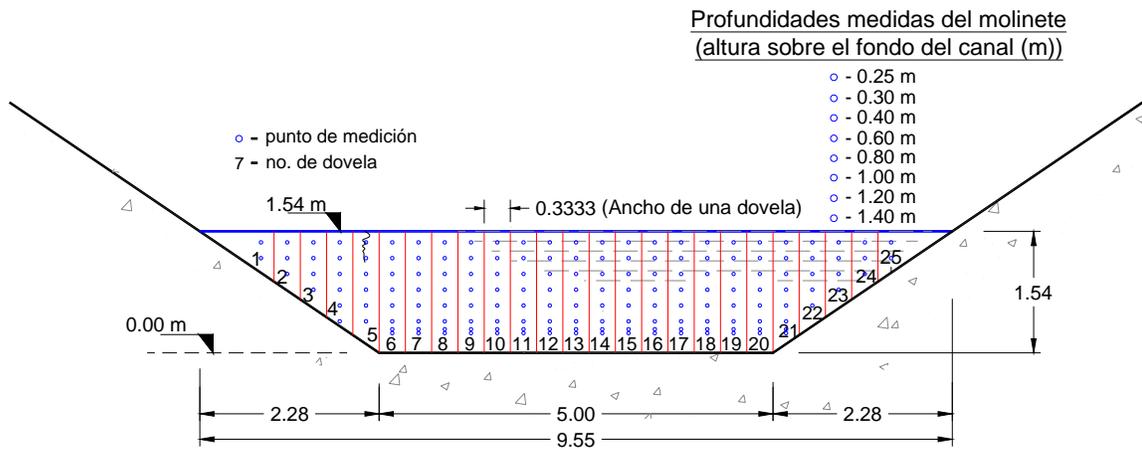
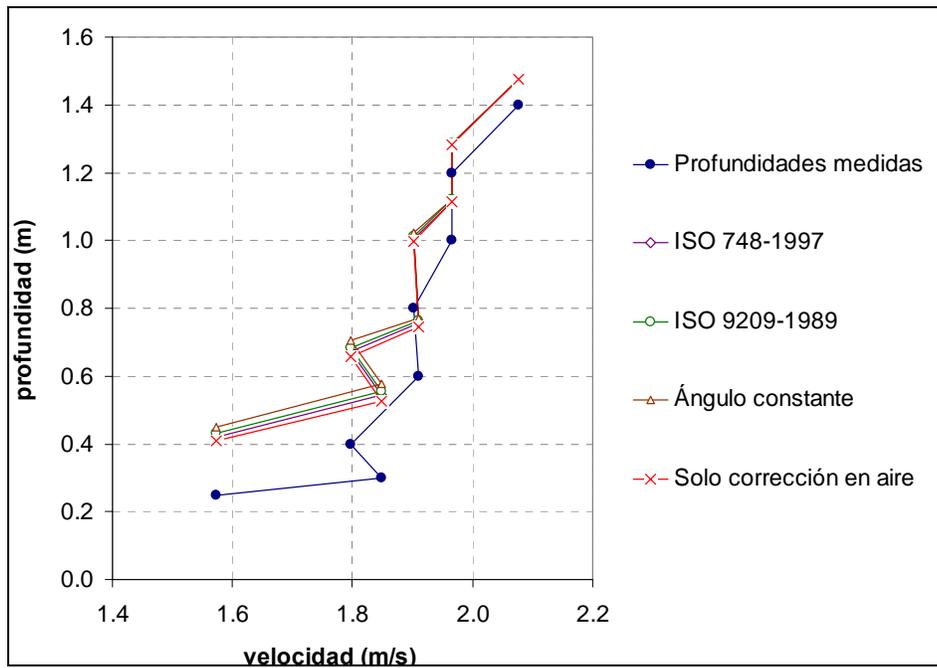
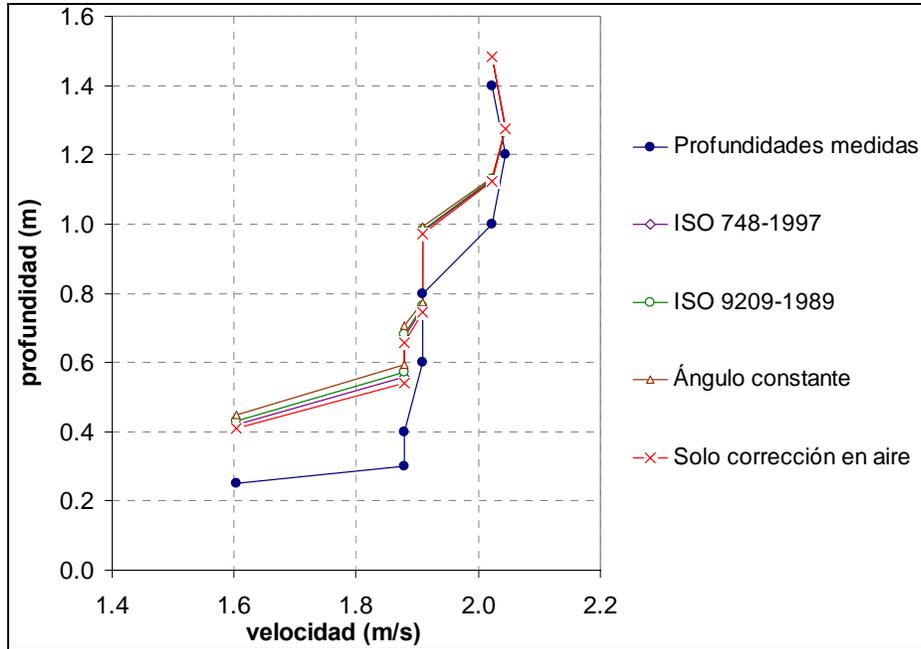


Figura C- 2: Distribución hipotética de los puntos de medición para la prueba No.2

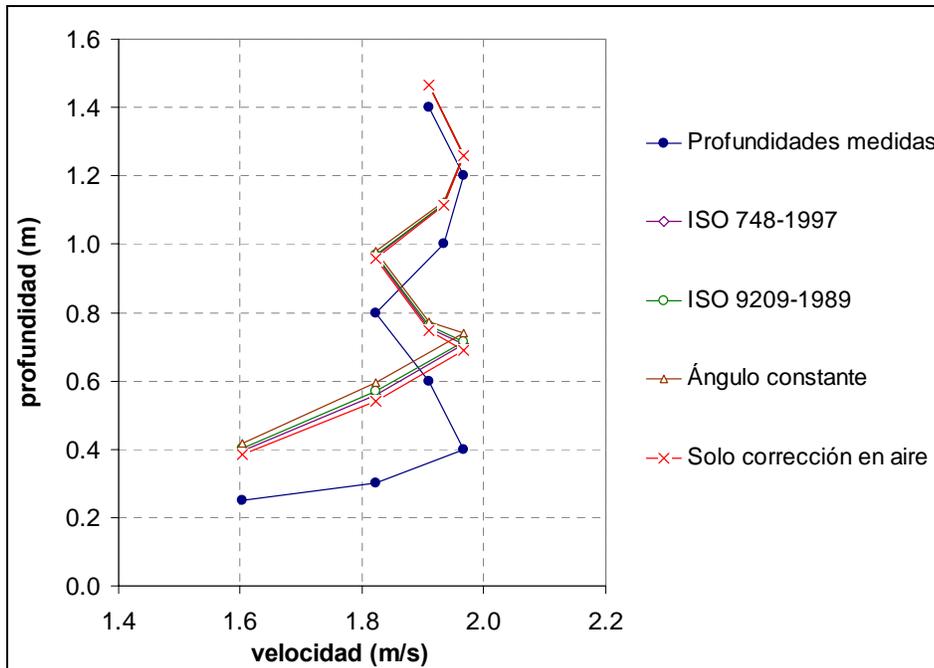
**Graficas de datos corregidos**



Gráfica C- 4: Datos de aforo corregidos en la dovela No.15 utilizando diferentes métodos



Gráfica C- 5: Datos de aforo corregidos en la dovela No.16 utilizando diferentes métodos



Gráfica C- 6: Datos de aforo corregidos en la dovela No.17 utilizando diferentes métodos

### Análisis comparativo entre métodos para corregir la profundidad del molinete

Tabla C- 3: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos

Rango de Ángulo $\theta$ (°)	Corrección media determinada en la profundidad del molinete para diferentes rangos de ángulos con la vertical (m)			
	ISO 748-1997	ISO TR 9209-1989	Considerando solo corrección en el aire	Cable de inclinación constante
9° - 10°	0.064	0.066	0.062	0.067
10° - 11°	0.075	0.075	0.074	0.077
11° - 12°	0.086	0.097	0.084	0.091
12° - 13°	0.111	0.114	0.107	0.120
13° - 14°	0.127	0.130	0.123	0.135
14° - 15°	0.152	0.160	0.142	0.171
15° - 16°	0.172	0.176	0.163	0.190
16° - 17°	0.206	0.211	0.198	0.221
17° - 18°	0.226	0.237	0.212	0.255
18° - 19°	0.254	0.266	0.236	0.288
19° - 20°	0.279	0.288	0.262	0.312
20° - 21°	0.315	0.319	0.297	0.351

Tabla C- 4: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos

Rango de Ángulo $\theta$ (°)	Diferencia absoluta en (m) entre las correcciones obtenidas aplicando diferentes métodos y el método de la ISO 748-1997			
	ISO 748-1997	ISO TR 9209-1989	Considerando solo corrección en el aire	Ángulo constante
9° - 10°	Método de Ref.	0.002	0.001	0.003
10° - 11°	Método de Ref.	0.000	0.001	0.002
11° - 12°	Método de Ref.	0.011	0.002	0.004
12° - 13°	Método de Ref.	0.002	0.004	0.008
13° - 14°	Método de Ref.	0.003	0.004	0.008
14° - 15°	Método de Ref.	0.008	0.009	0.019
15° - 16°	Método de Ref.	0.005	0.009	0.018
16° - 17°	Método de Ref.	0.006	0.008	0.016
17° - 18°	Método de Ref.	0.011	0.014	0.029
18° - 19°	Método de Ref.	0.013	0.017	0.034
19° - 20°	Método de Ref.	0.010	0.017	0.033
20° - 21°	Método de Ref.	0.003	0.018	0.035
<b>Error medio para el rango completo de ángulos (9° - 21°)</b>		<b>0.006</b>	<b>0.009</b>	<b>0.017</b>

**Prueba No. 3: (tirante=2.2 m, Caudal=32.8 m<sup>3</sup>/s)**

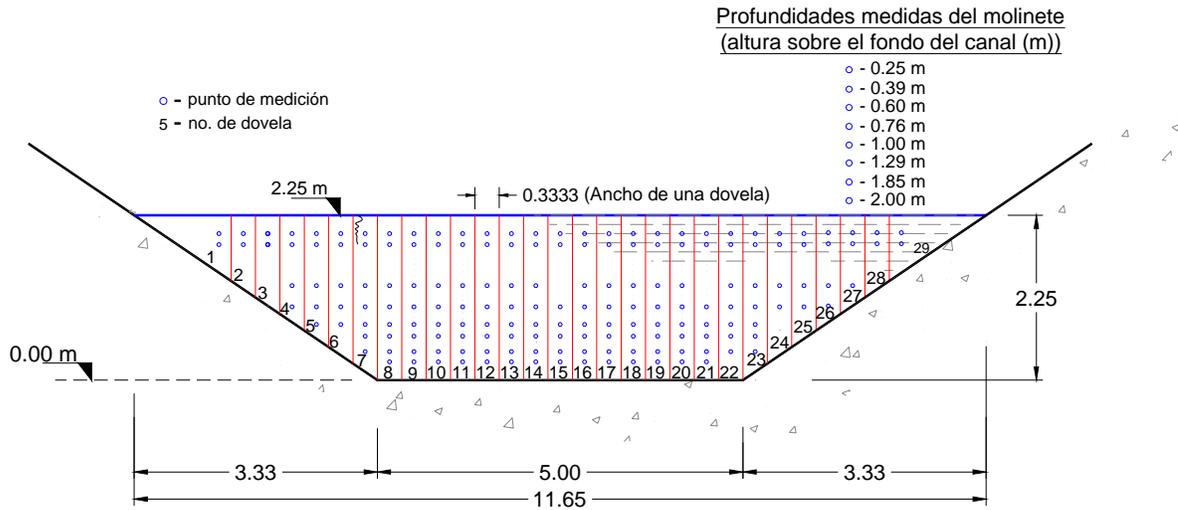
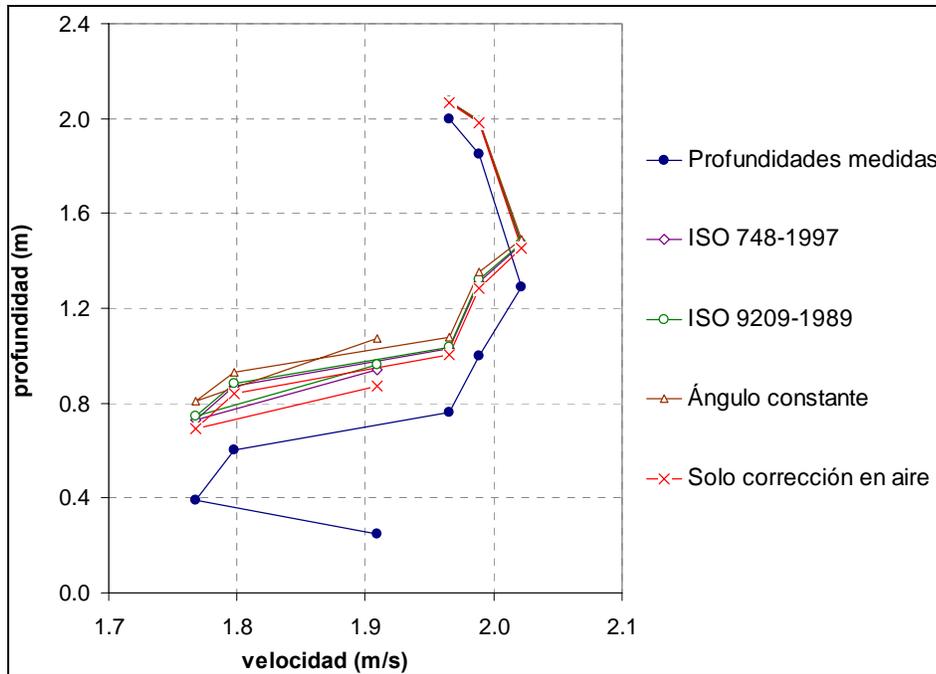
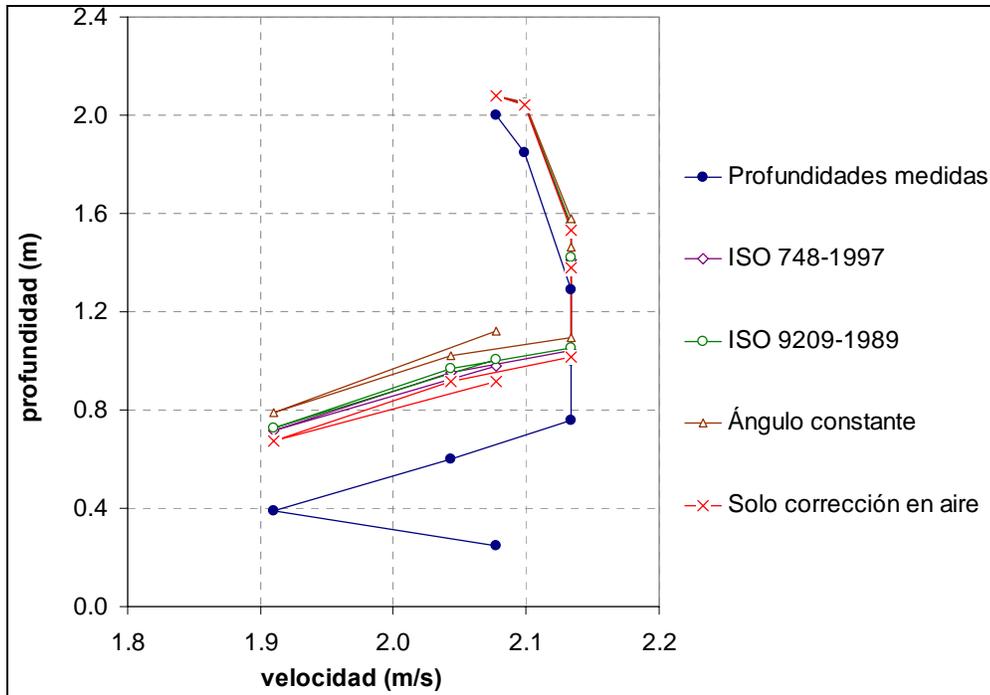


Figura C- 3: Distribución hipotética de los puntos de medición para la prueba No.3

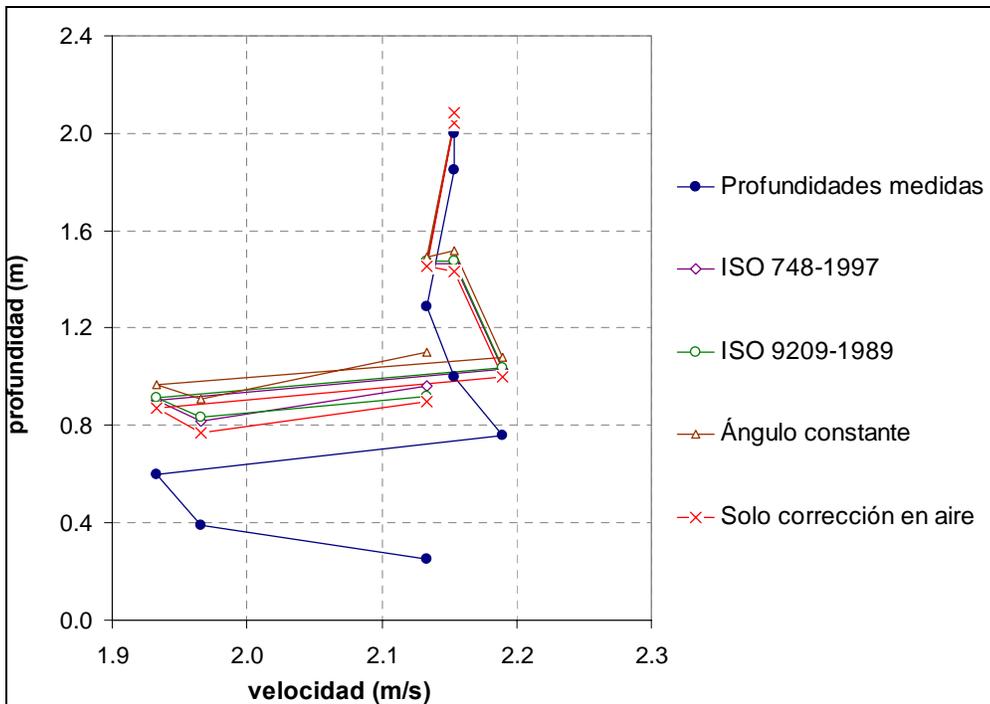
**Graficas de datos corregidos**



Gráfica C- 7: Datos de aforo corregidos en la dovela No.10 utilizando diferentes métodos



Gráfica C- 8: Datos de aforo corregidos en la dovela No.16 utilizando diferentes métodos



Gráfica C- 9: Datos de aforo corregidos en la dovela No.21 utilizando diferentes métodos

### **Análisis comparativo de métodos para corregir la profundidad del molinete**

Tabla C- 5: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos

Rango de Ángulo $\theta$ (°)	Corrección media determinada en la profundidad del molinete para diferentes rangos de ángulos con la vertical (m)			
	ISO 748-1997	ISO TR 9209-1989	Considerando solo corrección en el aire	Cable de inclinación constante
5° - 6°	0.020	0.017	0.017	0.026
6° - 7°	0.024	0.022	0.022	0.030
7° - 8°	0.034	0.031	0.031	0.039
8° - 9°	0.044	0.042	0.041	0.051
9° - 10°	0.057	0.055	0.052	0.067
10° - 11°	0.072	0.065	0.062	0.092
11° - 12°	0.077	0.076	0.074	0.083
12° - 13°	0.089	0.088	0.085	0.097
13° - 14°	0.109	0.110	0.103	0.121
14° - 15°	0.129	0.131	0.118	0.151
15° - 16°	0.153	0.153	0.140	0.180
16° - 17°	0.168	0.176	0.160	0.185
17° - 18°	0.189	0.195	0.178	0.211
18° - 19°	0.202	0.206	0.192	0.223
19° - 20°	0.246	0.253	0.221	0.297
20° - 21°	0.277	0.281	0.248	0.330
21° - 22°	0.311	0.321	0.278	0.377
22° - 23°	0.333	0.348	0.300	0.398
23° - 24°	0.360	0.371	0.324	0.431
24° - 25°	0.384	0.391	0.354	0.441
26° - 27°	0.462	0.475	0.432	0.518
29° - 30°	0.730	0.739	0.667	0.872

Tabla C- 6: Análisis comparativo de errores determinados con los diferentes métodos para diferentes rangos de ángulos

Rango de Ángulo $\theta$ (°)	Diferencia absoluta en (m) entre las correcciones obtenidas aplicando diferentes métodos y el método de la ISO 748-1997			
	ISO 748-1997	ISO TR 9209-1989	Considerando solo corrección en el aire	Ángulo constante
5° - 6°	Método de Ref.	0.002	0.002	0.006
6° - 7°	Método de Ref.	0.002	0.003	0.006
7° - 8°	Método de Ref.	0.003	0.003	0.006
8° - 9°	Método de Ref.	0.002	0.003	0.007
9° - 10°	Método de Ref.	0.002	0.005	0.010
10° - 11°	Método de Ref.	0.007	0.010	0.020
11° - 12°	Método de Ref.	0.001	0.003	0.007
12° - 13°	Método de Ref.	0.001	0.004	0.007
14° - 15°	Método de Ref.	0.001	0.006	0.012
15° - 16°	Método de Ref.	0.002	0.011	0.022
16° - 17°	Método de Ref.	0.001	0.013	0.026
17° - 18°	Método de Ref.	0.008	0.008	0.017
15° - 16°	Método de Ref.	0.006	0.011	0.022
18° - 19°	Método de Ref.	0.003	0.010	0.020
19° - 20°	Método de Ref.	0.006	0.026	0.050
20° - 21°	Método de Ref.	0.005	0.029	0.053
21° - 22°	Método de Ref.	0.009	0.034	0.065
22° - 23°	Método de Ref.	0.014	0.033	0.064
23° - 24°	Método de Ref.	0.010	0.037	0.070
24° - 25°	Método de Ref.	0.008	0.030	0.058
26° - 27°	Método de Ref.	0.013	0.030	0.056
29° - 30°	Método de Ref.	0.009	0.063	0.142
<b>Error medio para el rango completo de ángulos (5° - 30°)</b>		<b>0.005</b>	<b>0.017</b>	<b>0.034</b>

***Resultados elegidos del Capítulo 5: Determinación de la velocidad media***

Las gráficas que se presentan en este anexo son perfiles de velocidad determinados con base en la relación logarítmica y la relación exponencial propuesta por Chen ya discutidos en el desarrollo del capítulo 5 y que se muestran a continuación.

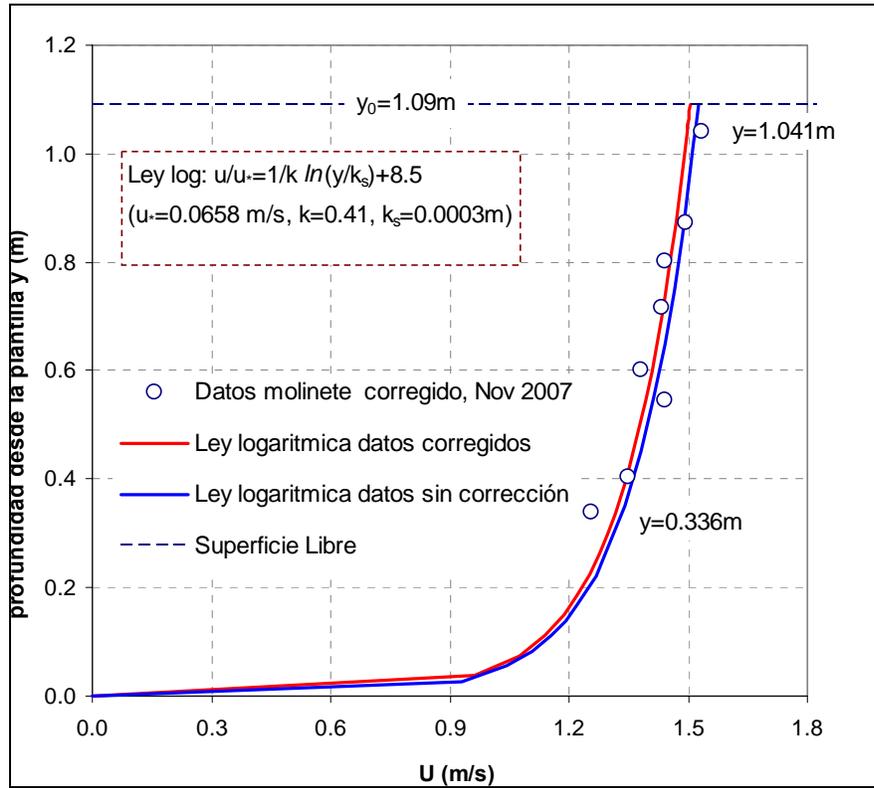
Relación logarítmica: 
$$\frac{U}{U_*} \equiv \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + 8.5$$

Relación exponencial: 
$$\frac{U}{U_*} = a\left(\frac{y'}{y}\right)^m$$

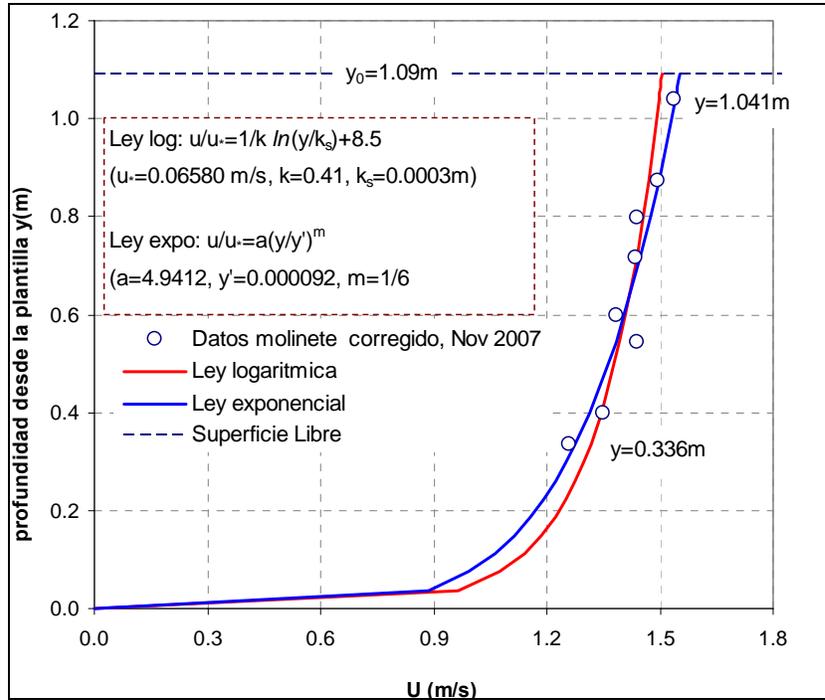
Los coeficientes fueron determinados ajustando éstas relaciones a los datos experimentales corregidos en el análisis realizado en el capítulo 4. Se realizó el análisis al nivel de dovelas en las cuales se determinó el caudal a partir del método de integración (véase a las tablas 5-1, 5-2, 5-3 y 5-4 del capítulo 5).

**PRUEBA No. 1: Perfiles teóricos extrapolados con datos experimentales**

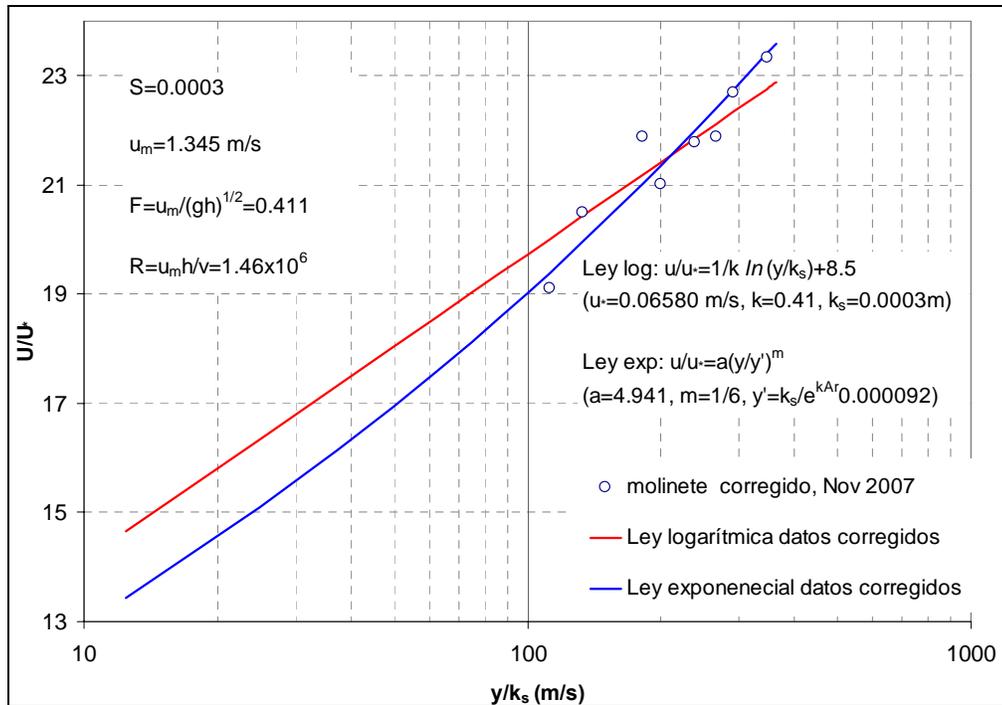
**Dovela No.5**



Gráfica D- 1: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica para datos de aforo con y sin corrección en la dovela 5

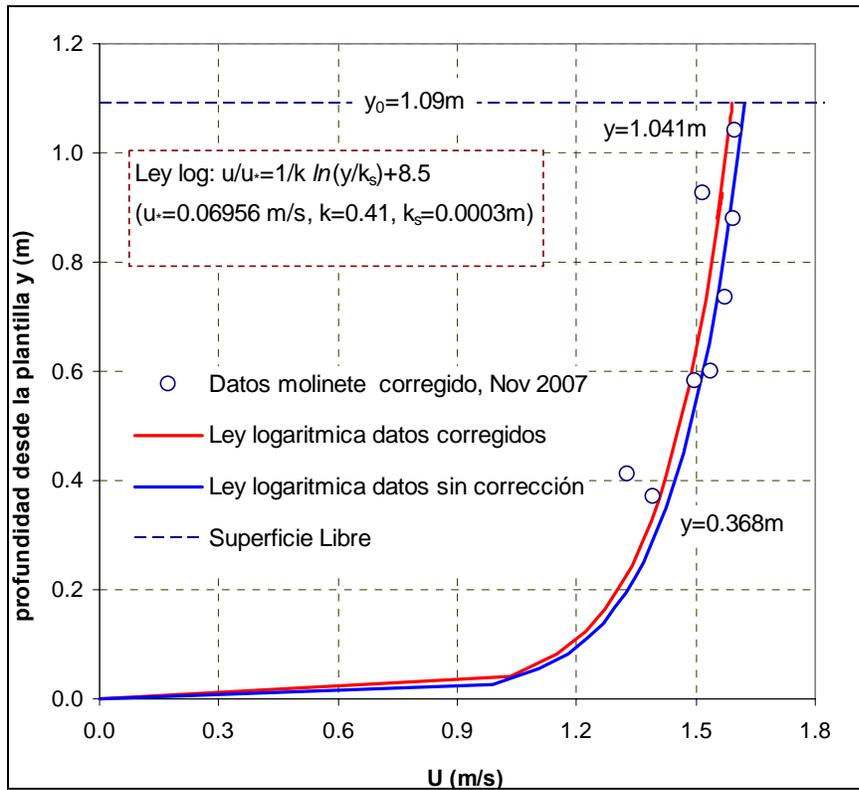


Gráfica D- 2: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica y exponencial para datos corregidos en la dovela 5

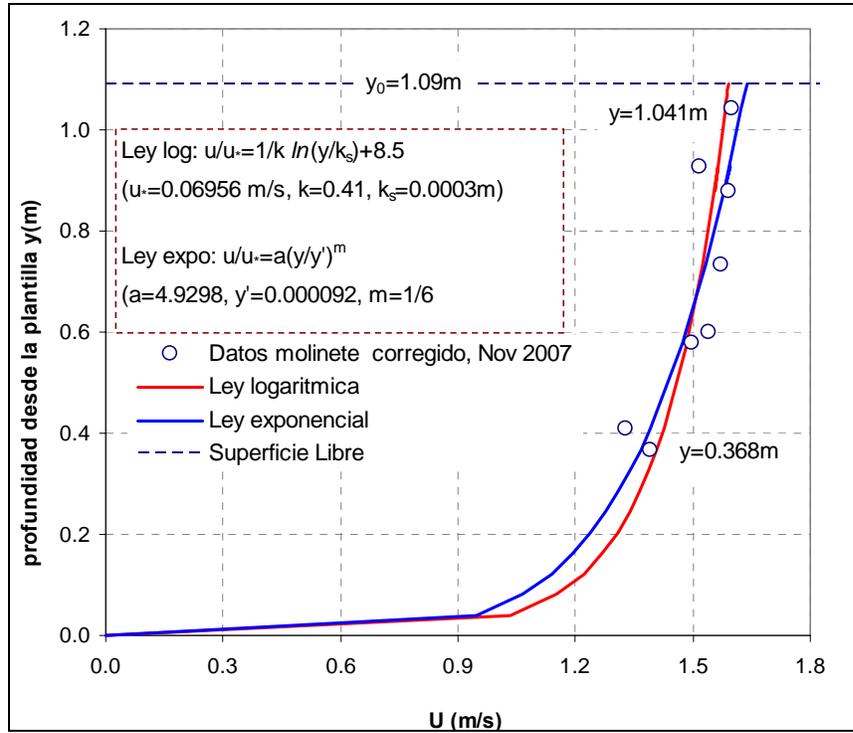


Gráfica D- 3: Perfiles adimensionales para la relación logarítmica y exponencial aplicados a los datos de aforo corregidos en la dovela 5

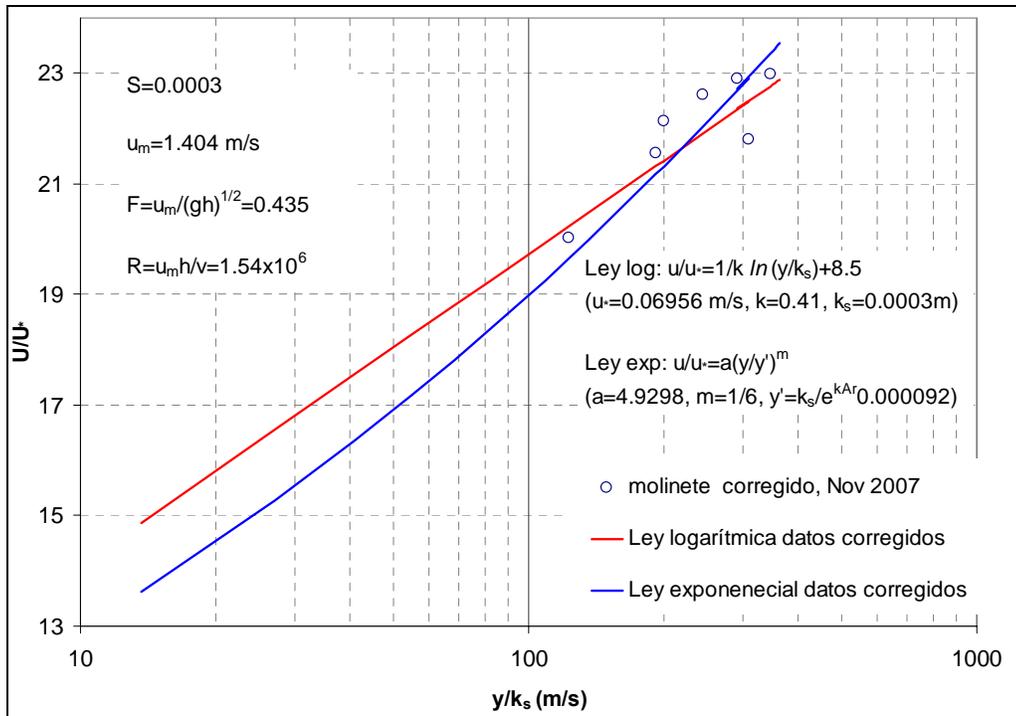
**Dovela No. 12**



Gráfica D- 4: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica para datos de aforo con y sin corrección en la dovela 12



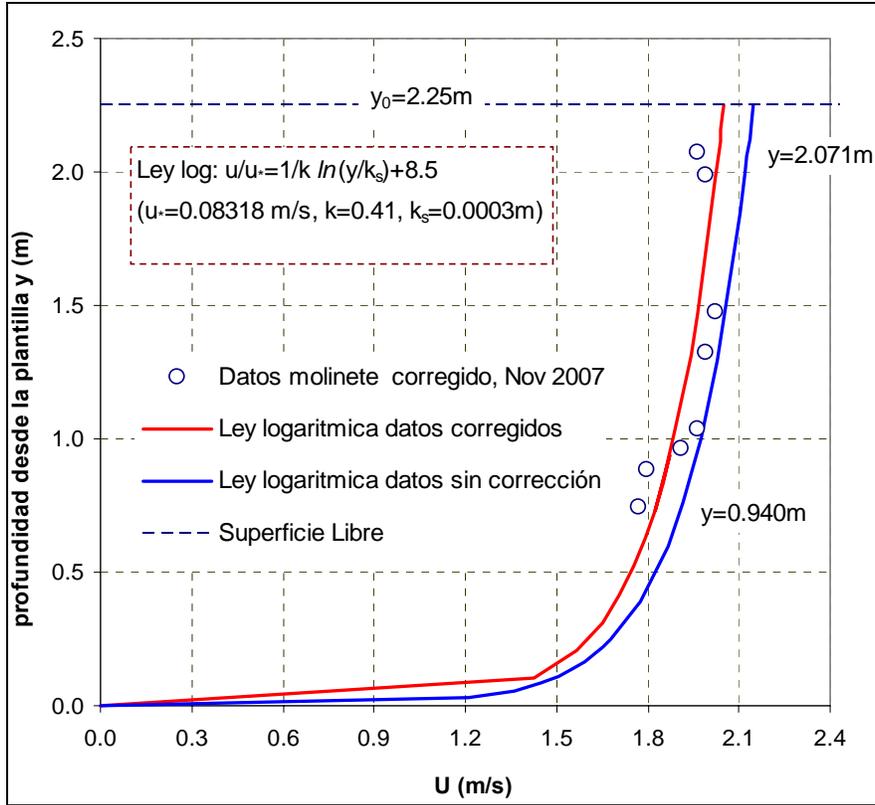
Gráfica D- 5: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica y exponencial para datos corregidos en la dovela 12



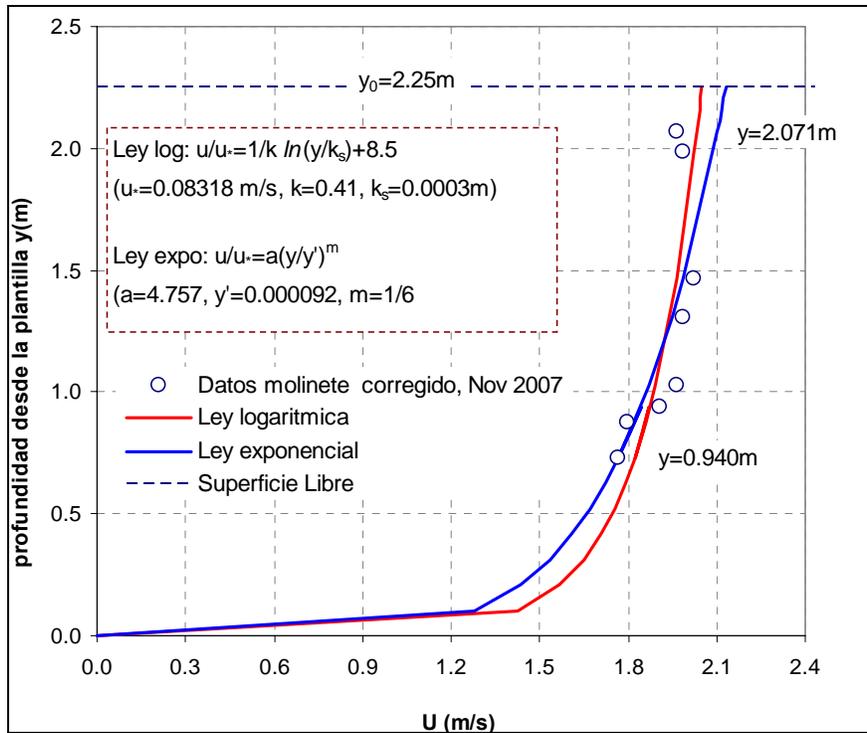
Gráfica D- 6: Perfiles adimensionales para la relación logarítmica y exponencial aplicados a los datos de aforo corregidos en la dovela 12

**PRUEBA No. 3: Perfiles teóricos extrapolados con datos experimentales**

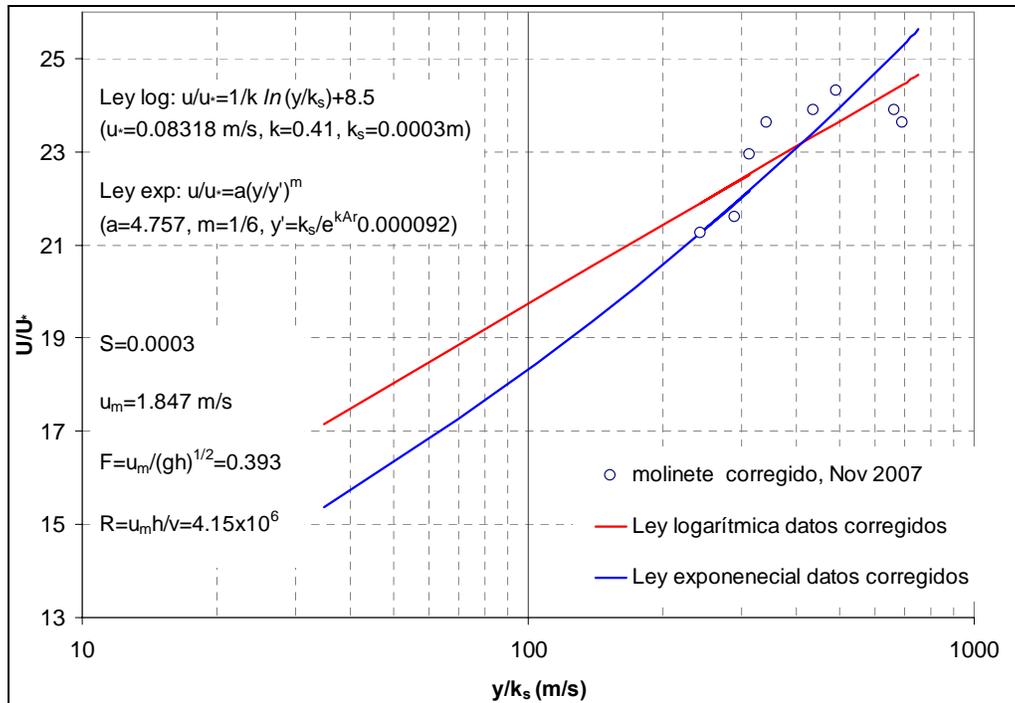
**Dovela No. 10**



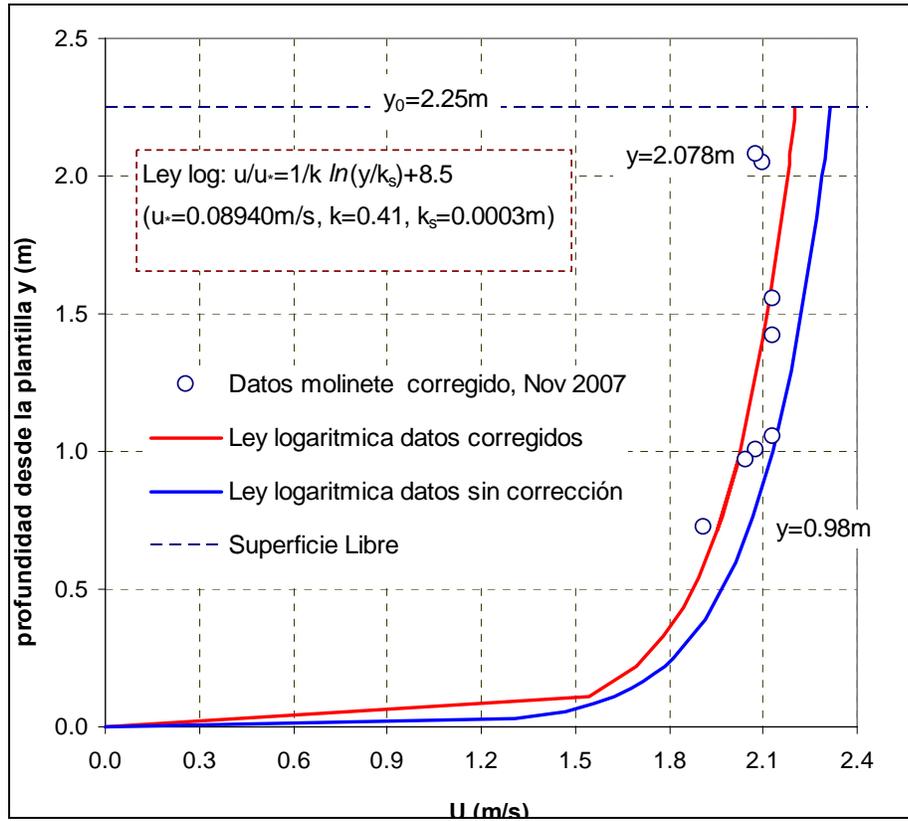
Gráfica D- 7: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica para datos de aforo con y sin corrección en la dovela 10



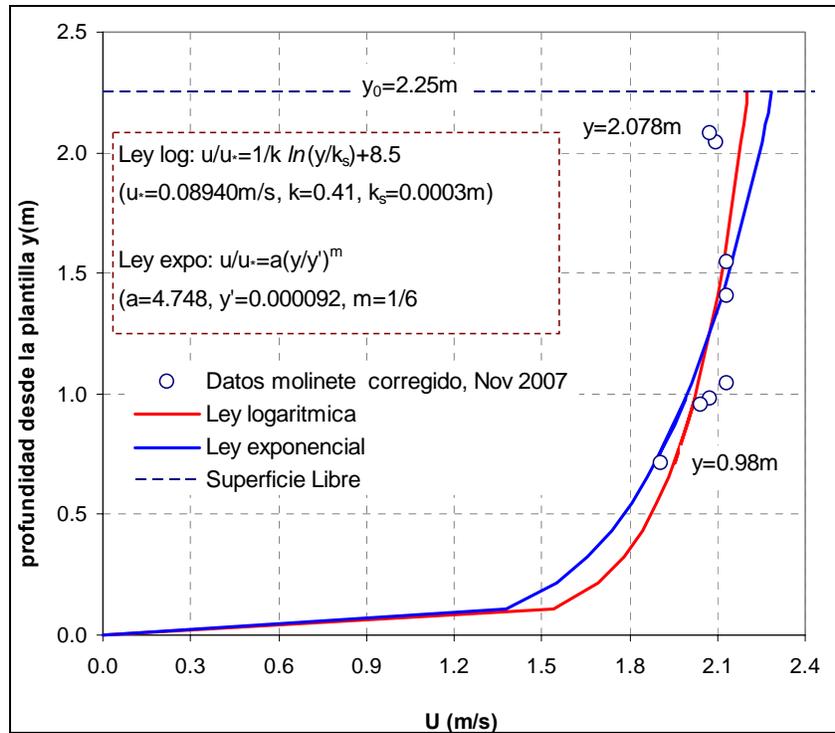
Gráfica D- 8: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica y exponencial para datos corregidos en la dovela 10



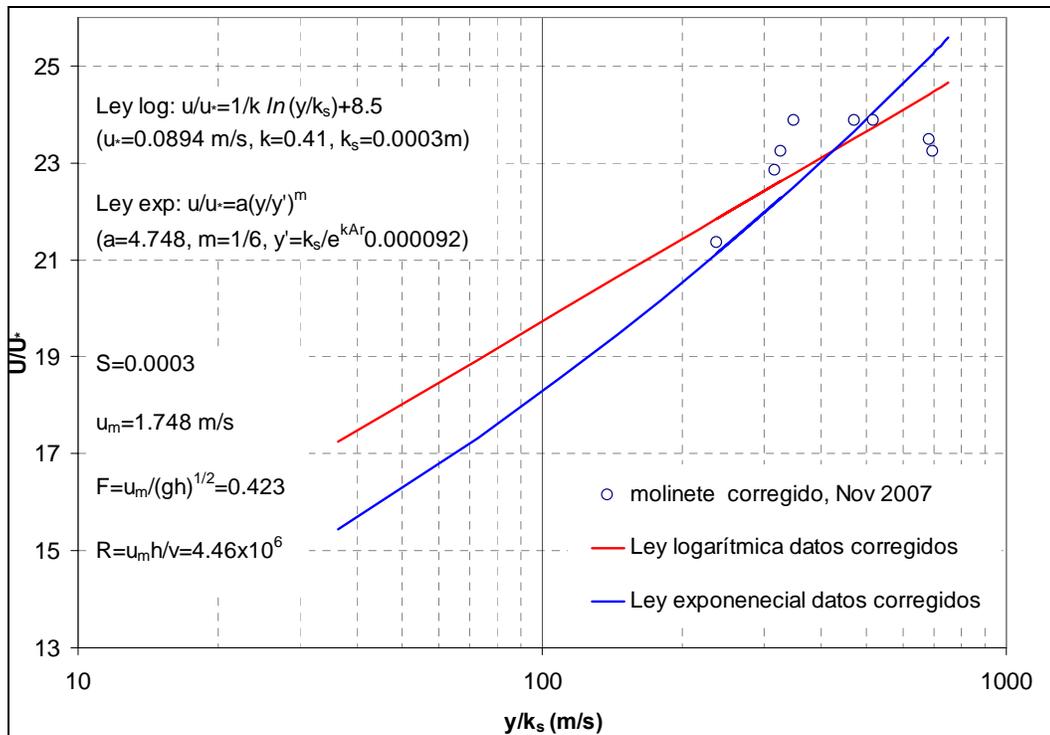
Gráfica D- 9: Perfiles adimensionales para la relación logarítmica y exponencial aplicados a los datos de aforo corregidos en la dovela 10



Gráfica D- 10: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica para datos de aforo con y sin corrección en la dovela 16



Gráfica D- 11: Comparación de perfiles de velocidad extrapolados utilizando la relación logarítmica y exponencial para datos corregidos en la dovela 16



Gráfica D- 12: Perfiles adimensionales para la relación logarítmica y exponencial aplicados a los datos de aforo corregidos en la dovela 16