



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
HIDRÁULICA – INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA MEDICIÓN DE VELOCIDADES  
EN EL AGUA POR MEDIO DE ULTRASONIDO.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. ISAÍ VERGARA PEÑALOZA

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. EDMUNDO PEDROZA GONZÁLEZ  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

JIUTEPEC, MORELOS, MÉXICO, OCTUBRE 2017

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Nahún Hamed García Villanueva  
Secretario: Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa  
Vocal: Dr. Edmundo Pedroza González  
1<sup>er.</sup> Suplente: M. en C. Gilberto Salgado Maldonado  
2<sup>d o.</sup> Suplente: M.I. José Alfredo González Verdugo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Edmundo Pedroza González

---

**FIRMA**

## **Dedicado con mucho cariño:**

### **A Dios.**

*Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

### **A mi madre Isabel.**

*Por ser un pilar muy importante en mi vida, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.*

### **A mi padre Eulalio.**

*A pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí.*

### **A mis familiares.**

*Mi hermano Manuel y Sthephani por apoyarme en todo momento y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.*

*¡Gracias a ustedes!*

# AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Dr. Edmundo Pedroza González por dirigir y sustentar este documento y un reconocimiento respetuoso a mis revisores:

Dr. Nahun Hamed García Villanueva

Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa

M. en C. Gilberto Salgado Maldonado

M.I. José Alfredo González Verdugo

Toda mi gratitud y respeto a:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Por su apoyo durante la realización de esta tesis y haberme dado la oportunidad de cumplir mis metas profesionales.

A mis amigos que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos: Daniela, Jonathan, Josué, Javier, Tania, Carlos, Sandra y Zayuri a todos ellos gracias por haberme ayudado.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. La Importancia de medir el gasto</b> .....	1
<b>1.2. Planteamiento del problema de investigación</b> .....	3
<b>1.3. Estado del conocimiento</b> .....	4
<b>1.4. Objetivo General</b> .....	6
<b>1.5. Objetivos Específicos</b> .....	7
<b>1.6. Justificación</b> .....	7
<b>2. FORMAS DE MEDIR EL GASTO</b> .....	8
<b>2.1. Métodos de aforo e instrumentación</b> .....	10
2.1.1. Sección control.....	10
2.1.2. Relación sección-pendiente .....	10
2.1.3. Relación sección velocidad .....	11
<b>2.2. Instrumentos sección-velocidad</b> .....	11
2.2.1. Flotadores.....	12
2.2.2. Molinete.....	12
<b>2.3. Velocidad</b> .....	13
2.3.1. La velocidad media .....	14
2.3.2. Distribución de velocidades.....	16
2.3.3. Medidas de la velocidad.....	16
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	19
<b>3.1. Selección del sitio de trabajo</b> .....	19
<b>3.2. Medición simultánea del gasto con el M9 y el Deltawave</b> .....	19
<b>3.3. Recopilación de las velocidades en cada transecto del Deltawave</b> ....	20
<b>3.4. Usando los datos del M9, reconstrucción de los perfiles de flujo en el plano horizontal a la altura de cada transecto del Deltawave.</b> .....	20



3.5. Cálculo del área bajo la curva de cada perfil para estimar la velocidad media.....	20
3.6. Comparación de las velocidades medias en cada transecto con las velocidades reportadas en cada transecto.....	20
4. EL FENÓMENO DEL SONIDO Y EL ULTRASONIDO.....	21
4.1. ¿Cómo se produce el sonido? .....	26
4.2. ¿Qué es el ultrasonido?.....	27
4.3. El velocímetro doppler .....	28
5. PRUEBAS .....	31
5.1. Equipos utilizados.....	34
5.1.1. ATT Deltawave de Acuasonic .....	34
5.1.2. RiverSurveyor S5-M9 .....	52
5.2. Obtención de Datos.....	70
5.2.1. Datos efecto doppler .....	70
5.2.2. Datos tiempo de travesía.....	77
5.3. Resultados .....	82
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
7. BIBLIOGRAFÍA.....	90
8. ANEXOS .....	92
8.1. Anexo A.....	92
8.1.1. Resultados Equipo M9 .....	92
8.1.2. Áreas por Sumatoria Reiman.....	104
8.2. Anexo B .....	107
8.2.1. Resultados Equipo Deltawave ATT .....	107



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Molinete tipo Price sumergido en canal rectangular .....	13
Figura 2 Concepto de "Velocidad media" .....	15
Figura 3 Perfiles de velocidad en un canal rectangular .....	16
Figura 4 Sección transversal.....	17
Figura 5 Variación de las velocidades verticales .....	17
Figura 6 Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal.....	18
Figura 7 Ondas de propagación del sonido.....	21
Figura 8 Moléculas sin propagación .....	21
Figura 9 Direccionalidad de las partículas. ....	22
Figura 10 Esquema de la propagación de las partículas.....	23
Figura 11 Direccionalidad del ultrasonido.....	23
Figura 12 Esquema ilustrativo del movimiento de las partículas.....	24
Figura 13 Ejemplo de onda transversal y longitudinal. ....	25
Figura 14 Juguete Slinky (ejemplo de onda longitudinal). ....	26
Figura 15 Acústico doppler M9 .....	30
Figura 16 Equipo M9.....	31
Figura 17 Equipo Deltawave.....	31
Figura 18 Estación de medición canal "Las Estacas" .....	32
Figura 19 Representación de los cuatro pares de sensores en sus diferentes profundidades. ....	33
Figura 20 Representación de las mediciones simultáneas.....	33
Figura 21 Sistema Deltawave .....	34
Figura 22 Aforador de tiempo de travesía, situado en los márgenes laterales del canal.....	35
Figura 23 Variables geométricas. ....	40
Figura 24 Esquema ilustrativo del principio de funcionamiento.....	43
Figura 25 Conjunto de medición para el aforador de tiempo de tránsito.....	46
Figura 26 Diagrama de cuerpo libre de A-B.....	48
Figura 27 Diagrama de cuerpo libre de B-A.....	50
Figura 28 Características del Pd S5. ....	53
Figura 29 Componentes del módulo de energía y comunicación (PCM).....	54
Figura 30 Componentes del Barquito.....	54
Figura 31 Sistema base.....	55
Figura 32 PD M9.....	56
Figura 33 PCM.....	56



Figura 34 Representación de la instalación del PD-M9 y PCM. ....	57
Figura 35 Conexión de cable de energía y de comunicación.....	57
Figura 36 Perfilador “RiverSurveyor” .....	58
Figura 37 Realizando calibración del equipo M9 para compensar la interferencia magnética en las proximidades. ....	60
Figura 38 Componentes del trayecto.....	60
Figura 39 Margen inicial .....	61
Figura 40 Pantalla de inicio del sistema RiverSurveyor Life. ....	62
Figura 41 Pantalla indicando el inicio del trayecto del barco.....	63
Figura 42 Término del trayecto recorrido.....	63
Figura 43 Cuadro de diálogo. ....	64
Figura 44 Resumen de la medición de gasto.....	65
Figura 45 Resultado de la sección transversal del canal. ....	65
Figura 46 Datos Recolectados del trayecto recorrido.....	66
Figura 47 Descarga de datos a Excel.....	67
Figura 48 Profundidades de los cuatro sensores.....	68
Figura 49 Ubicación de los cuatro pares de sensores.....	69
Figura 50 Aporte de la velocidad del agua a la velocidad del sonido.....	89



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Métodos y técnicas para medición de gasto volumétrico en canales .....	8
Tabla 2 Componentes del sistema Deltawave.....	37
Tabla 3 Errores sistemáticos cuando la dirección de la corriente no es paralela al eje del canal.....	45
Tabla 4 Datos de velocidades del sensor 1.....	70
Tabla 5 Datos de velocidades del sensor 2.....	71
Tabla 6 Datos de velocidades del sensor 3.....	72
Tabla 7 Datos de velocidades del sensor 4.....	73
Tabla 8 Áreas de los cuatro pares de sensores.....	75
Tabla 9 Datos primer par de sensores.....	78
Tabla 10 Datos segundo par de sensores.....	79
Tabla 11 Datos tercer par de sensores.....	80
Tabla 12 Datos cuarto par de sensores.....	81
Tabla 13 Resumen de resultados M9 y ATT Prueba 1 .....	82
Tabla 14 Resumen de resultados M9 y ATT Prueba 2 .....	83
Tabla 15 Resumen de resultados M9 y ATT Prueba 3 .....	84
Tabla 16 Resumen de resultados M9 y ATT Prueba 4 .....	85
Tabla 17 Promedio de las 4 pruebas .....	86

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Grafica 1 Variación de la velocidad con la profundidad.....	18
Grafica 2 Perfil de velocidades en el eje horizontal.....	70
Grafica 3 Perfil longitudinal de velocidades sensor 1.....	71
Grafica 4 Perfil longitudinal de velocidades sensor 2.....	72
Grafica 5 Perfil longitudinal de velocidades sensor 3.....	73
Grafica 6 Perfil longitudinal de velocidades sensor 4.....	74
Grafica 7 Representación gráfica de las áreas igualadas.....	77
Grafica 8 Perfil de velocidades sensor 1.....	78
Grafica 9 Perfil de velocidades sensor 2.....	79
Grafica 10 Perfil de velocidades sensor 3.....	80
Grafica 11 Perfil de velocidades sensor 4.....	82



Grafica 12 Comparación de resultados Prueba 1 .....	83
Grafica 13 Comparación de resultados Prueba 2 .....	84
Grafica 14 Comparación de resultados Prueba 3 .....	85
Grafica 15 Comparación de resultados Prueba 4 .....	86
Grafica 16 Promedio de las 4 pruebas .....	87



# CAPÍTULO

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de los equipos de medición ultrasónica para la obtención de gastos y velocidades se ha incrementado en los últimos años; se ha optado por utilizar estos equipos porque sus datos presentan mayor exactitud, por lo que su error es menor en comparación con otros equipos o técnicas de medición. La finalidad de este tema de investigación es fortalecer los conocimientos sobre la operación de los equipos, profundizando en los fenómenos físicos acústicos que se presentan al utilizarlos, así como el análisis de los datos que arrojan los equipos de medición.

El lugar donde se desarrollaron las pruebas para la obtención de datos, es en el canal de “Las Estacas” a la salida del balneario con el mismo nombre. Fue seleccionado esta zona de estudio porque ahí se encuentra instalado un equipo de medición ultrasónica de tiempo de travesía.

En el diseño de las obras hidráulicas, la velocidad y el caudal en cauces naturales o artificiales son los parámetros más importantes. Existen dos formas para su obtención. La primera es en base a datos topográficos (sección transversal del canal), estudios hidrológicos e hidráulicos, para determinar el gasto que se presenta así como la velocidad. La segunda opción es medir directamente en la zona o punto de interés, para lo cual se pueden emplear estaciones hidrométricas o en su caso utilizar la instrumentación adecuada para la medición de velocidades como son el molinete o los medidores ultrasónicos.

En México es más común recurrir a los medidores ultrasónicos porque la información hidrométrica disponible es imprecisa y en ocasiones inexistente, mientras que los medidores ultrasónicos pueden adquirirse y transportar hasta el lugar del sitio de interés realizando las mediciones requeridas y obtener resultados precisos.

### 1.1. La Importancia de medir el gasto



Es importante medir el gasto en un cauce puesto que el elemento que se mide es agua y es un integrante de los ecosistemas naturales, fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida.

El ser humano tiene la necesidad de medir el comportamiento físico del agua en movimiento, para ello, creó diversos instrumentos que registran velocidad, presión, temperatura y volumen del agua. Desafortunadamente, medir directamente el gasto, a través del volumen que descarga en un intervalo de tiempo es una tarea difícil. Sobre todo si se trata de un canal de riego o un suministro de agua potable, donde los volúmenes de abastecimiento son considerables.

También es importante desde otros puntos de vista:

- Para determinar la disponibilidad del agua,
- Para administrar de acuerdo con los usos consuntivos y no consuntivos, y
- Para el uso y manejo adecuado del agua

Usualmente se estima el gasto en forma indirecta. Uno de los tres métodos más comunes en México es la relación sección-velocidad, que es relevante en las obras hidráulicas ya que de esto depende el adecuado funcionamiento del sistema hidráulico, garantizando la seguridad de la obra.

Existen *Los programas de mejoramiento de medición*, que se encargan de tener un correcto uso de los equipos de medición, pero ninguno en específico del mejoramiento en canales, para ser exactos, se tienen los programas de mejoramiento de medición en pozos agrícolas, dando las recomendaciones y el uso adecuado que se debe de tener para obtener buenos resultados. Se han llegado a tener estos programas de mejoramiento por las incertidumbres muy grandes que se han tenido, al igual que en los pozos, existe un programa de mejoramiento de medición para presas. (Patiño et al, 1996; Pedroza y Patiño, 1998, 1999).

El *Mejoramiento de medición en canales* no existe como tal, después de que se hayan realizado programas de mejoramiento de medición en pozos y presas, se generalizó el mejoramiento de medición para cualquier sitio, como pudieran ser canales, presas, pozos, plantas tratadoras, ríos, entre otros, sin especificar exactamente en la medición en canales que es el tema de interés, dejando un campo muy abierto para la aplicación de la medición. Existen *Estaciones*



hidrométricas ultrasónicas (ATT) instaladas por gran parte del país, destacadas por la obtención de resultados y precisiones que se han tenido.

La velocidad es la cantidad de metros por segundo que recorre el agua en un río, y el caudal es el volumen en metros cúbicos de agua que pasan por segundo en un sitio determinado. Estas dos características son de gran importancia para iniciar proyectos de construcción de puentes, canales, estudios de hidráulica pluvial y de diseño de obras hidráulicas en general.

El objetivo de la medición será entonces obtener el valor de un parámetro físico con la mayor exactitud y precisión posible, disminuyendo al máximo los errores posibles. (Ochoa Alejo).

Se ha tenido gran demanda para el desarrollo de nuevas tecnologías para poder obtener los datos relevantes del flujo, hoy en día se cuenta con equipos de medición ultrasónica que han ayudado a tener mejores resultados de los datos obtenidos en campo. Por otro lado, los medidores electrónicos de velocidad que utilizan técnicas acústicas (de radar o por imágenes) están revolucionando la medición de caudales del agua de la superficie y la dinámica de corrientes. Hoy en día existe información y las herramientas para la determinación del gasto y la recolección de datos del flujo que pasa sobre un río o canal.

## **1.2. Planteamiento del problema de investigación**

El uso de la hidrometría ultrasónica ha ido en aumento en nuestro país (Edmundo, Millan, Arroyo, Santana, & Vázquez, 2007). Su uso se realiza sin un análisis detallado de su aplicación. Solamente se compran los equipos y se instalan de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Sin embargo, los fabricantes no muestran detalles técnicos en su información tales como el fenómeno físico, o en este caso acústico, que se presenta en una medición. Pero al conocer un análisis detallado se presentaría una mayor habilidad para el procesamiento y análisis de los datos.

Diferentes marcas de equipos de medición ultrasónica muestran las características resaltantes de los instrumentos ultrasónicos como es la alta discretización de las celdas y cortes transversales, los tipos de sensores con los que cuenta, GPS, brújula, el rango de profundidad que alcanza el perfilador, el tipo de software que utiliza para hacer la descarga de los datos, tamaños y profundidades de las celdas y el sistema que maneja, las recomendaciones de instalación así como de su ubicación para que tengan un mejor funcionamiento y



una exactitud en cuanto a los resultados que arrojará, pero no hacen mención de los fenómenos físicos que se presentan al ejecutar estos equipos ultrasónicos o si la velocidad que arrojan los equipos de tiempo de travesía son las velocidades medias.

### **1.3. Estado del conocimiento**

Existen diferentes equipos que se encargan de la medición del gasto del agua, entre ellos se tienen instrumentos como el molinete o medidores ultrasónicos. Estos últimos, se dividen en dos tipos, que son el de tiempo de travesía y el de efecto doppler, su función es determinar el gasto que pasa por cierta sección del canal o río, mediante el método de área-velocidad.

Hoy en día existe una amplia variedad de los equipos de medición ultrasónica que han facilitado la medición del gasto mediante la velocidad y el área de la sección, disminuyendo los errores o diferencias que se llegaron a tener en cuanto a los resultados obtenidos en campo o laboratorio.

De acuerdo a los manuales y especificaciones de los instrumentos ultrasónicos de medición de gasto que presentan los proveedores, se hace referencia al tipo de personal al que va dirigido (en el mayor de los casos, personal técnico) y las necesidades que pudieren llegar a tener, así mismo, se encuentran artículos donde proporcionan información e indicaciones de como poder elegir la mejor opción para un medidor de gasto ultrasónico.

De acuerdo a la bibliografía revisada existen artículos donde se presenta una guía para realizar una buena elección de un equipo ultrasónico de efecto doppler, indicando las características físicas que debe cumplir el lugar donde deberá ser colocado el equipo, sin hacer mención de su principio físico que presenta el aparato, mostrando únicamente la información necesaria para ser consultado como una guía.

Para ello, es necesario conocer el principio de operación que emplean estos sistemas electrónicos durante su funcionamiento, así como las principales ventajas y desventajas que presentan comparados con los métodos comunes de aforo. Al hacer mención de conocer el principio de operación, muchos de los manuales de los equipos ultrasónicos dan la información técnica, sin dar una información del principio físico (acuático) que presentan los aparatos de efecto doppler o tiempo de travesía, que es el trabajo de investigación.



Uno de los artículos publicado por la Comisión Nacional del Agua con el tema “MEDIDOR ULTRASÓNICO DE EFECTO DOPPLER PARA CANALES” dan a conocer las características que debe de presentar el sitio de trabajo para poder obtener buenos resultados al hacer las mediciones en campo. “Por lo tanto el Manual se dirige a todas las personas relacionadas con la medición del agua en canales, específicamente, personal de la Comisión Nacional del Agua, que tengan la necesidad de medir en sitios en los que los medidores convencionales (molinete, flotador, aforador, etc.) no se puedan usar, o bien en aquellos sitios donde se tenga que medir durante periodos largos con medición constante (por ejemplo, cada 5 minutos, durante 15 días) o eventualmente, cuando se requiera enviar la información por transmisión remota.” (Pedroza G. E.). De acuerdo al párrafo se hacen recomendaciones para los aforos que se realizarán y especifican al personal que va dirigido, sin informar sobre el funcionamiento real de los instrumentos de medición.

Otro de los párrafos del artículo publicado por la misma dependencia muestra lo siguiente:

“Como se mencionó, este tipo de medidores no son convencionales y esto hace que no se conozca mucho sobre su funcionamiento y uso.

El presente Manual pretende ilustrar a los usuarios del medidor de efecto doppler tanto en su funcionamiento como en su mejor forma de utilización, con objeto de sacar el mayor provecho del potencial que representan las innovaciones tecnológicas del dispositivo.” (Pedroza G. E.).

Dentro de este párrafo presentado, especifica cuál sería la mejor forma de utilizar los equipos, sin profundizar en los funcionamientos físicos que presenta dicho aparato. Es por ello que uno de los principales objetivos de esta investigación es de hacer autodidáctico el aprendizaje de los fenómenos que se presentan en estos instrumentos al utilizarlos, puesto que al tener un mejor conocimiento, se puede dar un mejor aprovechamiento de los equipos.

“El medidor debe colocarse al centro del canal. Esto tiene mucha importancia ya que si el medidor está muy alejado del centro, no tomará la velocidad media representativa y esto se reflejará en la precisión del gasto. Esto no es grave si se coloca a unos centímetros alejado del centro; se recomienda no exceder un diez por ciento del ancho del canal.” (Pedroza G. E.).

De acuerdo a lo descrito, es notorio que no se han hecho investigaciones relevantes de los fenómenos físicos que se presentan en los equipos ultrasónicos,



es por ello que esta tesis desarrollará la investigación para tener adecuada información en donde se presentan los fenómenos físicos que intervienen para que puedan operar los equipos ultrasónicos mejorando el conocimiento didáctico.

Dentro de las especificaciones e información del medidor ultrasónico modelo TDS-100H hace mención de los transductores que utiliza el equipo, mostrándolo a continuación.

“El medidor de flujo ultrasónico TDS-100H utiliza transductores piezoeléctricos tanto para la emisión como para la recepción de las ondas ultrasónicas.

Los transductores de ultrasonido son adecuados para la medida de la mayor parte de líquidos, en particular de los líquidos con sólidos en suspensión a excepción de que las partículas o las burbujas de aire que pueda contener el líquido no se comparen en tamaño con la longitud de la onda acústica. Son sensibles a los cambios de densidad del líquido que varían la velocidad del sonido.” (TecnoMetrica, 2016).

La información que proporcionan los proveedores de acuerdo a los equipos ultrasónicos es respecto de que están fabricados, y finalmente es justificable el hecho de que solo proporcionen la información necesaria, pero para fines didácticos y/o experimentales es necesario tener un sustento sobre lo que pasa con el equipo al hacer los aforos o mediciones de gasto.

#### **1.4. Objetivo General**

Propiciar un mejor entendimiento del fenómeno del sonido y su uso en los aparatos de medición para potenciar sus beneficios en la hidrometría.

Saber cuál es el valor de la velocidad que entrega el medidor de tiempo de travesía con respecto del equipo de medición de efecto doppler.



## **1.5. Objetivos Específicos**

- a) Explicar de manera clara y sencilla el fenómeno del sonido, su generación y transmisión.
- b) Explicar la mecánica del efecto de la corriente sobre el haz ultrasónico.
- c) Analizar y explicar el fenómeno del material piezoeléctrico mediante la energía alterna.
- d) Saber la velocidad que entrega el equipo de tiempo de travesía.

## **1.6. Justificación**

El interés de este tema se circunscribe al ámbito académico; los resultados y la manera de obtenerlos son por demás interesantes. La comparación entre los resultados de una medición real y una obtenida por los instrumentos ultrasónicos y los perfiles de velocidades presentes en un flujo real. Es por ello que se desarrollará la investigación con el fin de encontrar un aprendizaje significativo para un mejor uso de los equipos a utilizar.



# CAPÍTULO

## 2. FORMAS DE MEDIR EL GASTO

Se tienen diferentes formas de medir el gasto en los canales, a las cuales se les puede llamar métodos y técnicas, en la Tabla 1 se presenta un panorama general no exhaustivo de dichos métodos y técnicas (Edmundo, Millan, Arroyo, Santana, & Vázquez, 2007)

Tabla 1 Métodos y técnicas para medición de gasto volumétrico en canales

Método	Técnica		Incertidumbre Típica %
Área-Velocidad	Molinete	Vadeo Puente Cable Embarcación fija	$\pm 5$
		Embarcación móvil	$\pm 10$
	Flotadores		$\pm 10$
	Ultrasónicos	Tiempo de travesía Efecto Doppler	$\pm 5$
Carga-Gasto	Vertedores	Cresta delgada Cresta ancha	$\pm 1 - \pm 5$
	Aforadores de garganta	Rectangular Trapezoidal En forma de "U" Parshall SANIIRI	$\pm 5$
Dilución con trazadores	Químicos Radioactivos Fluorescentes		$\pm 3$

El método de Área-Velocidad, se caracteriza porque invariablemente se usa la ecuación de continuidad, multiplicando el área por la velocidad. Para poder aplicar el método se usan diferentes técnicas para estimar la velocidad del flujo; se tiene, por ejemplo, el molinete, las técnicas de ultrasonido, inclusive se pueden usar los flotadores. Las técnicas de este método se refieren a las diferentes formas de estimar la velocidad. Si se usa molinete, éste se puede colocar en el agua



vadeando o desde un puente, también se puede usar un cable o montar el molinete en embarcaciones fijas o móviles. Como puede verse en la Tabla 1, la incertidumbre típica de estas técnicas es de  $\pm 5\%$ ; si se realizan con todos los cuidados que marca la norma y el molinete está calibrado. Al respecto de esta técnica se hablará en detalle más adelante. En función de la técnica que se use, la estimación de la velocidad se puede hacer en segmentos verticales (molinete) u horizontales (ultrasonido). También se requiere conocer el área hidráulica, normalmente midiendo el tirante y aplicando la fórmula correspondiente a la figura geométrica de la sección.

Para el método de Carga-Gasto, se requiere una estructura en la que se medirá la carga en algún sitio especial que puede ser un vertedor o un aforador. En este caso la palabra “carga” se refiere a una profundidad de agua. Para los vertedores se requiere medir la carga sobre el vertedor, aguas arriba del mismo en un sitio donde la superficie del agua es completamente horizontal. Si se trata de un aforador de garganta larga se debe medir la carga en el interior de la estructura en sitios predeterminados de acuerdo a criterios empíricos. Para el caso de vertedores se mencionan en la Tabla 1 varios tipos de ellos en función de la cresta, la cual puede ser delgada o ancha.

En el método de Pendiente-Área se usan relaciones o fórmulas que involucran la fricción y ello es la característica del método. Se tienen dos ecuaciones que se usan la de Chezy y la de Manning en función del coeficiente de rugosidad. En este método se requiere medir el área hidráulica en varias secciones a lo largo de un tramo lo más recto y uniforme que sea posible. El coeficiente de rugosidad se selecciona de tablas en función del tipo de revestimiento o de las características del fondo y las paredes en canales no revestidos. El cálculo del gasto se hace midiendo la profundidad del agua en dos o tres secciones en una distancia conocida, además se debe conocer la pendiente del fondo del canal en el mismo tramo, el ancho de la superficie libre, y como ya mencionó la rugosidad y el tirante; introduciendo dichas variables en la fórmula de Chezy o en la ecuación de Manning, según corresponda.

Finalmente se tiene el método de dilución con trazadores; en este caso, la característica del método es el uso de trazadores entre los que se tienen los trazadores químicos, radioactivos y fluorescentes. En general, en este método se inyecta un trazador en una corriente y con una concentración conocida, ya sea en una sola inyección o de manera continua, y aguas abajo se toma una muestra



o una serie de muestras y se comparan las concentraciones sin diluir y ya diluida para por medio de una fórmula conocer el gasto. (Pedroza & Hinojosa, 2014) .

En México se usa mayormente la técnica del molinete y los aforadores; en últimas fechas se han introducido técnicas ultrasónicas de aforo.

## 2.1. Métodos de aforo e instrumentación

### 2.1.1. Sección control

Una sección de control en una corriente se define como aquella en la que existe una relación única entre el tirante y el gasto. De los muchos tipos de secciones de control que se pueden usar para aforar una corriente, lo más comunes son los que producen un tirante crítico y los vertedores. Algunos ejemplos de este tipo de sección control son el vertedor triangular, vertedor rectangular, entre otros.

### 2.1.2. Relación sección-pendiente

Este método se utiliza para estimar el gasto máximo que se presenta durante una avenida reciente en un río donde se carece de otro tipo de aforos. Para aplicarlo se requiere contar con la topografía de un tramo del cauce y las marcas del nivel máximo del agua. Según la fórmula de Manning:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (1)$$

Donde

R=radio hidráulico,

$S_f$ =pendiente de la línea de energía específica y

n=coeficiente de rugosidad.

Además de la ecuación de continuidad se tiene que:



$$Q = VA \quad (2)$$

Al utilizar las ecuaciones se tiene que:

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3)$$

### 2.1.3. Relación sección velocidad

Este es el método de mayor uso en México para aforar ríos. Consiste básicamente en medir la velocidad en varios puntos de la sección transversal y después calcular el gasto por medio de la ecuación anterior.

Para determinar el gasto es insuficiente medir la velocidad solo en un punto, por lo que es necesario dividir la sección transversal del cauce en varias subsecciones llamadas dovelas. El gasto que pasa por cada dovela es:

$$q_i = a_i v_{mi} \quad (4)$$

Donde

$a_i$  es el área de la dovela  $i$  y

$v_{mi}$  es la velocidad media en la misma dovela.

## 2.2. Instrumentos sección-velocidad

En esta sección únicamente se mencionarán algunas tecnologías de uso en el método relación sección-velocidad.

El instrumento de mayor uso en México es el molinete, el cual ha sido el principal recopilador de datos por muchos años. Algunas técnicas para determinar la



velocidad de una corriente consisten en usar tubos de Venturi, tubos de Pitot, balanza hidrométrica, entre otros. Sin embargo, estos métodos poco se emplean para el aforo de corrientes con superficie libre.

### 2.2.1. Flotadores

Son cuerpos más ligeros que el agua, adquieren una velocidad que resulta –de acuerdo con la clase de flotadores (superficiales o sumergibles)- más o menos igual a la de la corriente que los conduce. La velocidad se mide al tomar el tiempo que emplean en recorrer un tramo de longitud conocida, dicha velocidad es el cociente de la longitud del tramo y el tiempo empleado en recorrerla.

Los flotadores superficiales son aquellos que se mantienen flotando en la superficie del agua, con ellos se obtiene la velocidad superficial. Algunos materiales que se pueden usar como flotadores son: recortes de madera, ciertos frutos y aserrín, en los que se procura que la parte no sumergida presente la menor superficie a la acción del viento.

Los flotadores sumergidos o bastones tienen forma de barra y al ser puestos en la corriente, toman una posición vertical, se extienden desde la superficie hasta cerca del fondo y proporcionan un promedio de las velocidades de corriente en el tramo que recorren, pero sólo se pueden usar en cauces de sección uniforme.

### 2.2.2. Molinete

El más común de estos instrumentos es el de tipo Price, el cual está provisto de una hélice o rueda de aspas o copas, que giran impulsadas por la velocidad de la corriente. A partir de un transductor eléctrico se indica el número de revoluciones con que gira la hélice. Esta velocidad angular se traduce a velocidad del agua (m/s), mediante una fórmula de calibración la que previamente se determina para cada instrumento en particular.

Asimismo, para que el molinete pueda colocarse a la profundidad deseada se utilizan un lastre o peso hecho de plomo con forma hidrodinámica (escandallo) y una varilla modular que sirve para sujetarlo.

En la Figura 1 se muestra un molinete tipo Price, cuyo propósito es medir la velocidad del flujo en una sección transversal de la corriente. Este instrumento se



debe calibrar con una curva, tabla o ecuación en la que se relacione el número de vueltas que se emiten por unidad de tiempo, con la velocidad del flujo.



Figura 1 Molinete tipo Price sumergido en canal rectangular

Actualmente lo que se ha hecho es dovelar la sección transversal del canal para determinar las velocidades que se presentan en esos puntos, determinando dicho dato por medio de equipos con molinete, en donde se hacen las lecturas o pruebas a 0.6 de la profundidad del canal o bien el 60 % del mismo, pero si su profundidad rebasa el metro, se hacen dos lecturas por dovela, a un 20 y 80 % y sacando un promedio de estas dos muestras tomadas.

### 2.3. Velocidad

Es complicado hacer la medición del gasto midiendo directamente el volumen descargado en un intervalo de tiempo ya que es una actividad verdaderamente complicada en la realidad y se vería reflejado en la precisión de los datos que se podrían obtener, sobre todo si se trata de hacer las mediciones en canales de riego o de suministro de agua potable en las ciudades, en donde se presentan unos caudales muy grandes y requieren de recipientes grandes para determinar el volumen que pasó a través de dicha sección. Es por ello que hoy en día se recurre a la medición del gasto en canales y ríos de una forma indirecta, apoyados de equipos de medición donde determinan la velocidad y el área.

Por consiguiente, medir estas variables, para calcular indirectamente el gasto, repercute en un aumento de la posibilidad de cometer errores de medición



asociadas a errores humanos, defectos de aparatos y a la variabilidad física del propio fenómeno que se está midiendo y perder calidad en la medición. Con todo lo dicho anteriormente, el objetivo de la medición será entonces obtener el valor de un parámetro físico con la mayor exactitud y precisión posible, disminuyendo al máximo los errores posibles. (Ochoa Alejo).

Para determinar el gasto o también conocido como caudal, que pasa por una sección se tiene la fórmula de continuidad o formula de Manning.

El caudal o gasto para un flujo uniforme y un flujo permanente, aplicando la fórmula de Continuidad, Ecuación ( 2).

Donde

$Q$  = gasto en  $m^3/s$

$A$  = área de la sección  $m^2$

$V$  = velocidad  $m/s$

Las condiciones ligadas al flujo uniforme y permanente se llaman normales. De ahí los términos profundidad normal y pendiente normal.

### 2.3.1. La velocidad media

Este concepto es sencillo de explicar, se puede decir que es una velocidad representativa del flujo, pero tampoco es fácil de conocerla en la práctica. La velocidad media ( $V_m$ ) es la magnitud de la velocidad en la dirección del flujo que resultaría si se convirtiera el área definida por todas las magnitudes de la velocidad real, ver Figura 2, en un rectángulo con una altura igual a la profanidad del canal y un ancho de  $V_m$  Figura 2 de tal manera que las áreas 1 y 2 sean de la misma magnitud.

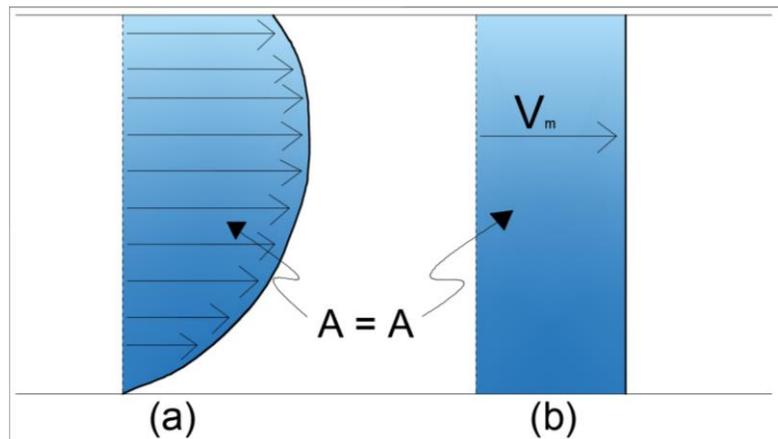


Figura 2 Concepto de "Velocidad media"

La Figura 2 muestra geoméricamente el concepto de velocidad media, por claridad de explicación se muestra solamente un perfil en una vertical del canal, lo que debe considerarse es un volumen ya que en realidad, debiera presentarse una figura tridimensional lo que complica enormemente el cálculo de  $V_m$ . De alguna manera matemática es posible hacer esta conversión y resultaría relativamente simple, siempre y cuando se conociera alguna relación funcional que posibilitara la aplicación de las herramientas matemáticas, por ejemplo si la superficie fuera con una parábola se podría integrar. Desafortunadamente esto no sucede en la práctica.

Según King (1993) se han deducido las reglas siguientes.

1. La velocidad máxima se presenta entre 5% y 25% de la profundidad aumentando el porcentaje con la profundidad de la corriente. En corrientes poco profundas con lechos rugosos, la vena de velocidad máxima se encuentra muy cerca de la superficie.
2. La curva de variación vertical de la velocidad se aproxima a una parábola de eje horizontal que pasa por el punto de velocidad máxima.
3. La velocidad media en una vertical, dentro de un error máximo del 3% y un error medio de 1%, se presenta a 0.6 de la profundidad.
4. La velocidad media en una vertical, dentro de un error máximo de 1% y un error medio nulo, es la media aritmética de las velocidades de 0.2 y 0.8 de la profundidad, respectivamente.



Esta información es muy importante, como se verá más adelante.

### 2.3.2. Distribución de velocidades

Las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas. Esto se explica por los efectos que la resistencia cortante del fluido en movimiento tiene en distintos puntos. La Figura 3 muestra la distribución de velocidades en un canal de sección rectangular. Las líneas continuas del centro de la figura corresponden a isótacas (curvas que unen puntos de igual velocidad); las líneas laterales son los perfiles de velocidad en las correspondientes secciones verticales y las que se presentan en la parte superior de la figura son los perfiles de velocidad en las secciones horizontales indicadas.

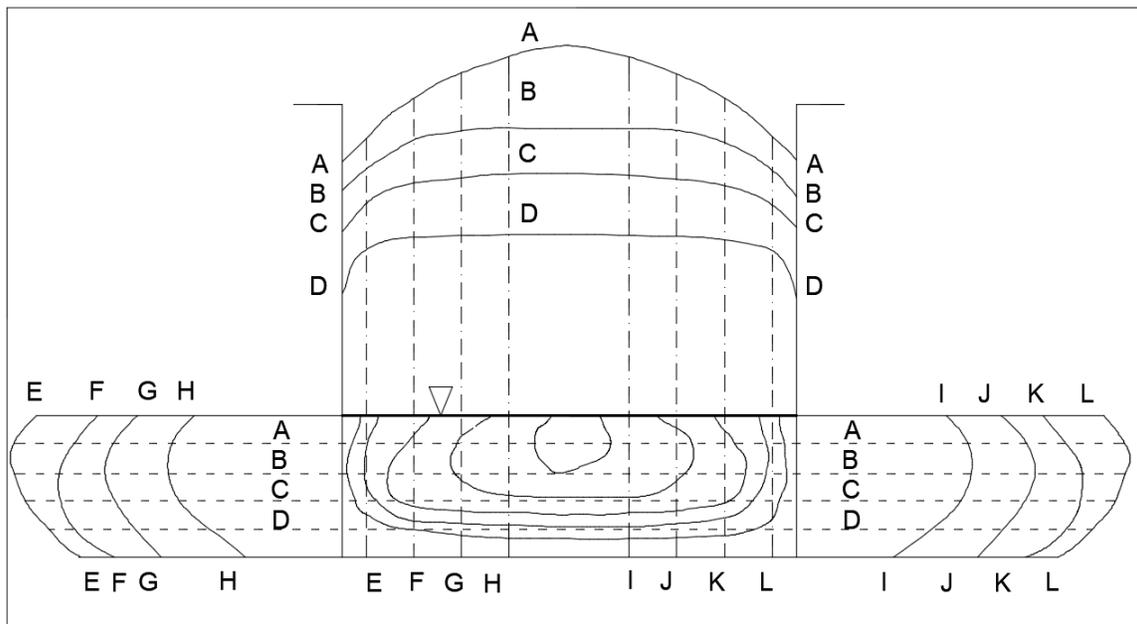
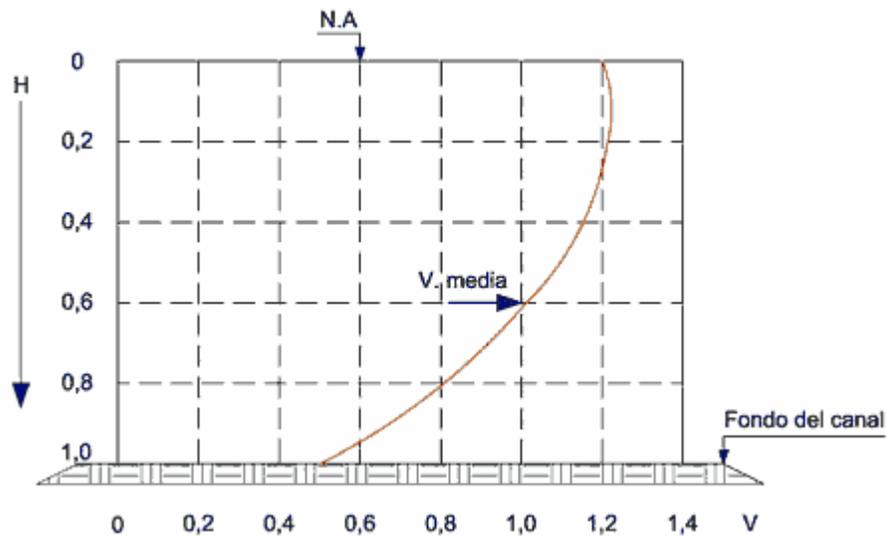


Figura 3 Perfiles de velocidad en un canal rectangular

### 2.3.3. Medidas de la velocidad

Para la medición de la velocidad de corrientes, la U.S Geological Survey recomienda dividir la sección transversal en fajas verticales. La velocidad media para cada faja se calcula midiendo la velocidad a 0.6 de la profundidad desde el piso; o si se quiere ser más preciso, se debe tomar el valor promedio de las velocidades a los 0.2 y 0.8 de la profundidad. Existen otras fórmulas para obtener la velocidad media en una vertical en función de las velocidades medidas a diferentes profundidades.





Gráfica 1 Variación de la velocidad con la profundidad

La distribución de velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, entre ellos la forma de la sección, la presencia de curvas a lo largo del canal, etc. En una curva, la velocidad se incrementa de manera sustancial en el lado convexo, debido a la acción centrífuga del flujo.

Los modelos generales para la distribución de velocidades en diferentes secciones de canal se muestran en la Figura 6.

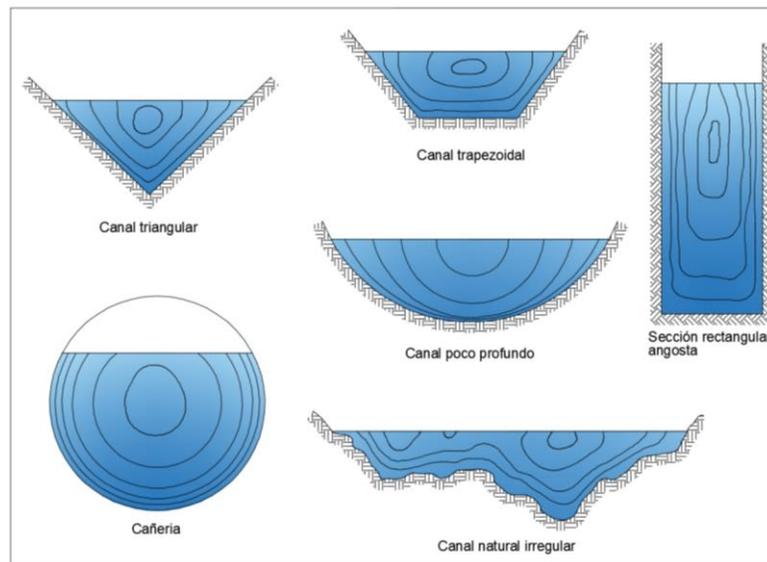


Figura 6 Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal.



# CAPÍTULO

## 3. METODOLOGÍA

Se hará la comparación de un equipo ultrasónico de tiempo de travesía con un equipo de medición de efecto doppler, porque como se ha descrito anteriormente, no hay un análisis detallado de los datos que arrojan los equipos. Se cree que al tener un mejor conocimiento sobre el funcionamiento de cada equipo, se tendrá un mejor resultado, pretendiendo dar las explicaciones de la generación del sonido así como el ultrasonido, que son los fenómenos físicos que presentan estos medidores, así como el comportamiento y la generación del mismo, mediante materiales piezoeléctricos.

### 3.1. Selección del sitio de trabajo

El canal de “Las Estacas” a la salida del balneario del mismo nombre es donde se desarrollarán las pruebas, ya que en este lugar es donde se encuentra uno de los equipos a utilizar, que es el Deltawave, donde se encuentran 4 pares de sensores colocados en forma diagonal a las orillas del canal.

### 3.2. Medición simultánea del gasto con el M9 y el Deltawave

Se utilizarán dos equipos de medición de velocidades por medio de ultrasonido, los cuales cada uno operan y funcionan en base a fenómenos físicos como son el efecto doppler y tiempo de travesía generado por ondas ultrasónicas emitidas por los equipos, mediante materiales piezoeléctricos que funcionan como emisores y receptores de los pulsos ultrasónicos.

Se harán mediciones simultáneas con estos dos equipos para hacer la comparación o qué relación existe entre las velocidades emitidas por cada equipo.



### **3.3. Recopilación de las velocidades en cada transecto del Deltawave**

Para empezar a hacer el análisis y la comparación de la relación que tienen las velocidades que arrojan los dos equipos de medición ultrasónica utilizados, se tomarán los datos de las velocidades que se presentaron a las profundidades que se encuentran los sensores de los medidores de tiempo de travesía.

### **3.4. Usando los datos del M9, reconstrucción de los perfiles de flujo en el plano horizontal a la altura de cada transecto del Deltawave.**

Al obtener los datos de distancia en la trayectoria y la velocidad correspondiente en cada altura de cada transecto del deltawave en ese punto, se graficará para ver el perfil que se presenta de la velocidad, en este caso se graficará con los datos obtenidos de los cuatro pares de sensores y así poder mostrar su perfil de velocidades.

### **3.5. Cálculo del área bajo la curva de cada perfil para estimar la velocidad media.**

Al obtener los perfiles mediante los puntos graficados, se determina el área bajo la curva mediante el método de trapecios, al obtener el área bajo la curva, se iguala con un área rectangular que sea igual para que nos ayude a determinar la velocidad media que se presenta.

### **3.6. Comparación de las velocidades medias en cada transecto con las velocidades reportadas en cada transecto.**

De acuerdo a los cuatro pares de sensores instalados en sus diferentes profundidades del equipo deltawave se harán las comparaciones con los resultados arrojados por el equipo de efecto doppler.



# CAPÍTULO

## 4. EL FENÓMENO DEL SONIDO Y EL ULTRASONIDO

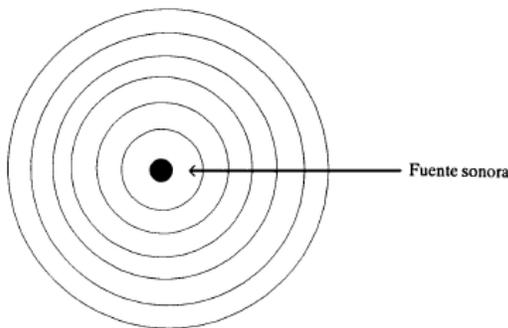


Figura 7 Ondas de propagación del sonido

La propagación del sonido viaja en ondas mecánicas “ondas de choque” (ejemplo, golpeteo) que se caracterizan por ser en forma de ondas circulares (Una onda es una perturbación en movimiento que ocasiona que las partículas del medio a través de las cuales se desplaza vibren), que son producidos por vibraciones en los cuerpos.

La propagación del ultrasonido viaja en una sola dirección, formando un haz, por medio de transductores compuestos por materiales piezoeléctricos y esto se debe a su fenómeno físico, y mediante una descarga alterna (descarga eléctrica) provoca un sonido por arriba del sonido audible que es mayor de 20,000 hertz, el cual su característica es que tiene direccionalidad, es decir, no se propaga en

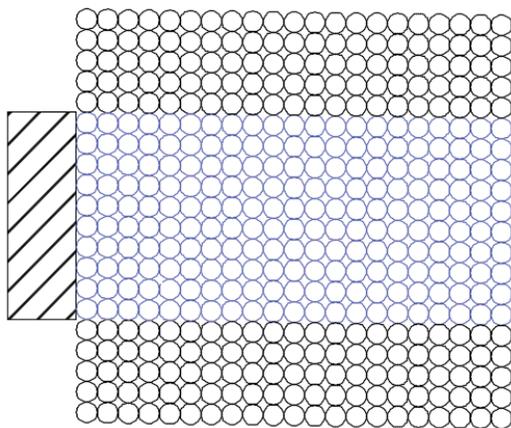


Figura 8 Moléculas sin propagación

todas las direcciones, sino solo en una. Este efecto se da a nivel molecular en el cual se presentan diferentes zonas, se presenta la zona muerta, en donde las partículas se encuentran dispersas para después pasar a la zona donde las partículas se encuentran en bloques, en el cual se puede realizar estudios de la velocidad en que viajan, su frecuencia (el número de vibraciones que un cuerpo hace por segundo). Este fenómeno se da a nivel molecular en donde



al hacer uso del fenómeno piezoeléctrico y deformarlo por una descarga eléctrica, provoca un haz ultrasónico, en donde como se muestra en la Figura 8, las partículas se encuentran unidas entre sí (como un solo cuerpo, Figura 8), al provocar este efecto la primer partícula que recibe este impacto, se lo transmite a la siguiente partícula la cual está pegada a ella y así sucesivamente es como se da la propagación del sonido.

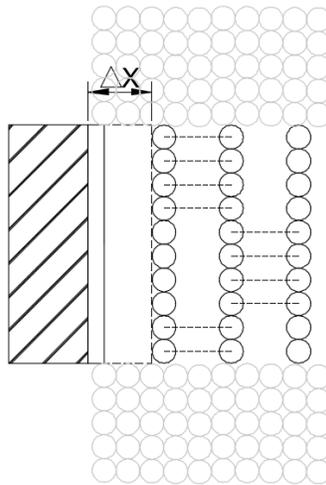


Figura 9 Direccionalidad de las partículas.

Este choque de partículas, su velocidad es tal, que ese movimiento solo es longitudinal en donde por la misma velocidad alta que se presenta no permite el empuje de partículas desplazarse de forma transversal por lo que no se propaga en todas las direcciones el ultrasonido, este choque de partículas se da en la misma dirección, la velocidad es tan rápida, que hace que el choque solo sea en una sola dirección generando la direccionalidad del ultrasonido, Figura 10.

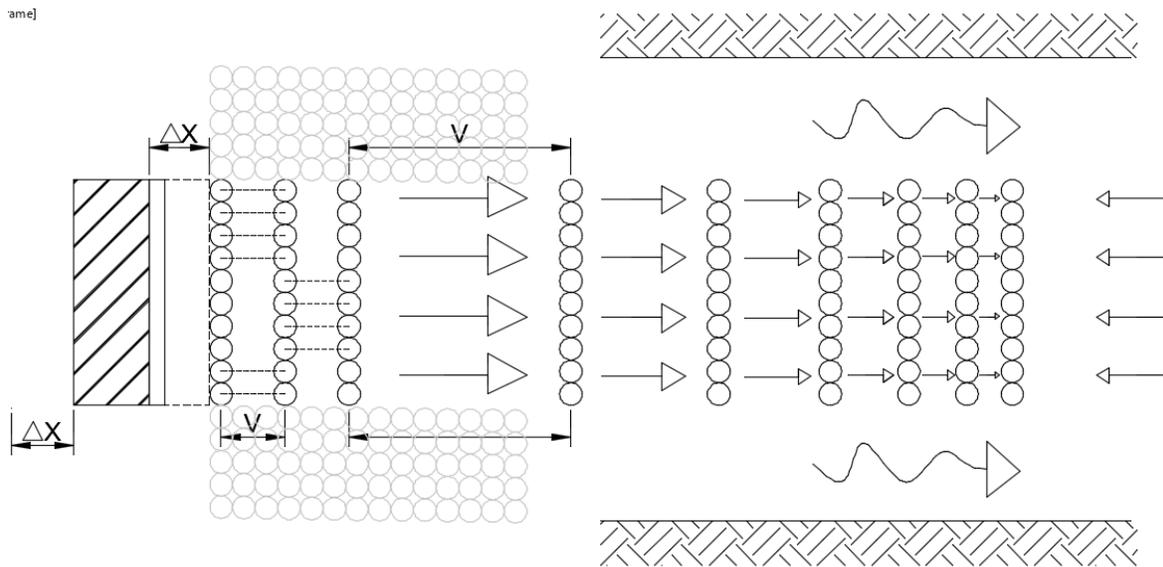


Figura 10 Esquema de la propagación de las partículas.

En donde  $\Delta X$  es la longitud de expansión del material piezoeléctrico, lo que se deforma al recibir una fuerza alterna, mientras que  $v$  es la velocidad de transmisión entre las partículas.

Al no haber un choque hacia todas direcciones de la propagación de las partículas, esta direccionalidad, permite hacer uso de este fenómeno y poder realizar la medición de velocidades en el agua por medio del ultrasonido.

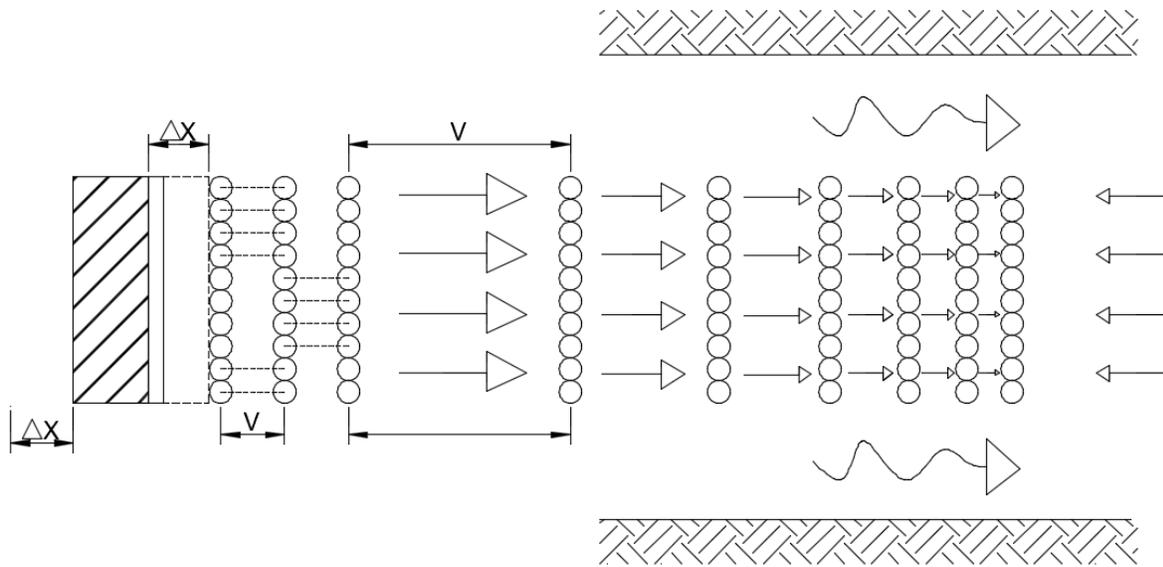


Figura 11 Direccionalidad del ultrasonido



Este fenómeno físico lo podemos relacionar con un acto que suele presentarse en espectáculos de magia, el acto de quitar el mantel de la mesa sin tirar los objetos sobre ella, es tal la velocidad que se ocupa para quitar el mantel de la mesa aun teniendo los objetos sobre ella, que no se caen (es tal la velocidad en poco tiempo que no alcanza a tirar los objetos), así se asemeja con la propagación del ultrasonido, es tal la velocidad que genera el transductor por el efecto piezoeléctrico que no permite hacer el empuje de las partículas en todas las direcciones sino solo longitudinalmente.

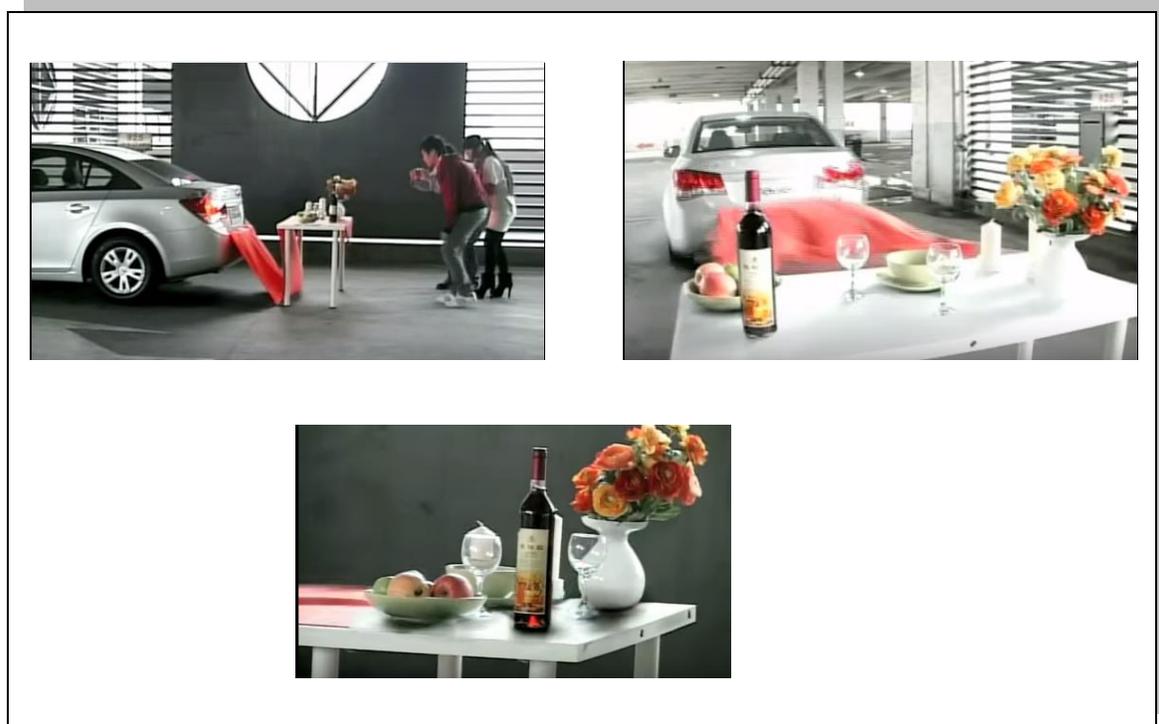


Figura 12 Esquema ilustrativo del movimiento de las partículas

El sonido se transmite en una forma de onda; para entender mejor se debe decir que existen, por lo menos, dos tipos de onda. Las ondas transversales y las ondas longitudinales. Para explicar las ondas transversales se usa el caso típico de amarrar una cuerda a una pared o un lugar fijo, tomar el otro extremo y moverla de arriba hacia abajo. En estas circunstancias, cada parte de la cuerda se mueve únicamente para arriba y para abajo a pesar de que la onda se mueva hacia el frente. Éste, es un movimiento armónico de cada parte de la cuerda; si se colocara una hormiga en un punto de la cuerda, la hormiga solamente se movería para arriba y para abajo, pero la onda se desplaza hacia el frente. De esta manera,



cuando el movimiento del medio por donde pasa la onda es perpendicular al movimiento de la onda, se tiene una onda transversal. Al ser perpendicular el movimiento del medio, respecto al desplazamiento de la onda, se tiene  $90^\circ$  entre las trayectorias.

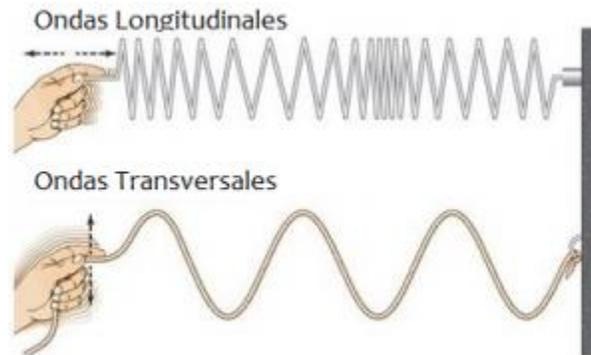


Figura 13 Ejemplo de onda transversal y longitudinal.

Otro caso fácil de entender, son las olas del agua; si una persona se encuentra en un barco sobre el agua y pasan las olas, las olas no arrastran propiamente al barco en la dirección en la que se mueven, simplemente suben y bajan al barco aunque claramente la onda, o la ola, por ejemplo de izquierda a derecha, el barco simplemente sube y baja, y será arrastrado cuando esté muy en la orilla y ya no sea una onda propiamente; al “romper” la ola se convierte en una corriente como si fuera un río.

El otro tipo de onda es el longitudinal. El caso es curioso porque las partículas del medio por donde viaja la onda sí se mueven en la misma dirección de la onda. Su movimiento ya no es perpendicular, ahora es paralelo. El caso más conocido que se puede visualizar son los resortes llamados slinkin (los que se utilizan para jugar Figura 14).



Figura 14 Juguete Slinky (ejemplo de onda longitudinal).

Cuando una persona agarra un slinky y lo estira un metro con sus brazos, toma varias espiras con su mano derecha, suelta esas espiras y coloca la hormiga en la espira que soltó, la hormiga se va a mover de izquierda a derecha hasta que se detenga y la onda se va a mover justamente hacia la izquierda. Las ondas ya son paralelas ya no son perpendiculares como el caso anterior y ahí se ve cómo va viajando la perturbación de la primera espira que se suelta pero no es la primera espira la que está viajando es la perturbación que esa primera espira la pasa a la segunda, se la pasa a la tercera y empieza a viajar una especie de compresiones y expansiones de espiras, entonces las ondas longitudinales son aquellas en donde el medio que estamos perturbando (que se mueve armónicamente) lo hace paralelo en la dirección en donde viaja la onda, ¿Cómo se mueve una espira? De derecha a izquierda y ¿Cómo se mueve la onda? Hacia la derecha, por lo cual son paralelas, el primer caso era perpendicular y ahora es paralela y esas son las ondas longitudinales. El sonido es una onda longitudinal

#### 4.1. ¿Cómo se produce el sonido?

Siempre que se perturbe un medio, siempre que haga vibrar algún medio, cualquier medio, esa vibración al estar rodeada de aire va a provocar que las moléculas del aire se compriman y se expandan, y esa compresión y expansión llega al cerebro a través de los oídos y lo traduce como sonido. Por ejemplo, se golpea un material de metal, no vibra tanto, pero ese golpe produce vibraciones milimétricas o más pequeñas sobre el metal, esas vibraciones hacen vibrar el aire



y las moléculas empiezan a moverse en una onda longitudinal y esas vibraciones llegan al oído y es lo que el humano traduce como sonido.

De las cuatro interacciones fundamentales (fuerzas nucleares, fuerzas electromagnéticas, fuerzas débiles y fuerzas de gravedad), la electromagnética es la que se manifiesta en este fenómeno físico, son las interacciones de las cargas eléctricas de una molécula con otra, cuando la molécula se mueve interactúa eléctricamente con las que siguen y las repele, y esta repela a la que sigue y a las que siguen y por eso empieza a viajar la onda.

El sonido requiere algún medio de propagación, por ejemplo en los metales viaja mejor el sonido que en el aire, por ejemplo en la luna no hay aire, si se golpeara un material, no haría sonido, ya que no hay el medio de propagación.

Existen experimentos sencillos; por ejemplo, se coloca una campana de vidrio y se sella a la mesa y por un orificio se empieza a extraer el aire con una bomba de aire, queda una campana de vacío, previamente se le pone un despertador en el interior y empieza a tocar el despertador, pero no se escucha nada, porque ya no hay aire por dentro que haga viajar las ondas de sonido.

#### **4.2. ¿Qué es el ultrasonido?**

El ultrasonido no se propaga como el sonido de baja frecuencia, el oído humano con un adecuado funcionamiento, puede escuchar entre los 20 y 20,000 Hertz. Menos de los 20 Hertz es infrasonido y no es audible para el ser humano. Por otro lado, animales como el perro, los murciélagos o los delfines, pueden escuchar más allá de los 20,000 Hertz, es decir escuchan ultrasonido.

Todas las ondas tienen energía y dicha energía depende de la frecuencia y de la amplitud de la onda, entre otras cosas. Por ejemplo la luz solar, entre mayor frecuencia tenga más va a quemar, así como el azul produce más quemaduras que el rojo porque hay mayor frecuencia; lo mismo pasa con el sonido entre más agudo sea el sonido más energía va a tener porque la onda es de mayor frecuencia.

El sonido sufre refracción como todas las ondas, y todas las ondas tienden a rodear los obstáculos que se van a encontrar a lo cual se le conoce como dispersión, esa es una característica de la onda. La dispersión depende de la frecuencia, si la frecuencia es muy baja, se dobla muy fácil, pero si la frecuencia



es muy alta, un sonido muy agudo tiende a viajar más en línea recta y se dobla menos, por eso el ultrasonido tiende a viajar en línea recta y no se dispersa.

Los medidores de ultrasonido utilizados en las pruebas son de dos tipos, uno es de tiempo de travesía y el otro es de efecto doppler. En la aplicación, se encuentra el canal y lo que se hace es colocar dos sensores A y B en forma diagonal en el talud del canal, ahora la señal que sale de A a B al viajar a favor de la corriente viaja más rápido que si viajara cuando la señal va de B a A que es cuando va en contra de la corriente, ahora la pregunta sería, ¿Por qué se presenta este fenómeno? Porque hay una componente de la corriente de agua en la dirección aguas abajo que se suma vectorialmente a la propia velocidad del ultrasonido, entonces al sumarse las dos componentes da una resultante que genera la diferencia de tiempos.

### **4.3. El velocímetro doppler**

Un medidor acústico Doppler de velocidad, ha sido desarrollado para medir las velocidades del agua en cauces abiertos, a unos pocos centímetros del sensor. Como la distancia de la medición de la velocidad es pequeña, proporciona datos de velocidad que podemos considerar como velocidades puntuales, para efectos prácticos, el uso de este instrumento está limitado a medir el caudal en ríos poco profundos.

Todos los Velocímetros Acústicos Doppler funcionan enviando un corto pulso acústico desde un transductor activo. Cuando el pulso atraviesa el punto a donde se orientan los transductores pasivos, el eco es registrado por cada uno de ellos. Estas señales son procesadas para determinar sus desviaciones Doppler.

Los perfiladores de corriente de efecto Doppler acústicos pueden medir de forma eficaz las velocidades de los ríos que sean necesarias para comprender mejor los complejos procesos geomórficos, hidrológicos y ecológicos que afectan a los cauces fluviales, así como su interacción en condiciones normales y extremas.

Son un instrumento que suelen instalarse sobre embarcaciones (midiendo hacia abajo), aunque también puede fijarse en el fondo (midiendo hacia arriba) o en la orilla (midiendo hacia un lado).

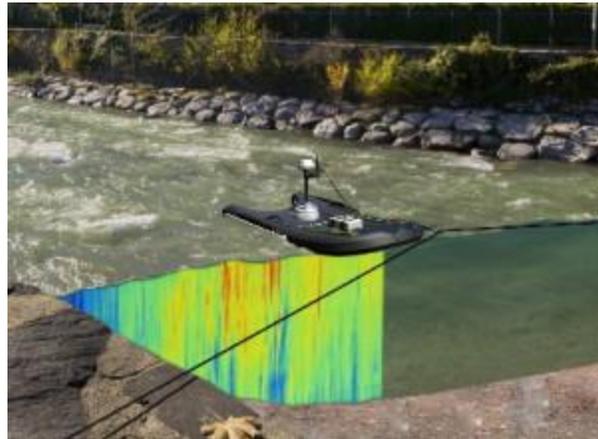


Los perfiladores necesitan que el sensor esté en contacto con el agua, para así poder transmitir y medir los pulsos sonoros (pings) dirigidos a través de la columna de agua. Los reflejos de estos pulsos sonoros, o bien el eco procedente de pequeñas partículas o burbujas suspendidas que se mueven con la corriente de agua, producen un desplazamiento en la frecuencia del sonido transmitido, a partir del cual se determina la velocidad. Este fenómeno, el desplazamiento Doppler, es el mismo que el cambio en el tono percibido por una persona cuando un tren que está accionando un silbato pasa junto a ella.

Los pulsos enviados en diferentes direcciones o haces (normalmente, 3 ó 4) desde el perfilador detectan diferentes componentes de la velocidad, de forma paralela a cada uno de los haces. Suponiendo que las corrientes sean uniformes (homogéneas) dentro de las capas de espesor constante, se emplea una transformación trigonométrica para convertir la velocidad registrada a lo largo de los haces en tres componentes de velocidad asociadas a un sistema de coordenadas cartesianas orientado hacia el instrumento.

Cada pulso acústico procedente de un instrumento ultrasónico de efecto doppler instalado sobre una embarcación origina mediciones de la velocidad a lo largo de la profundidad del caudal.

El uso de los medidores ultrasónicos en general ha sido destinado para la medición precisa de flujo en proyectos de investigación en laboratorios o investigaciones de campo en donde se requieran hacer mediciones con más detalle de las condiciones hidrodinámicas en canales o ríos. Para otros fines distintos, no es común; dado que es relativamente más fácil tener una sección de aforo donde se tengan instalados dispositivos calibrados para diferentes condiciones de flujo, como vertedores, Parshall, compuertas entre otros.



*Figura 15 Acústico doppler M9*



# CAPÍTULO

## 5. PRUEBAS

Los equipos ultrasónicos que se utilizaron para realizar las pruebas en campo son el M9 (Figura 16) que funciona mediante el fenómeno efecto doppler y el Deltawave (Figura 17) que es por medio del tiempo de travesía (tiempo de retraso o la diferencia de tiempo entre los pulsos ultrasónicos arrojados).



Figura 16 Equipo M9



Figura 17 Equipo Deltawave



Las pruebas realizadas en el canal a la salida del balneario “Las Estacas” fueron hechas en diferentes ocasiones para tener y presentar mejores resultados en diferentes condiciones.

Apoiados por los operadores de la estación hidrométrica (por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) del organismo de cuenca Balsas de la dirección de infraestructura hidráulica distrito de riego 016 estado de Morelos) para realizar las pruebas utilizando el equipo ultrasónico de tiempo de travesía instalado en esta sección del canal, encontrándose dentro de la estación el centro de control del medidor.



Figura 18 Estación de medición canal “Las Estacas”.

En esta estación de medición de tiempo de travesía (Figura 18) cuenta con el equipo Systec deltawave que consta de 4 sensores colocados a diferentes profundidades en forma diagonal en los taludes del canal como se muestra en la Figura 19.

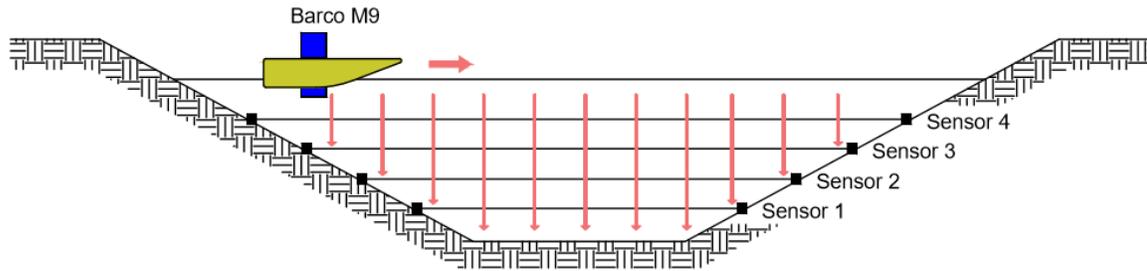


Figura 19 Representación de los cuatro pares de sensores en sus diferentes profundidades.

Se hicieron las mediciones simultáneas con los dos equipos ultrasónicos M9 y Deltawave como se muestra en la Figura 20, haciendo el recorrido del barco M9 de forma transversal al canal, mientras que los pares de sensores de tiempo de travesía se encuentran ubicados de forma diagonal a las orillas del canal.

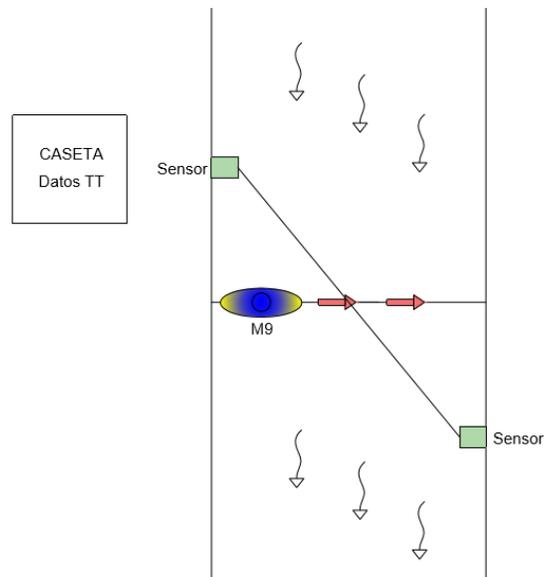


Figura 20 Representación de las mediciones simultáneas.

Una vez llegando al sitio donde se realizaron las pruebas, se realizó el montaje del barco, para realizar las pruebas.



## 5.1. Equipos utilizados

### 5.1.1. ATT Deltawave de Acuasonic

El Deltawave es un sistema que cuenta con 4 pares de sensores colocados en las paredes del talud del canal ubicados en forma diagonal, y cuenta con una caseta de control donde son mostradas las velocidades que presenta el canal.



Figura 21 Sistema Deltawave



Este equipo muestra en tiempo real las velocidades presentadas de los 4 pares de sensores en sus cuatro diferentes profundidades mostrándolas en la pantalla que se visualiza en la imagen, cuenta con una memoria en donde quedan almacenados todos los datos obtenidos, para que después se puedan descargar y ser utilizados. Estos datos de las velocidades presentadas son almacenados cada 5 minutos, cada 30 minutos y cada hora. Así como también reportes mensuales y hasta anuales, arrojando promedios de las velocidades.

Los 4 pares de sensores se encuentran localizados a diferentes profundidades del canal. El primer par de sensores se encuentran ubicados a una profundidad de 0.332 metros; el segundo par de sensores se encuentran ubicados a una profundidad de 0.627 metros; el tercer par de sensores se encuentran ubicados a una profundidad de 0.929 metros y el cuarto par de sensores se encuentran ubicados a una profundidad de 1.224 metros (Figura 22).



Figura 22 Aforador de tiempo de travesía, situado en los márgenes laterales del canal

Este equipo es un instrumento acústico que mide la velocidad del agua basado en el método tiempo de travesía mediante la suma vectorial, de la velocidad de la propagación de una onda acústica y la velocidad del agua. Esto se logra por el envío de un pulso acústico que viaja hacia aguas arriba y un pulso hacia aguas abajo) y mediante la medición de los tiempos de traslado de los pulsos en ambas dos direcciones, se obtiene el promedio de la velocidad axial del flujo en la trayectoria donde fueron emitidos los pulsos. Existe una diferencia de tiempos de traslados, por lo que eso es la pauta para determinar dicha velocidad.

Para la determinación del caudal el ATT utiliza el método denominado "área -



velocidad" (método que ya fue mencionado anteriormente), en donde, se dovela verticalmente la sección transversal considerando áreas de promediado de la velocidad para cada trayectoria del pulso ultrasónico. La suma de todas las áreas de promediado multiplicada por la velocidad media de cada par de sensores, arroja el caudal total en la sección en un intervalo de muestreo.

La técnica de medición de gasto por medio del tiempo de tránsito de una señal ultrasónica utiliza el método de Área-Velocidad para calcular el gasto, para lo cual se utilizan promedios de las velocidades tomadas por el instrumento en franjas que pueden ser verticales u horizontales. La medición de gasto por medio del tiempo de tránsito de una señal ultrasónica, es similar a medir con molinete; sin embargo, mientras la medición con molinete se basa en la estimación de la velocidad en una serie de franjas verticales distribuidas en lo ancho de la sección de aforo, en la técnica de ultrasonido el muestreo de la velocidad se hace en franjas horizontales distribuidas verticalmente.

Las recomendaciones de instalación del aforador de tiempo de travesía en un canal según el manual, son las siguientes:

- El tramo donde se instalará el sistema debe ser de sección regular y con flujo uniformizado;
- Para condiciones de alta velocidad del flujo se debe evitar las zonas en donde se tengan mezclas de aire-agua;
- La presencia de altas concentraciones de sedimentos puede producir deficiencias en la medición de la velocidad del agua con los sensores de tiempo de travesía, y
- La calidad de la medición de la velocidad está en función directa del procedimiento de instalación de los sensores de tiempo de travesía, así como la estimación de la curva áreas elevaciones.

Este sistema no cuenta con un procedimiento de medición en donde intervenga la mano del hombre, ya que solo se monitorean los resultados que son guardados en la memoria del equipo. En este caso, como los valores de las velocidades de los 4 pares de sensores son guardados cada 5 minutos, se optó por grabar las velocidades arrojadas en el monitor, puesto que en el monitor presenta velocidades cada segundo pero no son almacenadas, si no cada 5 minutos, es por ello que para presentar un mayor número de resultados se grabaron las velocidades presentadas en el mismo instante que se tomaron los datos con el equipo M9.



### Componentes del sistema del aforador ATT

Los componentes del sistema de medición ATT para tuberías y canales se pueden ver en la Tabla 2:

Tabla 2 Componentes del sistema Deltawave

	Componente	Función	Elementos asignados al comp
1	Medidor	Obtener la información para poder estimar el gasto	Sensores con sus sujetadores
2	Cableado	Conducir la señal de los sensores a la unidad electrónica Conducir la señal de la unidad electrónica a la pantalla y a la memoria no volátil	Cables con sus conectores y conductos de protección
3	Unidad electrónica	Recibir los datos enviados por el medidor, Procesar los datos Permitir la configuración del sistema por medio de un interrogador portátil Transferir datos a la pantalla Transferir datos a la memoria no volátil Contar con un puerto de salida para telemetría	Tarjeta(s) de electrónica con su caja, conectores y salidas de comunicación necesarias.
4	Pantalla	Desplegar los datos enviados por la unidad electrónica.	Pantalla con su caja.
5	Memoria no volátil	Almacenar los datos enviados por la unidad electrónica Permitir la transferencia de los datos almacenados a un interrogador portátil	Tarjeta(s) de electrónica con su caja, conectores y salidas de comunicación necesarias.
6	Unidad de telemetría	Recibir los datos enviados por la unidad electrónica y enviarlos a una página Web.	
7	Alimentación eléctrica	Suministrar la energía necesaria para el funcionamiento adecuado de todos los componentes eléctricos y electrónicos del sistema.	Baterías, control de carga de las baterías, celda(s) solar(es), cables eléctricos, supresor de picos, fusibles con sus clemas, caja para alojar a las baterías, según sea el caso.



	Componente	Función	Elementos asignados al comp
8	Gabinete	Alojar a todos los componentes del sistema de medición que no pueden quedar expuestos a la intemperie. Alojar las baterías de la alimentación eléctrica <sup>(*)</sup>	Caja(s) y rieles
9	Interrogad or portátil	Configurar la unidad electrónica Recuperar los datos de la memoria no volátil	

El medidor ATT necesita que el canal mantenga una limpieza adecuada, con lo cual se debe eliminar la maleza en el sitio de instalación y además verificar con cierta frecuencia que no se tenga una acumulación de maleza y/o sedimento en el fondo. Cuando se tenga una acumulación de sedimento mayor a 5 cm se debe proceder a su eliminación, porque esto introduce un error sistemático en la determinación del caudal.

En el caso de los sensores, estos se deben limpiar al menos de la superficie de emisión de señal, la frecuencia debe hacerse por lo menos una vez al año

### *Verificación del caudal*

La modificación en la programación del equipo ATT, por personal no acreditado para tal uso, puede provocar que se tengan errores graves en la medición del caudal. No obstante lo anterior, si existiera una duda en el caudal circulante se puede realizar una prueba de verificación. Esta prueba, debe ser con un procedimiento que sea acorde con la precisión y exactitud del equipo ATT4. Esto implica que una prueba de aforo clásico (un solo punto a 0.6 del tirante y menos de 20 dovelas en la sección) puede tener discrepancias en la verificación del caudal, porque se puede utilizar la prueba de tres puntos en la vertical (0.2, 0.6 y 0.8 el tirante) y 20 dovelas mínimo de aforo y por supuesto que el molinete tenga la curva de calibración vigente.

### *Operación del sistema*

Los equipos ATT están configurados para trabajar en forma continua y desplegar los datos con un promedio de al menos cinco minutos, en este



intervalo se actualizarán en la pantalla de datos la velocidad en cada sensor, el nivel del agua, el gasto y el volumen acumulado.

Dependiendo del nivel de operación es común que la medición de velocidad en los transectos deje de operar, esto es normal ya que los sensores se encuentran fuera del agua. Una vez que aumente el nivel de operación, el equipo ATT está programado para reinicializar la medición del par transductores que se encuentren por abajo del agua.

Si por alguna circunstancia un par de sensores deja de medir y estos se encuentran sumergidos con un nivel de agua mayor a 0.30m, entonces se tiene que verificar lo siguiente:

- Verificar que no existan obstáculos o maleza que impida la comunicación entre los sensores,
- Verificar que los cables de comunicación de la unidad electrónica y los sensores no tengan un daño físico.
- Verificar que los sensores no hayan sido golpeados y se encuentren con daño físico permanente.

### *Registro de variables geométricas en campo*

Es conveniente tener un registro de las variables geométricas del sistema instalado, ya que serán de utilidad cuando se requiera hacer un mantenimiento mayor. Deberá anotar y conservar los valores de las variables geométricas; la siguiente Figura 23 Variables geométricas. muestra a detalle cada una de ellas.

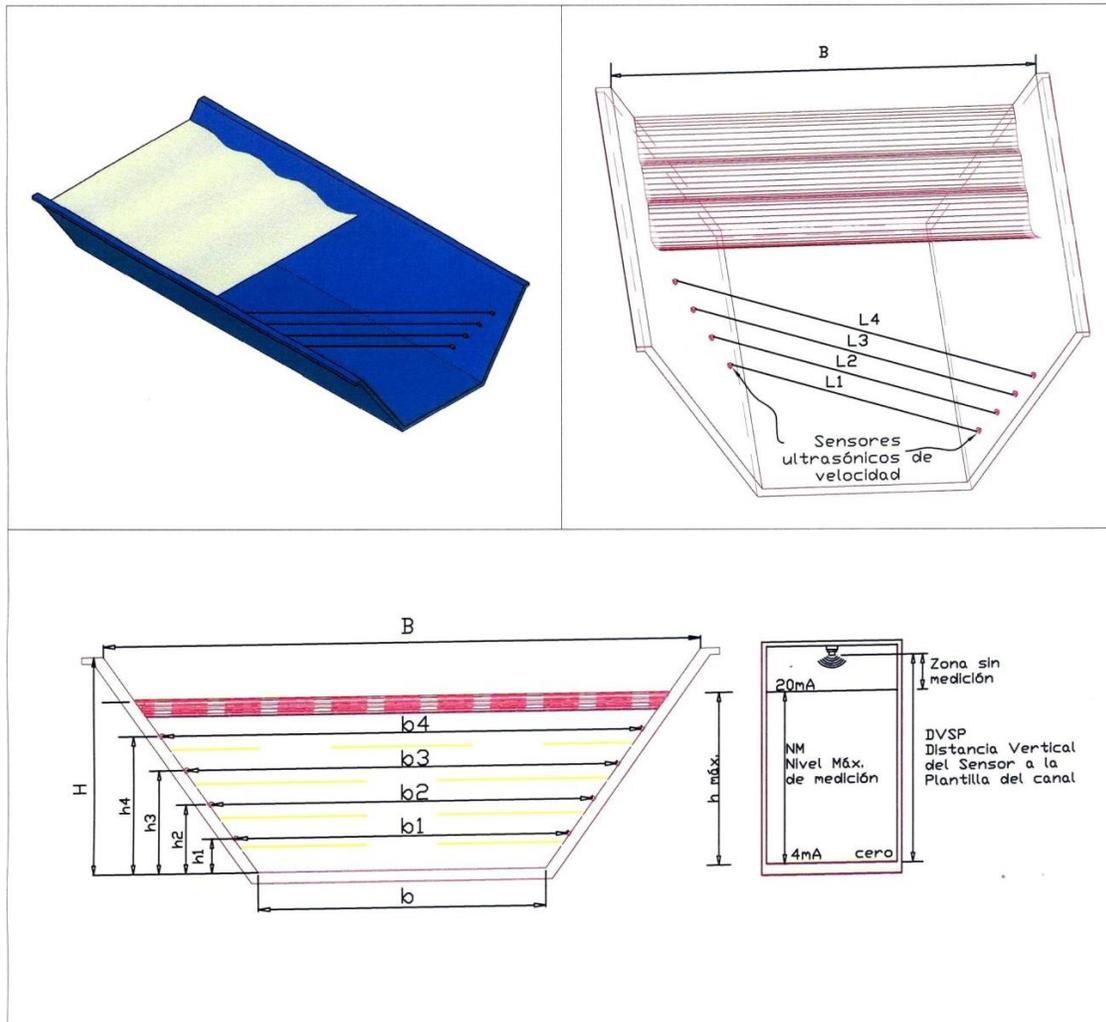


Figura 23 Variables geométricas.

### Descripción general del sistema

La unidad *Deltawave* recibe los datos de los sensores de tiempo de tránsito y del sensor del nivel, calcula el flujo y totaliza el gasto, despliega los datos en tiempo real y almacena los datos registrados

Por medio de su pantalla de toque se puede acceder a diferentes menús para obtener mayor información tanto de los sensores como de la programación y valores.

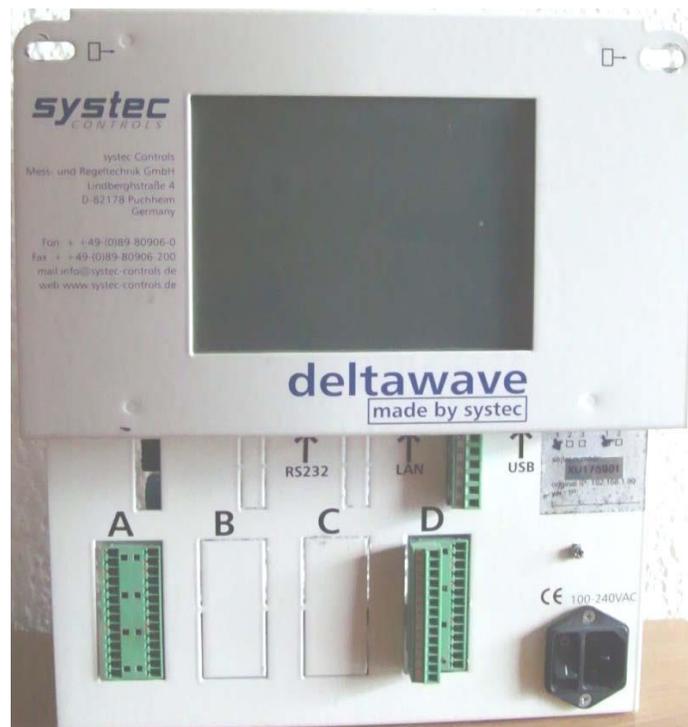
En esta unidad se conectan los sensores de tiempo de tránsito y el medidor de nivel de agua y al mismo tiempo recibe información de ellos, su concepto de multitargeta ofrece alta confiabilidad por el uso de tarjetas independientes,



fácil de usar, disponibilidad de salidas y entradas analógicas y digitales, pantalla de toque, capacidad de almacenamiento

La unidad *Deltawave* cuenta con 4 módulos de tarjeta A, B, C y D, además de otros puertos así como el interruptor de energía

- Módulo A: Es donde se conectan los sensores de tiempo de tránsito, hasta 4 pares.
- Módulo B y C: Opcional para conectar 4 pares adicionales cada uno.
- Módulo D: Es donde se conecta el medidor de nivel ultrasónico ( se conectan aquí sensores adicionales con salida 4-20 mA).
- Puerto RS232: Para conectar la unidad a una computadora.
- Puerto LAN: Permite la integración con el Internet o la intranet. Puede consultar y descargar los archivos almacenados y también los parámetros de configuración <http://192.168.1.99>. Puede ingresar por medio de un protocolo <ftp://192.168.1.99>. Asimismo la unidad tiene integrado un servidor http con información variada. También puede conectarse desde una computadora mediante un cable de red ethernet *cruzado* (Una configuración de cable de red que permite conectar dos equipos entre sí.)
- Puerto USB: Para conectar una memoria USB para descargar los datos registrados o programar el equipo.
- Interruptor de energía: Es donde se conecta la fuente de energía a la unidad y desde donde se enciende el equipo.



*Sensor de nivel ultrasónico:* Mide el nivel de agua por medio de ultrasónico, está diseñado para operar en depósitos abiertos o cerrados, alberga en su interior el transductor ultrasónico y el sensor de temperatura. Cada pulso es reflejado como un eco y percibido por el transductor.

El eco es procesado por el sensor de nivel ultrasónico.

*Sensores de tiempo de tránsito:* Miden la velocidad del agua a una frecuencia de 500 kHz y cuentan con un rango de hasta 50 metros. Son libres de mantenimiento y envía la señal de medición a la unidad *Deltawave* (IMTA, Aforador tiempo de travesía).

### *Determinación de la velocidad media*

Un pulso ultrasónico viaja más rápido en la dirección de la corriente del agua que en sentido contrario. La velocidad de un pulso de sonido que viaja en una diagonal a través de la corriente en la dirección de ésta, se incrementará en virtud de la componente de la velocidad de la corriente. Por el contrario, un pulso de sonido viajando aguas arriba se retrasará. La diferencia en el tiempo de



tránsito en las dos direcciones puede usarse para la velocidad del sonido en el agua y la componente de la velocidad a lo largo de la trayectoria por la que viajan los pulsos ultrasónicos.

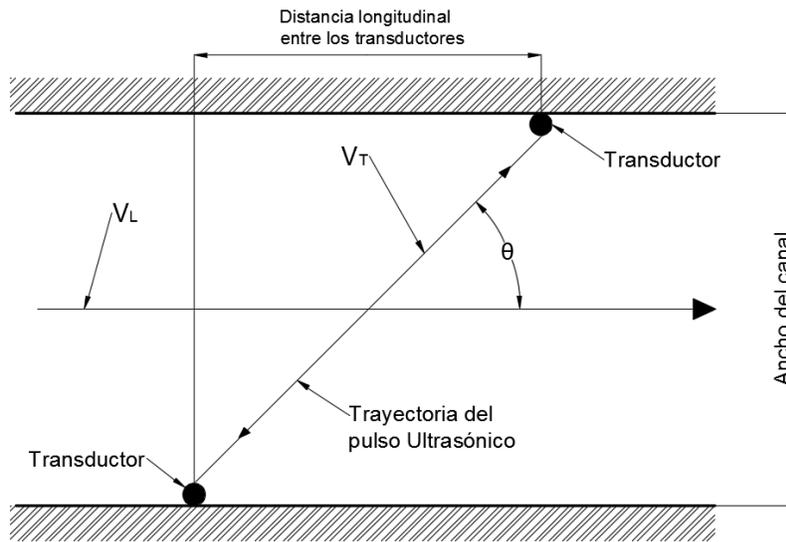


Figura 24 Esquema ilustrativo del principio de funcionamiento.

En la Figura 24 el  $V_t$  es la componente de la velocidad en la dirección de la trayectoria del pulso ultrasónico;  $V_L$  es la velocidad en la dirección de la corriente y  $\theta$  es el ángulo que se forma entre la trayectoria del pulso ultrasónico y la dirección de la corriente. El tiempo de tránsito de la señal ultrasónica entre los transductores A y B está dado por las siguientes ecuaciones:

$$t_{AB} = \frac{L}{(c - V \cos \theta)} \quad (5)$$

$$t_{BA} = \frac{L}{(c + V \cos \theta)}$$

Donde  $t_{AB}$  es el tiempo de tránsito del transductor A hacia el transductor B, en segundos;  $t_{BA}$  es el tiempo de tránsito del transductor B hacia el transductor A, en segundos; L es la longitud de la trayectoria entre los transductores, en metros y c es la velocidad del sonido en el agua, en metros sobre segundo. Resolviendo para la velocidad en la dirección de la corriente  $V_L$  se tiene que:



$$V_L = \frac{L(t_{AB} - t_{BA})}{2\cos\theta t_{AB}t_{BA}} \quad (6)$$

Los tiempos de tránsito de la Ecuación ( 6) son para trayectoria en el agua y no incluyen los retardos debidos al tiempo de tránsito de la señal a través de la pantalla de los transductores y cables, ni los retrasos en los circuitos de transmisión y recepción, ni tampoco los retardos de la detección de la señal (la cual puede ser afectada por distorsiones). Estos retardos fijos no afectan la diferencia del tiempo de tránsito ( $t_{AB}-t_{BA}$ ), pero si puede afectar el término ( $t_{AB} \times t_{BA}$ ). Este efecto es muy importante para canales pequeños o donde la longitud del cable entre los transductores es grande.

Los valores de retardo para los transductores y circuitos electrónicos comúnmente se sitúan entre 4  $\mu$ s y 20  $\mu$ s. El retardo en los cables es de 1  $\mu$ s por cada 200 metros de cable; por ejemplo, 100 m de cable en la dirección de la corriente y 100 en dirección contraria. Si se consideran los retardos la ecuación ( 6), se transforma en:

$$V_L = \frac{L(t_{AB} - t_{BA})}{2\cos\theta(t_R - \delta)(t_F - \delta)} \quad (7)$$

Donde  $t_R$  es el tiempo de tránsito desde la unidad electrónica siguiendo un recorrido del transductor A hacia el transductor B y de regreso a la unidad, en segundos;  $t_F$  es el tiempo de tránsito desde la unidad electrónica siguiendo un recorrido del transductor B hacia el transductor B y de regreso a la unidad, en segundos;  $\delta$  es el retardo de la señal. Para un canal de un metro de ancho y un ángulo de 45° entre la trayectoria del pulso ultrasónico y la dirección de la corriente y un retardo total de la señal de 10  $\mu$ s, se puede generar un error de 2% en el cálculo de la velocidad, si se ignorara el efecto del retardo. Para canales más anchos efecto del retardo en la señal se reduce proporcionalmente con la longitud de la trayectoria y puede ser insignificante.

Debe aclararse que el cálculo de la velocidad del agua es independiente de (a) independiente de la velocidad del sonido en el agua; (b) proporcional a la diferencia de los tiempos de tránsito; (c) inversamente proporcional al producto de los tiempos de tránsito y (d) dependiente en gran medida del ángulo entre la



trayectoria de la señal y la dirección del flujo (ver Tabla 1).

Tabla 3 Errores sistemáticos cuando la dirección de la corriente no es paralela al eje del canal.

Ángulo $\theta$ , en grados	Error en la velocidad para 1° de diferencia entre la dirección real de la corriente y el eje longitudinal
30	1
45	1.7
60	3

En la medición de gasto en canales abiertos normalmente se considera que los transductores se localicen en los márgenes opuestos del canal y que el ángulo  $\theta$ , debe tener valores entre 30° y 65°. Si se tienen ángulos mayores la diferencia entre los tiempos de tránsito puede ser muy pequeña y sujeta a mayores incertidumbres especialmente para bajas velocidades. Obviamente un ángulo de 90° no mostrará diferencia entre los tiempos de tránsito y la velocidad no puede determinarse. Por otro lado, cuando se tienen ángulos grandes, también se puede tener un error en la estimación de la velocidad resultante de suposiciones en la evaluación del ángulo; ello debido a la presencia de la función coseno que relaciona el tiempo de tránsito con la velocidad.

Si se tienen ángulos menores de 30°, se pueden tener problemas, ya que la longitud de la sección de aforo y el flujo puede no ser uniforme y la dirección del flujo que se relaciona con la trayectoria puede no ser constante. Por otro lado se pueden tener inconvenientes prácticos en la selección del sitio de aforo, ya que la longitud requerida puede ser considerable. Finalmente, la excesiva longitud de las trayectorias acústicas pueden provocar problemas de intensidad de la señal así como de reflexión de señal en el fondo del canal o en la superficie, especialmente si se tienen gradientes verticales de temperatura.

Para calcular el gasto, en el sistema de aforo se debe tener una relación determinada entre la profundidad del agua y el área de la sección transversal, deberá poder determinar el tirante de agua, la velocidad en cada trayectoria y debe ser capaz de manejar las funciones matemáticas necesarias para calcular el gasto a partir de datos almacenados y datos tomados directamente del flujo



(CONAGUA, 2016).

El aforador de tiempo de tránsito se tiene un “conjunto de medición” consistente en:

- (a) sensores
- (b) cables de conexión entra el sensor y la unidad electrónica
- (c) unidad electrónica
- (d) sensor de nivel (para calcular el área)
- (e) caseta de protección
- (f) gabinete
- (g) pozo de lectura
- (h) celda o panel fotovoltaico
- (i) batería
- (j) caseta de protección

El arreglo general se muestra en la Figura 25 Conjunto de medición para el aforador de tiempo de tránsito.

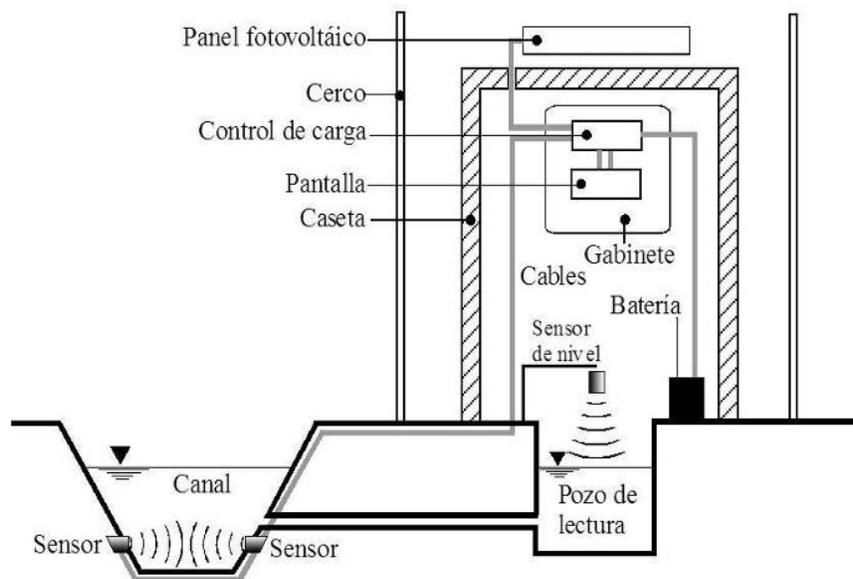


Figura 25 Conjunto de medición para el aforador de tiempo de tránsito.

Se aclara que el arreglo anterior se ocupa para el caso de un aforador de tiempo de tránsito colocado en una corriente a superficie libre. El arreglo básico de una estación de aforo ultrasónico está configurado con una sola trayectoria acústica

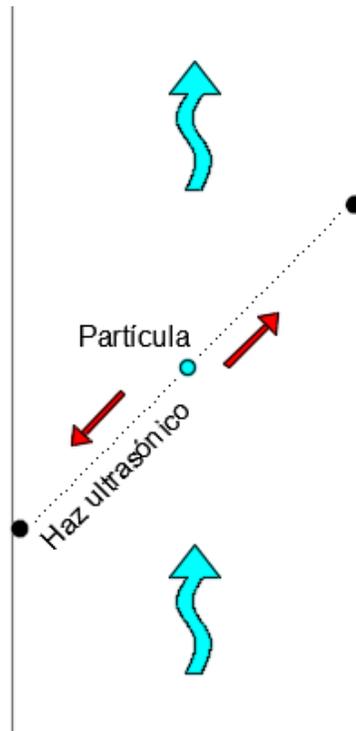


y el par de transductores pueden montarse en un plano vertical. Si fuera posible montar los transductores sobre rieles verticales y desplazarlos sobre éstos, sería posible determinar el perfil de velocidades de una manera análoga a como se haría con un molinete. En este caso, los transductores se colocarían en una elevación tal que el muestreo de velocidades se acerquen lo más posible al valor de la velocidad media de la sección.

### *Determinación del tiempo de retraso*

El equipo Deltawave como ya se mencionó en capítulos atrás, funciona y calcula las velocidades del agua por medio del tiempo de retraso o la diferencia de tiempo que existe entre los dos pulsos ultrasónicos lanzados entre sus pares de sensores.

Se tiene el par de sensores ubicados en los laterales del canal (talud) ubicados en un ángulo de  $45^\circ$  como se muestra en la siguiente figura.



Para determinar el tiempo de retraso que existe entre el par de sensores al lanzar su pulso ultrasónico, se hará un diagrama de cuerpo libre, haciendo la representación de la partícula del agua y sus vectores, en este caso la velocidad



del agua ( $V_a$ ) y la velocidad del sonido ( $V_s$ ) como se muestra en la siguiente figura.

Se entiende que al tener sus dos vectores que son  $V_a$  y  $V_s$  podremos obtener una resultante, obteniendo primero cuando el valor de la velocidad viaja a favor de la corriente del agua (+) como se muestra en la Figura 26.

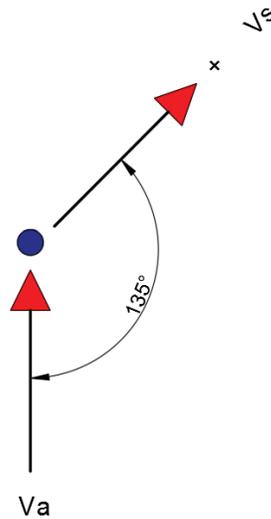


Figura 26 Diagrama de cuerpo libre de A-B

Teniendo los vectores  $V_a$  y  $V_s$ , se tendrán que descomponer en X y Y respectivamente.

$$V_{sx} = V_s \text{ Sen } \theta \quad (8)$$

$$V_{sy} = V_s \text{ Cos } \theta \quad (9)$$

$$\sum F_x = V_{sx} \quad (10)$$

$$\sum F_y = V_{sy} + V_a \quad (11)$$



Teniendo la sumatoria de fuerzas en X y Y se determinara la resultante, como se muestra en la siguiente ecuación ( 12).

$$R = \sqrt{(\sum Fx)^2 + (\sum Fy)^2} = V_{AB} \quad (12)$$

Una vez determinada la velocidad del transductor o sensor A al sensor B se determinara el tiempo de recorrido del haz ultrasónico lanzado en esa dirección.

Se entiende que:

$$V_{AB} = \frac{L}{T_{AB}} \quad (13)$$

Donde:

$V_{AB}$  es la velocidad del haz ultrasónico del trayecto A a B.

$L$  es la longitud que recorre el haz ultrasónico.

$T_{AB}$  es el tiempo de recorrido del haz ultrasónico del sensor A al sensor B.

Despejando el tiempo, queda como resultado:

$$T_{AB} = \frac{L}{V_{AB}} \quad (14)$$

Con la ecuación ( 14) se determina el tiempo de recorrido del pulso ultrasónico entre los dos sensores ubicados en la orilla del canal.

Ahora se calcula el tiempo de recorrido del sensor B hacia el sensor A que será aguas arriba para poder determinar cuál es la diferencia en tiempo del retraso que existe entre los sensores, como se muestra en la siguiente Figura 27. Tomando el vector  $V_s$  como negativo.

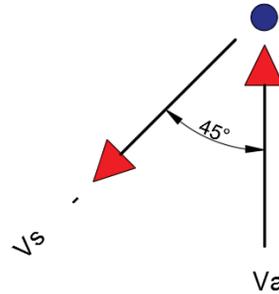


Figura 27 Diagrama de cuerpo libre de B-A

Teniendo los vectores  $V_a$  y  $V_s$ , se tendrán que descomponer en X y Y respectivamente.

$$V_{sx} = -V_s \text{ Sen } \theta \quad (15)$$

$$V_{sy} = -V_s \text{ Cos } \theta \quad (16)$$

$$\sum F_x = -V_{sx} \quad (17)$$

$$\sum F_y = -V_{sy} + V_a \quad (18)$$

Teniendo la sumatoria de fuerzas en X y Y se determinara la resultante, como se muestra en la siguiente ecuación ( 19).

$$R = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} = V_{BA} \quad (19)$$

Una vez determinada la velocidad del transductor o sensor A al sensor B se determinara el tiempo de recorrido del haz ultrasónico lanzado en esa dirección.



Se entiende que:

$$V_{BA} = \frac{L}{T_{BA}} \quad (20)$$

Donde:

$V_{BA}$  es la velocidad del haz ultrasónico del trayecto B a A.

$L$  es la longitud que recorre el haz ultrasónico.

$T_{BA}$  es el tiempo de recorrido del haz ultrasónico del sensor B al sensor A.

Despejando el tiempo, queda como resultado:

$$T_{BA} = \frac{L}{V_{BA}} \quad (21)$$

Entonces teniendo los tiempos de recorrido entre los sensores, se hace la diferencia de tiempos para tener el valor del tiempo, se recomienda hacer la conversión a nanosegundos o milésima de segundo, ya que presentan una diferencia de tiempo pequeña.

$$\Delta T = |T_{AB} - T_{BA}| \quad (22)$$

Asignando valores de los resultados obtenidos con el equipo ultrasónico, siendo  $V_s$  la velocidad del sonido en el agua a una temperatura de 20 ° C se tiene que es de 1435 m/s y tomando un valor de la velocidad que arrojó el equipo ultrasónico  $V_a$  de 1.12 m/s.

Para el trayecto de A a B

$$V_{sx} = 1435 \text{ Sen } 45 = 1014.69$$

$$V_{sy} = 1435 \text{ Cos } 45 = 1014.69$$

$$\Sigma Fx = 1014.69$$

$$\Sigma Fy = 1014.69 + 1.12 = 1015.81$$

$$R = V_{AB} = \sqrt{(1014.69)^2 + (1015.81)^2} = 1435.7$$

Se tiene que el tiempo es de:



$$T_{AB} = \frac{0.85}{1435.78} = 0.0005920127039 \text{ Seg.}$$

Para el trayecto de B a A

$$V_{sx} = -1435 \text{ Sen } 45 = -1014.69$$

$$V_{sy} = -1435 \text{ Cos } 45 = -1014.69$$

$$\Sigma Fx = -1014.69$$

$$\Sigma Fy = -1014.69 + 1.12 = -1013.37$$

$$R = V_{BA} = \sqrt{(-1014.69)^2 + (-1013.37)^2} = 1434.19$$

Se tiene que el tiempo es de:

$$T_{BA} = \frac{0.85}{1434.19} = 0.000006563288039 \text{ Seg.}$$

$$\Delta T = 0.0065632880039 \text{ milisegundos}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, mediante el diagrama de cuerpo libre, se presenta una diferencia de tiempos entre el sensor A y el sensor B de 0.006563 milisegundos, este tiempo es el resultado de lanzar los pulsos ultrasónicos entre el par de sensores ubicados a la misma profundidad, mandando y recibiendo el pulso ultrasónico dirigiéndose aguas arriba y hacia aguas abajo.

### 5.1.2. RiverSurveyor S5-M9

El *RiverSurveyor S5* (marca Sontek/YSI) es un perfilador acústico de velocidad basado en el efecto Doppler (PD) diseñado para medir gastos en ríos y canales. Dicho equipo puede trabajar en modo estacionario o en modo manual.

El *RiverSurveyor* puede configurarse y operarse desde una Laptop con una antena de radio o desde un teléfono celular (con BlueTooth) por medio de dos *softwares* compatibles con Windows: “*RiverSurveyor Live*” (cuando se afora en modo dinámico) y “*Stationnary Measurement*” (cuando se afora en modo estacionario).



El perfilador doppler es un sistema para la medición de gasto destinado a usarse desde botes en movimiento o estacionarios, integra una brújula con sensor de inclinación de dos ejes, sensor de temperatura, 8-Gb de grabación y un haz acústico vertical (ecosonda) para la medición de la profundidad; cuenta además con las siguientes características: rastreo de fondo, software para celular (para recolección en tiempo real de perfiles de corriente) *RiverSurveyor Live for Mobil* y para PC *RiverSurveyor Live for PC*, batimetría, cálculo de las mediciones de gasto, y una interfase DGPS.

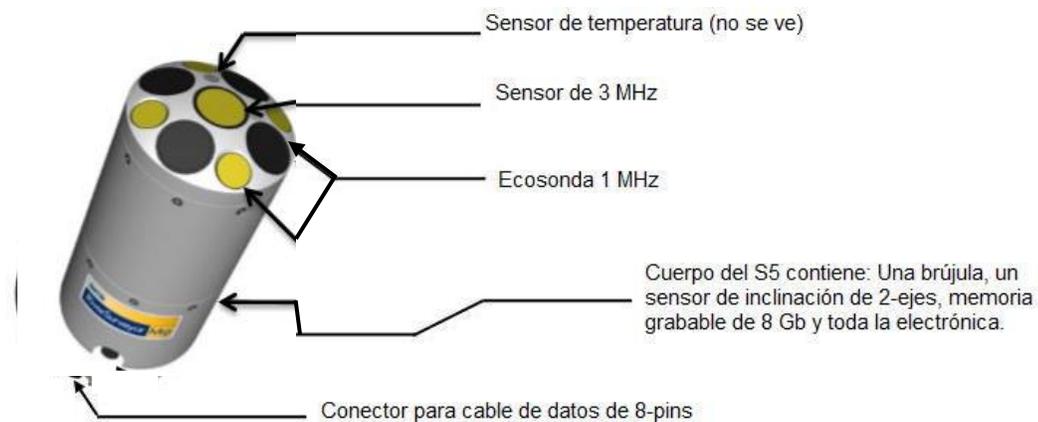


Figura 28 Características del Pd S5.

El PCM tiene 4 LEDs En todos los casos una luz verde deberá indicar que el componente está funcionando mientras que una luz roja o naranja indicará que el sistema no está funcionando.

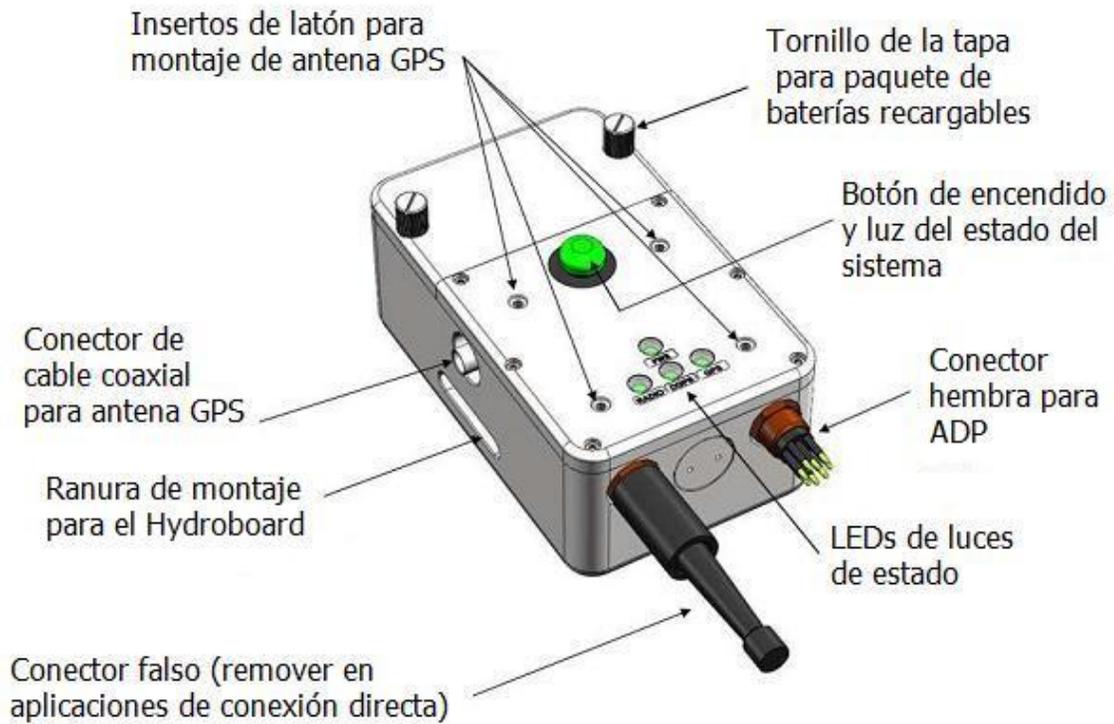


Figura 29 Componentes del módulo de energía y comunicación (PCM).

El barquito incluye las herramientas de montaje, arnés de amarre y un estuche.



Figura 30 Componentes del Barquito.



La Figura 31 muestra un sistema que se utiliza típicamente para una aplicación con bote tripulado, usando un cable de conexión directo a la PC/Laptop y corriente externa.

La línea punteada indica el uso opcional de un GPS externo.

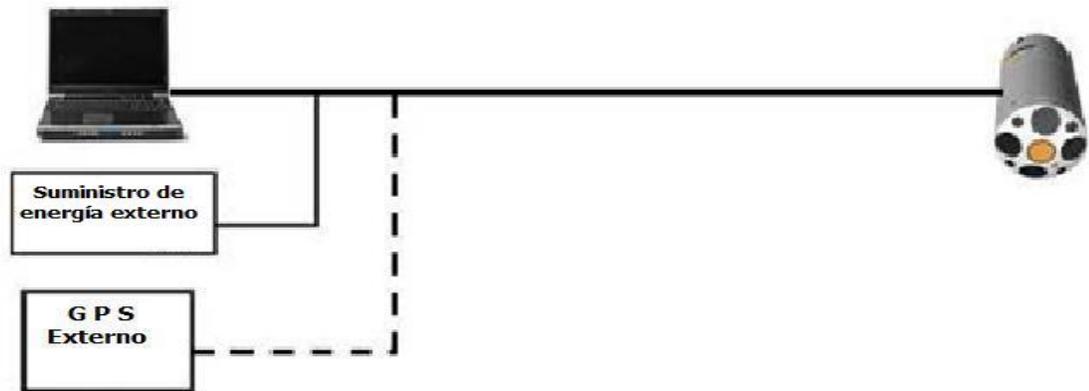


Figura 31 Sistema base.

### Uso del sistema

Esta aplicación, para la medición del gasto en arroyos o canales, típicamente se usa con un bote con una amarra o remolcado manualmente desde un puente mediante el uso de una cuerda. La comunicación inalámbrica de dos vías con el barquito es directa.

### Ensamble del equipo

Por especificaciones se hará el protocolo del montaje del equipo en el sitio de trabajo, así como comprobar la funcionalidad del sistema antes de ir a campo.

Se empezará con la base, que en este caso es el barquito o el sistema de flotación:

Montaje del PD M9 Figura 32 PD M9



Figura 32 PD M9

Se sujeta el PCM con el sistema de flotación



Figura 33 PCM.

Se instalan las baterías recién cargadas dentro del PCM.

Ajuste del PD-M9 para garantizar que esté sumergido cuando se lleve al agua.



Figura 34 Representación de la instalación del PD-M9 y PCM.

Asegurando todos los elementos roscables.

Realizando conexiones del cable de comunicación/energía.



Figura 35 Conexión de cable de energía y de comunicación.



Usando el cable del PCM (cable de energía y serial de comunicación), se conecta el “conector macho” al “conector hembra” de la PC/Laptop y a continuación conecte también en el puerto USB de la PC/Laptop.

Conectando el “conector macho” de 8 pines del cable de datos al conector hembra del PD hasta que las caras de ambos conectores queden alineadas. Apretando el protector de bloqueo la conexión.



*Figura 36 Perfilador “RiverSurveyor”*

## Procedimiento de medición

### Aplicación

Los procedimientos son válidos para todas las mediciones de descargas realizadas con barcos en movimiento (M9), lo que incluye el uso de Hydro-Board Sontek Hydro, así como aplicaciones del dispositivo remoto y también aplicaciones del barco. El protocolo que se describe a continuación es aplicable a las mediciones realizadas con PC y con el software para dispositivos móviles.

### Pruebas pre-medicación

Los pasos descritos a continuación se utilizan para probar el hardware RiverSurveyor antes de hacer una medición. Las pruebas pre-medicación como su



nombre lo indica, se deben hacer antes de cada medición con el fin de garantizar la funcionalidad del hardware RiverSurveyor al momento de adquirir o recopilar datos y que éstos sean los apropiados.

## Comunicaciones

Las comunicaciones son vitales para las mediciones a distancia. Hay tres tipos de conexiones de comunicaciones para el ADP: Conexión Directa, Bluetooth y Propagación del espectro radioeléctrico. En el caso de las comunicaciones inalámbricas, asegurándose de tener el tapón obturador instalado en el módulo de comunicaciones y energía (PCM). Es importante señalar que el PCM requiere energía, por lo tanto se debe tener a la mano los paquetes de baterías debidamente cargadas y de repuesto.

En este caso el tipo de conexión que se utilizó para realizar las pruebas fue el de conexión por Bluetooth.

## Prueba del sistema

Esta es una verificación de que los componentes del hardware están funcionando, dura 60 segundos. El sistema de análisis comprueba que el voltaje de la batería, la brújula, la tarjeta de memoria SD y el sensor de temperatura están funcionando correctamente. Una aprobación del sistema indicaría que todos los sistemas están en buenas condiciones para su uso, mientras que una falla requeriría la intervención del usuario para realizar mediciones confiables. A continuación se muestra una lista de los mensajes de falla del sistema:

- El Voltaje del sistema de baterías es menor a 12 Volts
- La brújula del sistema no funciona
- La tarjeta de memoria SD del sistema no funciona
- El Sensor de temperatura no está funcionando

## *Calibración de la brújula*

La calibración de la brújula es necesaria antes de cada medición de gasto. Se utiliza para compensar la interferencia magnética en las proximidades del ADP. Por ejemplo, una batería o abrazadera de acero al lado de la unidad tendrá un efecto mucho mayor que un puente de acero a 200 metros de distancia. Por eso es importante eliminar cualquier material magnético, incluidos los dispositivos electrónicos o dispositivos móviles y relojes de pulsera de la vecindad inmediata cuando se realice la calibración de la brújula.



Se hicieron las pruebas de calibración correspondientes para el funcionamiento del barco M9, apoyados por el equipo de cómputo para iniciar las pruebas.



Figura 37 Realizando calibración del equipo M9 para compensar la interferencia magnética en las proximidades.

Una medición de flujo con el barco en movimiento se puede dividir en tres componentes clave: el margen inicial, transecto lineal y el margen final. Estos componentes se muestran a continuación en la Figura 38.

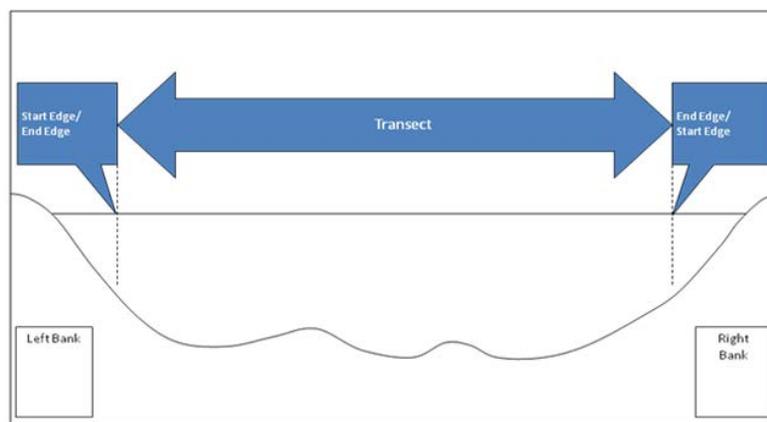


Figura 38 Componentes del trayecto.

Después de configurar el sistema, iniciar el sistema de adquisición/recopilación de datos.



Se posicionó el barco en la margen inicial y así poder comenzar a recopilar datos con el barco Figura 39. Se recomienda que se recopilen un mínimo de 10 perfiles para realizar el cálculo del gasto. Se introdujo la distancia de la profundidad que tenía el sensor M9 que en el mayor de los casos son de 10 centímetros.



Figura 39 Margen inicial

Se presiona en iniciar una medición (**F5**) para empezar la recopilación de datos.-



Figura 40 Pantalla de inicio del sistema RiverSurveyor Live.

Después de recopilar los datos del margen inicial, se procedió a mover el barco a través del canal, manteniendo la velocidad del barco y la dirección lo más constante posible.

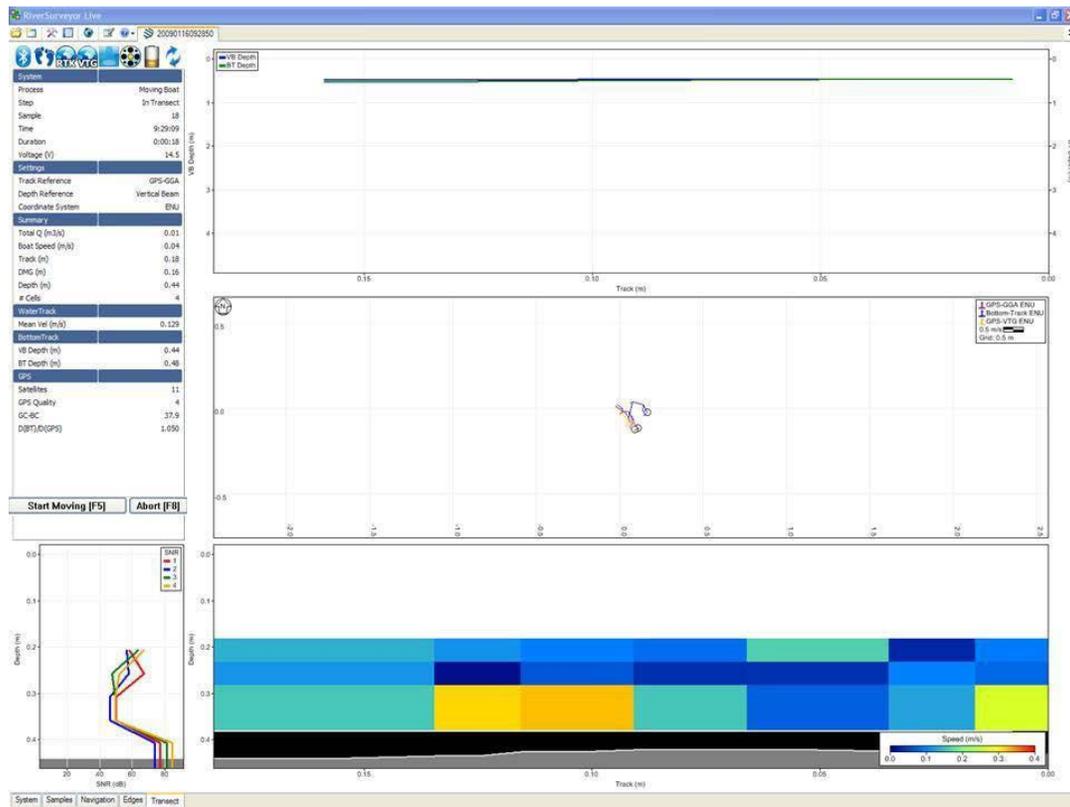


Figura 41 Pantalla indicando el inicio del trayecto del barco.

Iniciar movimiento



Figura 42 Término del trayecto recorrido.





File	Start Date	Start Time	Duration	Width (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Total Q (m <sup>3</sup> /s)
20090224080752.riv	24/02/2009	8:08:24	0:02:10	10.43	12.6	-8.58
20090224081053.riv	24/02/2009	8:11:26	0:02:09	9.86	13.4	-8.77
20090224081424.riv	24/02/2009	8:14:57	0:02:44	10.91	13.4	-8.65
20090224081816.riv	24/02/2009	8:18:48	0:01:55	9.49	12.3	-8.37
			Mean	10.17	12.9	-8.59
			Std Dev	0.54	0.5	0.15
			COV	0.053	0.038	-0.017

Figura 44 Resumen de la medición de gasto.

Todos los registros están ordenados por fecha y hora con los iconos correspondientes al margen inicial, la profundidad, la trayectoria de referencia y el sistema de coordenadas. Todos éstos se pueden seleccionar o dejar de seleccionar, presionando sobre ellos; Esto afecta las estadísticas presentadas y es rápido y fácil entender qué efecto tiene cada medición en el promedio general de las mediciones del sitio.

Las siguientes imágenes muestran los resultados obtenidos de la recopilación de los datos en el canal. Mostrados mediante el programa RiverSurveyorLive (Figura 45).

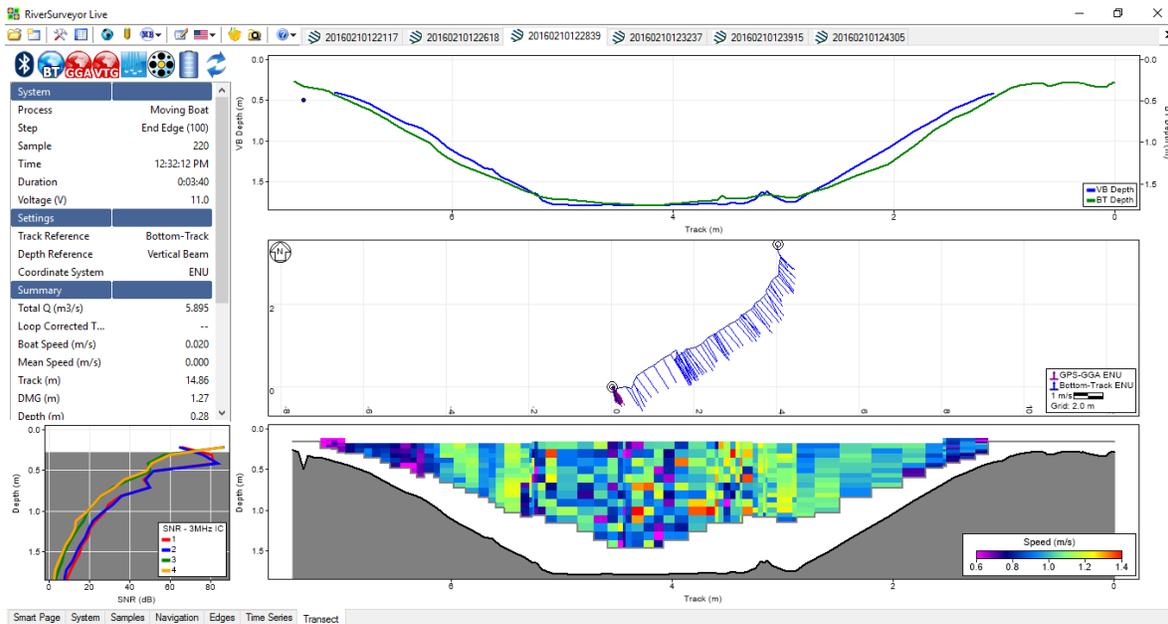


Figura 45 Resultado de la sección transversal del canal.



En esta imagen se muestra la sección del canal, así como la trayectoria que hizo el barco para la toma de datos y por ultimo arroja los resultados de la velocidad a través de la sección, en donde se muestran las diferentes velocidades en toda la sección mediante celdas de velocidades.

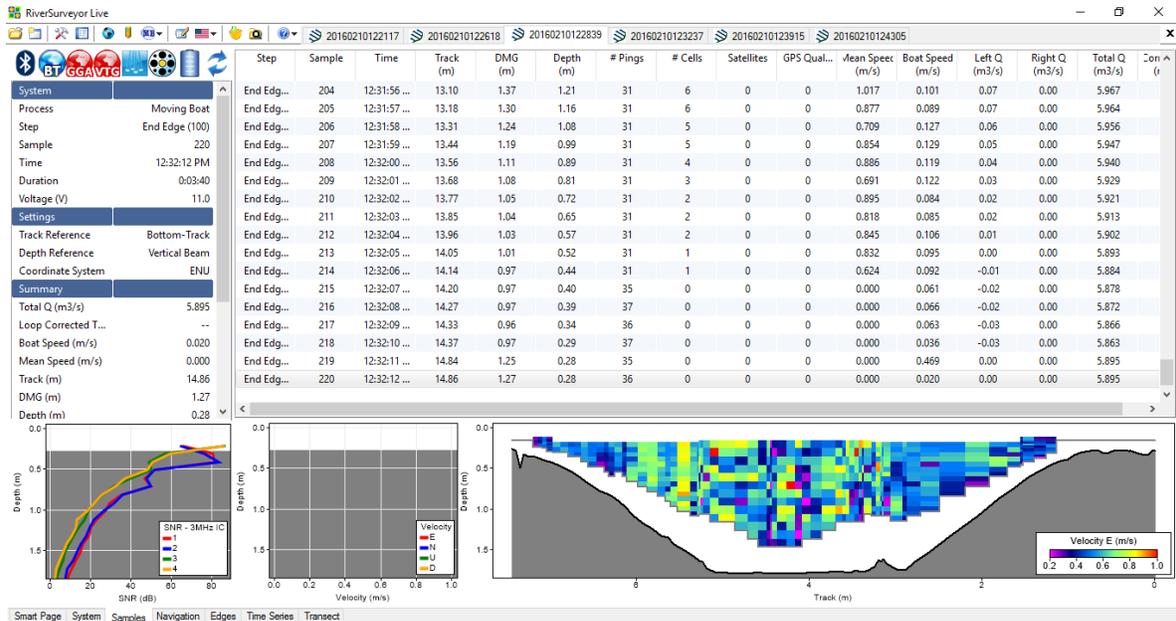


Figura 46 Datos Recolectados del trayecto recorrido.

En la figura se muestran todos los datos recolectados en campo como son: velocidades, profundidades, trayectoria, dirección, etc. (Figura 46).

Al vaciar los datos y pasarlos a una tabla de Excel para el mejor manejo del mismo se obtienen tablas como las siguientes (Figura 47).



Date/Time	Frequency (Hz)	Profile Type	Depth (m)	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Heading (deg)	Pitch (deg)	Roll (deg)	BT Depth (m)	VB Depth (m)	BT Beam1 (m)	BT Beam2 (m)	BT Beam3 (m)	BT Beam4 (m)	Track (m)
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.29	0	0	102.1	-0.5	2	0.29	0	0.33	0.34	0.21	0	0.02
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.29	0	0	102.8	-0.7	2	0.29	0	0.32	0.34	0.2	0	0.05
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.29	0	0	103.6	-0.8	2	0.29	0	0.31	0.35	0.2	0	0.07
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.29	0	0	104.7	-0.7	1.9	0.29	0	0.32	0.36	0.2	0	0.09
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.3	0	0	104.1	-0.7	1.8	0.3	0	0.33	0.36	0.2	0	0.1
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.3	0	0	104	-0.7	1.9	0.3	0	0.33	0.36	0.2	0	0.12
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.31	0	0	103.6	-0.6	1.8	0.31	0	0.35	0.38	0.24	0.27	0.15
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.31	0	0	101.8	-0.9	2	0.31	0	0.38	0.38	0.24	0.23	0.19
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.29	0	0	102.1	-0.9	2.1	0.29	0	0.36	0.37	0.21	0.21	0.22
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.27	0	0	102.4	-0.4	1.9	0.27	0	0.32	0.34	0.2	0.2	0.24
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.26	0	0	102.9	-0.7	1.8	0.26	0	0.31	0.34	0.2	0.2	0.25
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.33	0	0	103.5	-0.7	2	0.33	0	0.33	0.35	0.2	0.43	0.32
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.28	0	0	103.2	-0.7	1.9	0.28	0	0.31	0.33	0.2	0	0.4
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.29	0	0	103.1	-0.7	2	0.29	0	0.32	0.34	0.21	0	0.65
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.28	0	0	102.9	-0.7	1.9	0.28	0	0.32	0.34	0.2	0	0.68
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.29	0	0	102.7	-0.8	2	0.29	0	0.33	0.35	0.2	0	0.81
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.29	0	0	103	-0.8	2.1	0.29	0	0.32	0.34	0.21	0	0.83
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.31	0	0	101.8	-0.6	2	0.31	0	0.32	0.34	0.28	0	0.84
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.28	0	0	102.4	-0.7	1.9	0.28	0	0.31	0.33	0.2	0	0.85
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.28	0	0	102.7	-0.8	1.9	0.28	0	0.31	0.33	0.2	0	0.02
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.28	0	0	102.6	-0.7	1.9	0.28	0	0.31	0.34	0.2	0	0.02
02/10/2016 12:28	3MHz	IC	0.28	0	0	102.9	-0.8	1.8	0.28	0	0.31	0.33	0.2	0	0.03

Figura 47 Descarga de datos a Excel.

Para un mejor manejo de la información, se seleccionan los datos a utilizar para hacer las comparaciones de las velocidades en las diferentes profundidades que arrojan los dos equipos.

Al empezar a deslizar el barco sobre el agua del margen derecha hacia la margen izquierda, se realizó una grabación de video sobre el monitor del equipo Deltawave para recopilar los datos de la velocidad que en pantalla son arrojados cada segundo aproximadamente, se optó por realizar esta actividad ya que al descargar los datos de este equipo, eran resultados de las velocidades cada 5 minutos, cada 30 minutos y cada hora, por lo que no nos servían en esas condiciones, ya que la prueba del barco M9 tardaba entre 35 segundos y 45 segundos. En cambio al empezar a grabar y recolectar esa información de velocidades, se pudo obtener más de 30 resultados de velocidades arrojadas por el equipo ultrasónico de tiempo de travesía Deltawave.

Se tomaron los datos obtenidos en campo de acuerdo a las velocidades arrojadas a las cuatro profundidades en que se encuentran los sensores del equipo de medición de tiempo de travesía.

En la siguiente imagen se muestra a qué profundidades se encuentran localizados los cuatro sensores para la medición de velocidades por el método de tiempo de travesía (Figura 48).

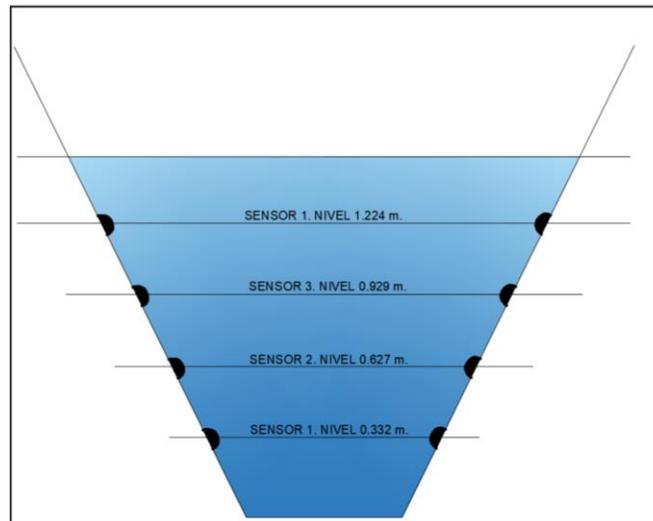


Figura 48 Profundidades de los cuatro sensores.

Una vez ubicados los sensores, se tomaron todos los datos recolectados por el barco (M9) a esas 4 profundidades, datos como: profundidad, velocidades, y la distancia en el trayecto, mediante el perfil que arroja el programa RiverSurveyorLive.

Realizadas las pruebas en campo se hizo la descarga de la información recolectada en el canal, en el caso del equipo M9 fue con el apoyo del software RiverSuveyor Live donde mostraba la información en forma tabular y en forma gráfica, dando detalles del recorrido hecho en el canal.

Al descargar la información de las velocidades en forma tabular, se encontró con el detalle de que arrojaba todas las velocidades en diferentes profundidades y en diferentes distancias del trayecto, pero estas velocidades no coincidían con las que se deseaban encontrar, ya que las que eran requeridas eran en las cuatro diferentes profundidades (que son las profundidades donde se encuentran los 4 pares de sensores del equipo de tiempo de travesía Deltawave).

Por lo que se obtuvieron los datos de la siguiente forma:

El software RiverSuveyor Live que es con el que opera el barco M9, muestra diferentes pantallas en el sistema, en esta caso con apoyo de la sección del canal mostrando el comportamiento de las velocidades en toda la sección transversal, los distintos colores que se muestran en la pantalla, son los pixeles.

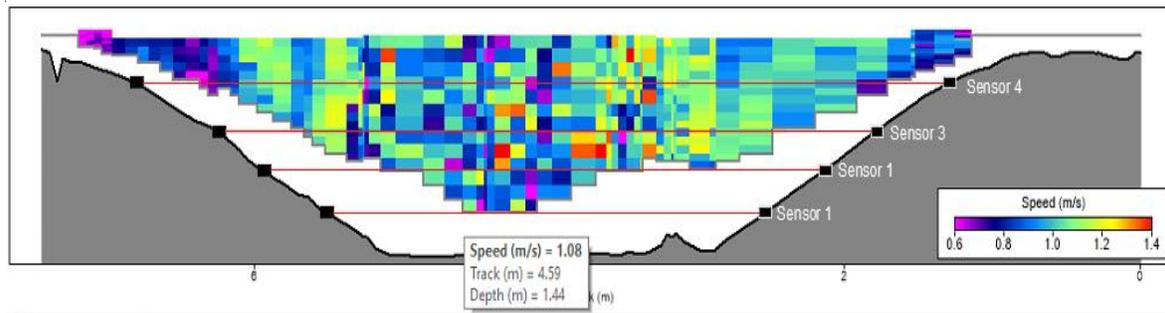


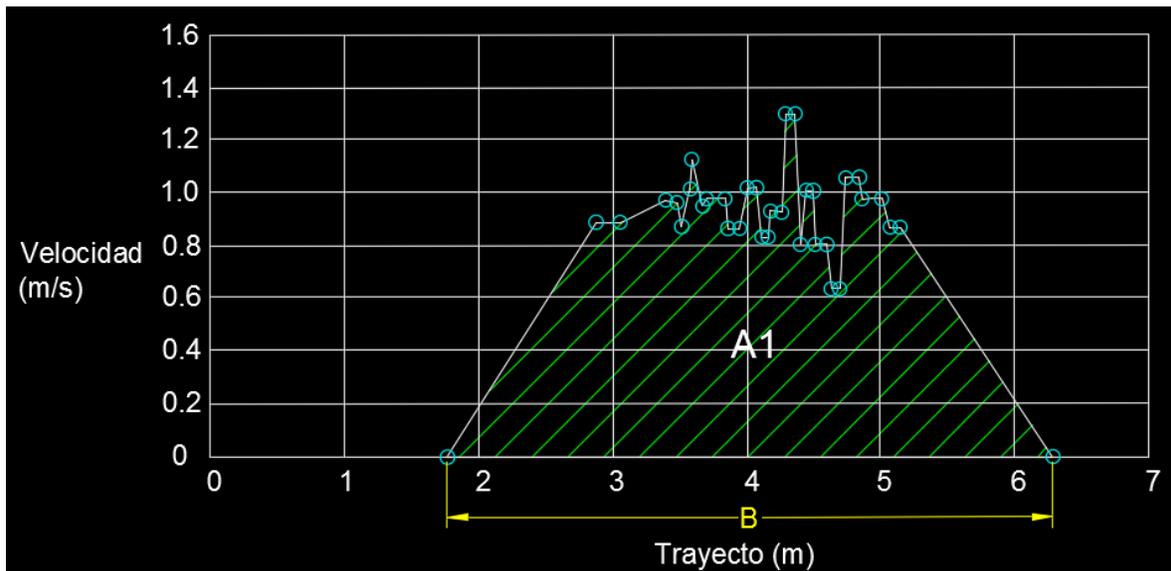
Figura 49 Ubicación de los cuatro pares de sensores.

Usando los datos del M9, se hace la reconstrucción de los perfiles de flujo en el plano horizontal a la altura de cada transecto del Deltawave.

Al situar el cursor del mouse sobre cada pixel (como se muestra en la Figura 49) muestra en pantalla datos como es la velocidad, la distancia que existe del margen inicial a su posición en metros y la profundidad a la que se encuentra ese pixel o ese valor puntual.

Entonces se tomaron todos los valores en línea recta a la que se encuentran localizados los cuatro pares de sensores del equipo de tiempo de travesía del Deltawave.

Al obtener los datos de distancia en la trayectoria y la velocidad correspondiente en ese punto, se grafica para ver el perfil que se presenta de la velocidad, en este caso se grafica con los datos obtenidos del sensor dos y el perfil es el siguiente:



Gráfica 2 Perfil de velocidades en el eje horizontal

## 5.2. Obtención de Datos

### 5.2.1. Datos efecto doppler

A continuación se muestran los datos obtenidos por el medidor M9 en forma tabular, para después proceder a graficar la curva de velocidad y determinar el área bajo la curva.

La primera columna de las tablas muestra la posición puntual a la que se tomó la lectura de la velocidad en el trayecto en metros (transversalmente), mientras que la segunda columna muestra la velocidad en metros por segundo y en la tercera columna muestra el área de la sección en específico (dividido en dovelas).

Datos de sensor uno, ubicado a una profundidad de 0.332 metros

Tabla 4 Datos de velocidades del sensor 1.

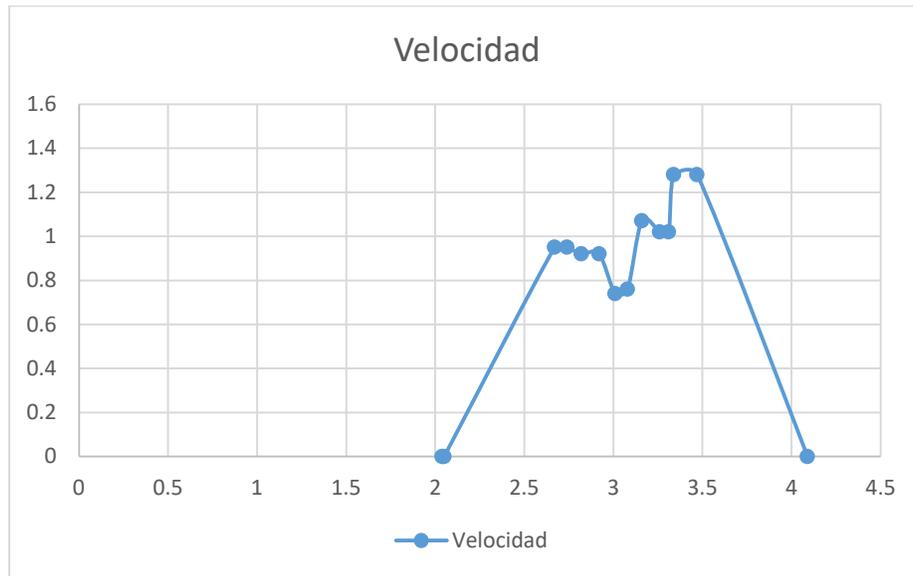
Trayecto	Velocidad
2.05	0
2.67	0.95
2.74	0.95
2.82	0.92

Trayecto	Velocidad
2.92	0.92
3.01	0.74
3.08	0.76
3.16	1.07

Trayecto	Velocidad
3.26	1.02
3.31	1.02
3.34	1.28
3.47	1.28
4.09	0



A continuación se muestra la gráfica de las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.332 metros.



Grafica 3 Perfil longitudinal de velocidades sensor 1.

Datos de sensor dos, ubicado a una profundidad de 0.627 metros

Tabla 5 Datos de velocidades del sensor 2.

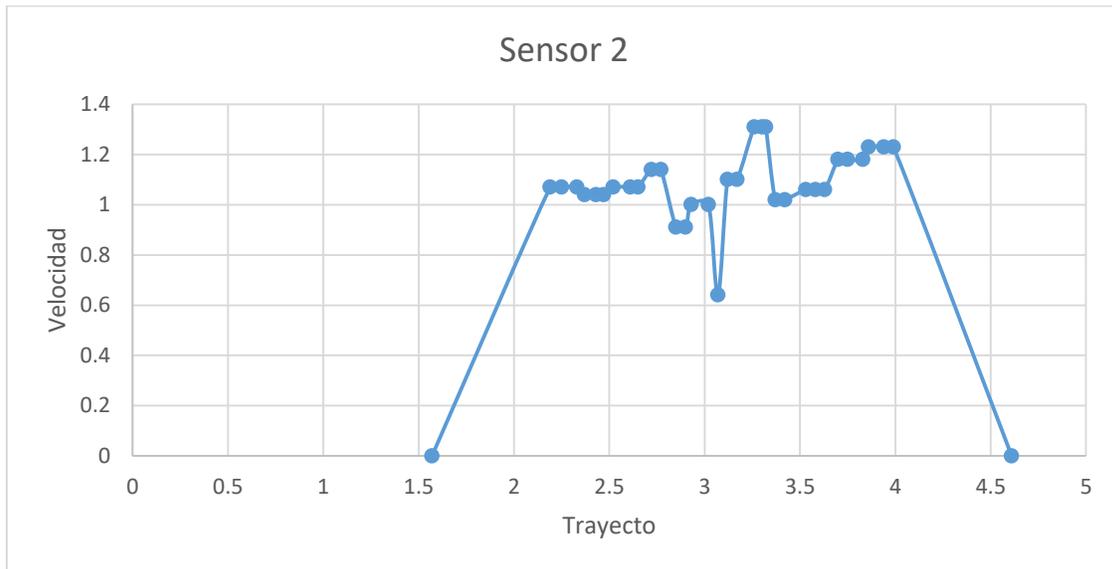
Trayecto	Velocidad
1.57	0
2.19	1.07
2.25	1.07
2.33	1.07
2.37	1.04
2.43	1.04
2.47	1.04
2.52	1.07
2.61	1.07
2.65	1.07
2.72	1.14
2.77	1.14

Trayecto	Velocidad
2.85	0.91
2.9	0.91
2.93	1
3.02	1
3.07	0.64
3.12	1.1
3.17	1.1
3.26	1.31
3.3	1.31
3.32	1.31
3.37	1.02
3.42	1.02

Trayecto	Velocidad
3.53	1.06
3.58	1.06
3.63	1.06
3.7	1.18
3.75	1.18
3.83	1.18
3.86	1.23
3.94	1.23
3.99	1.23
4.61	0



A continuación se muestra la gráfica de las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.627 metros.



Grafica 4 Perfil longitudinal de velocidades sensor 2.

Datos de sensor tres, ubicado a una profundidad de 0.929 metros

Tabla 6 Datos de velocidades del sensor 3.

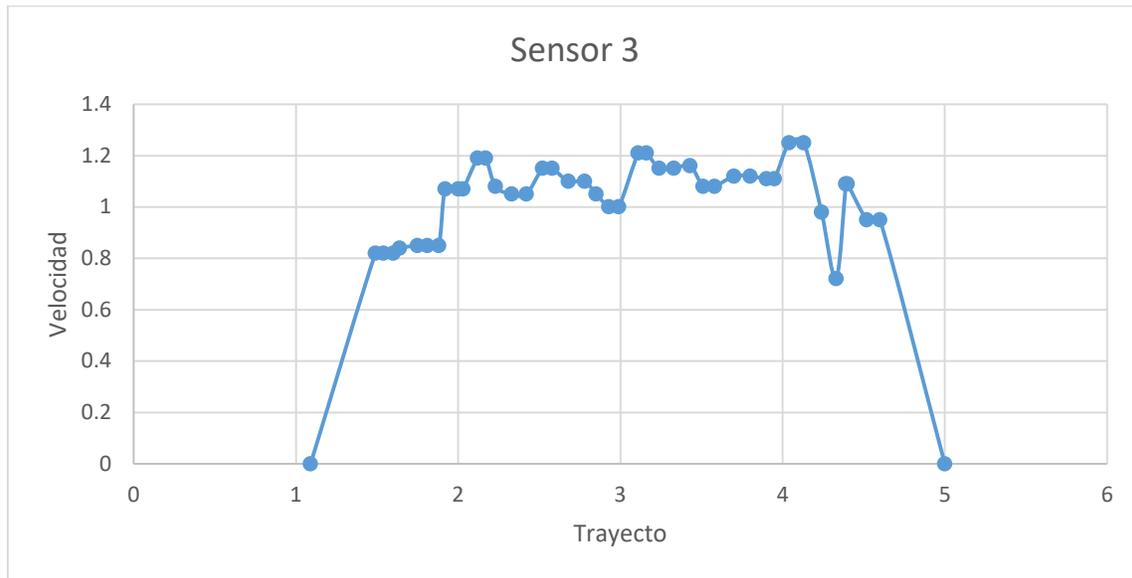
Trayecto	Velocidad
1.09	0
1.49	0.82
1.54	0.82
1.6	0.82
1.64	0.84
1.75	0.85
1.81	0.85
1.88	0.85
1.92	1.07
2	1.07
2.03	1.07
2.12	1.19
2.17	1.19
2.23	1.08
2.33	1.05

Trayecto	Velocidad
2.42	1.05
2.52	1.15
2.58	1.15
2.68	1.1
2.78	1.1
2.85	1.05
2.93	1
2.99	1
3.11	1.21
3.16	1.21
3.24	1.15
3.33	1.15
3.43	1.16
3.51	1.08
3.58	1.08

Trayecto	Velocidad
3.7	1.12
3.8	1.12
3.9	1.11
3.95	1.11
4.04	1.25
4.13	1.25
4.24	0.98
4.33	0.72
4.39	1.09
4.4	1.09
4.52	0.95
4.6	0.95
5	0



A continuación se muestra la gráfica de las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.929 metros.



Gráfica 5 Perfil longitudinal de velocidades sensor 3.

Datos de sensor cuatro, ubicado a una profundidad de 1.224 metros

Tabla 7 Datos de velocidades del sensor 4.

Trayecto	Velocidad
0.52	0
0.85	0.57
0.95	0.57
0.99	0.89
1.07	0.89
1.14	0.85
1.18	0.85
1.26	0.84
1.33	0.84
1.4	0.84
1.47	0.84
1.51	0.98
1.59	0.98
1.68	0.77
1.76	1.09

Trayecto	Velocidad
2.15	0.94
2.2	1.05
2.28	1.05
2.36	1.05
2.49	1.05
2.59	1.06
2.67	1.14
2.74	1.14
2.84	1.27
2.89	1.27
2.99	1.09
3.03	1.18
3.11	1.14
3.18	1.14
3.26	1.14

Trayecto	Velocidad
3.74	1.04
3.82	1.04
3.95	1.08
4.04	0.91
4.15	1.08
4.26	0.92
4.35	0.92
4.44	1.02
4.51	1.07
4.61	1.07
4.69	1.14
4.78	1.14
4.87	0.98
4.96	0.96
5.04	0.96

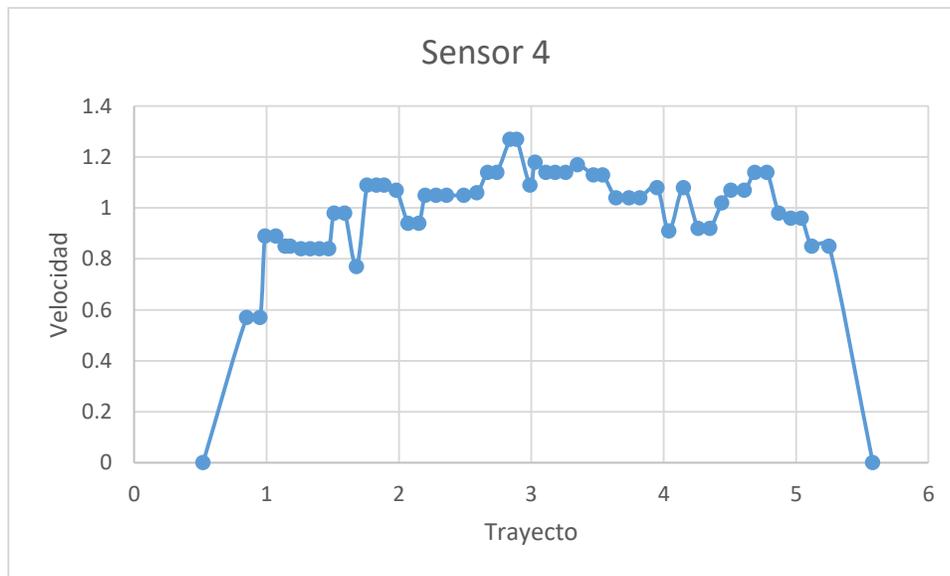


Trayecto	Velocidad
1.83	1.09
1.89	1.09
1.98	1.07
2.07	0.94

Trayecto	Velocidad
3.35	1.17
3.47	1.13
3.54	1.13
3.64	1.04

Trayecto	Velocidad
5.12	0.85
5.25	0.85
5.58	0

A continuación se muestra la gráfica de las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 1.224 metros.



Gráfica 6 Perfil longitudinal de velocidades sensor 4.

Se determinó el cálculo del área bajo la curva de cada perfil para estimar la velocidad media de la siguiente forma.

Al graficar los datos anteriores y unir los puntos mediante una línea obtenemos una sección delimitada como se muestra en la gráfica, donde se puede obtener el área bajo la curva que se presenta ( $A_1$ ), entonces, ahora;

Se encontrará un área ( $A_2$ ) que sea igualada al área bajo la curva ( $A_1$ ).

$$A_1 = A_2 \quad (23)$$

Tal que,



$$A_2 = B_2 * V_{med} \tag{24}$$

$B_2$  es el ancho del canal a la altura de los sensores.

El área uno ( $A_1$ ) la obtenemos por el método de suma de Riemann para encontrar el valor.

Entonces,

$$A_2 = B_2 * V_{med} = A_1 \tag{25}$$

Al igualar estas dos áreas, se hace el despeje para obtener la velocidad media

$$V_{med} = \frac{A_1}{B_2} \tag{26}$$

Por el método de sumatoria de Riemann se determina el área bajo la curva de las gráficas restantes.

Tabla 8 Áreas de los cuatro pares de sensores.

Sensor 1	Sensor 2
0.2945	0.3317
0.0665	0.0642
0.0748	0.0856
0.092	0.0422
0.0747	0.0624
0.0525	0.0416
0.0732	0.05275
0.1045	0.0963
0.051	0.0428
0.0345	0.07735
0.1664	0.057
0.3968	0.082

Sensor 2	Sensor 2
0.0455	0.053
0.02865	0.053
0.09	0.0784
0.041	0.059
0.0435	0.0944
0.055	0.03615
0.10845	0.0984
0.0524	0.0615
0.0262	0.3813
0.05825	0
0.051	
0.1144	

Sensor 3	Sensor 3
0.164	0.0681
0.041	0.1065
0.0492	0.0945
0.0332	0.11
0.09295	0.069
0.051	0.1125
0.0595	0.11
0.0384	0.07525
0.0856	0.082
0.0321	0.06
0.1017	0.1326
0.0595	0.0605



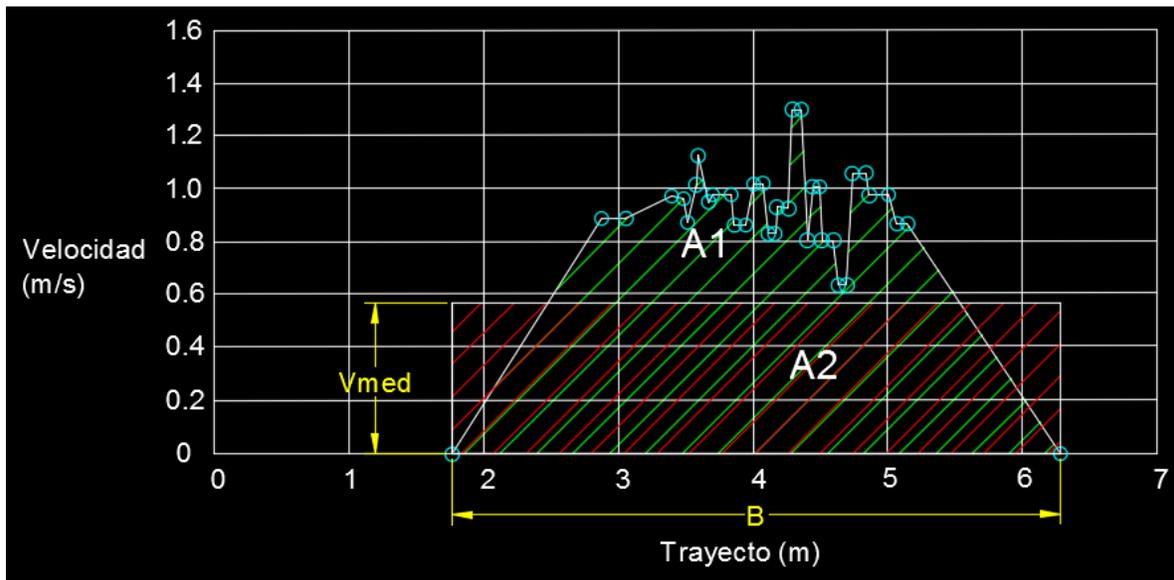
Sensor 3	Sensor 3
0.0944	0.0765
0.1035	0.0543
0.1155	0.0109
0.0896	0.1224
0.0756	0.076
0.132	0.19
0.112	0
0.1115	
0.0555	
0.1062	
0.1125	
0.12265	

Sensor 4	Sensor 4
0.09405	0.07875
0.057	0.0744
0.0292	0.0763
0.0712	0.0654
0.0609	0.0972
0.034	0.09045
0.0676	0.0752
0.0588	0.04975
0.0588	0.084
0.0588	0.084
0.0364	0.1365
0.0784	0.1055

Sensor 4	Sensor 4
0.088	0.1085
0.0798	0.104
0.1205	0.0832
0.0635	0.1378
0.118	0.08955
0.0454	0.10945
0.0928	0.11
0.0798	0.0828
0.0912	0.0873
0.10395	0.07315
0.138	0.107
0.0791	0.0884

Sensor 4
0.1026
0.0954
0.0873
0.0768
0.0724
0.1105
0.14025
0

En donde ya encontrada el área 1 (A1) y teniendo el valor del ancho del canal (B2) podemos encontrar la velocidad media, como se muestra en la Grafica 7.



Grafica 7 Representación gráfica de las áreas igualadas.

Realizando lo antes descrito se puede hacer la comparación de las velocidades en cada transecto con las velocidades reportadas en cada transecto.

### 5.2.2. Datos tiempo de travesía

De igual forma, se graficaron los datos obtenidos con el equipo deltawave de tiempo de travesía para estimar una velocidad media y hacer la comparación con las pruebas realizadas.

Los siguientes datos mostrados de forma tabular y las gráficas, corresponden a los registros obtenidos por el equipo de tiempo de travesía, donde se requirió hacer la grabación para obtenerlos.

Estos datos obtenidos mediante la grabación de video fueron capturados en forma tabular para poder tener la representación gráfica del comportamiento de las velocidades presentadas en sus cuatro profundidades.

Datos del primer par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.332 metros.



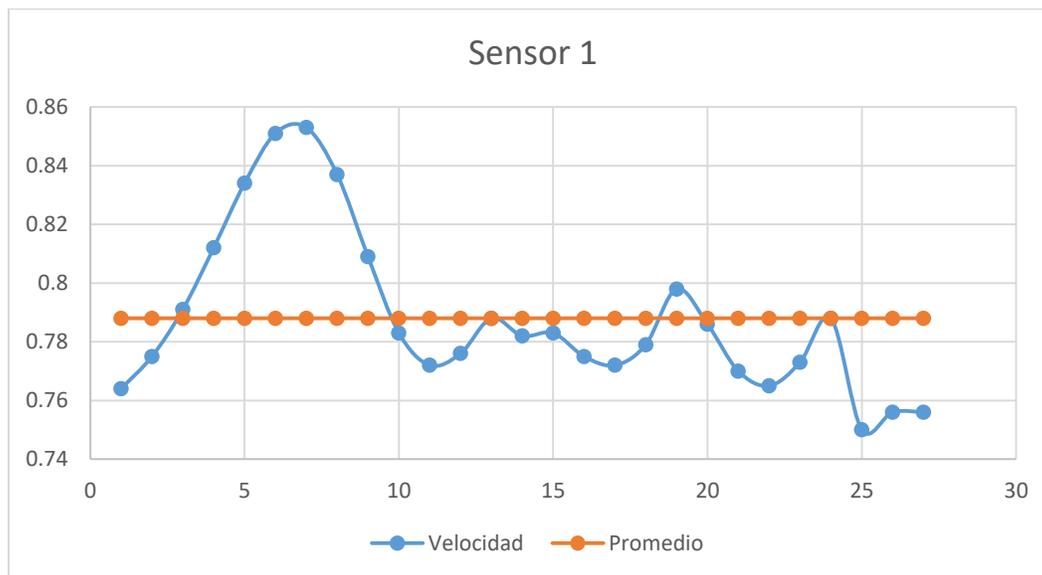
Tabla 9 Datos primer par de sensores.

Lectura	Velocidad
1	0.764
2	0.775
3	0.791
4	0.812
5	0.834
6	0.851
7	0.853
8	0.837
9	0.809

Lectura	Velocidad
10	0.783
11	0.772
12	0.776
13	0.788
14	0.782
15	0.783
16	0.775
17	0.772
18	0.779

Lectura	Velocidad
19	0.798
20	0.786
21	0.77
22	0.765
23	0.773
24	0.788
25	0.75
26	0.756
27	0.756

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor uno, a una profundidad de 0.332 metros.



Grafica 8 Perfil de velocidades sensor 1.

Los puntos graficados de color azul muestran las velocidades presentadas en el tiempo que tardó el equipo M9 en hacer la trayectoria transversal del canal.

La línea de color naranja muestra el promedio de las velocidades obtenidas con el equipo de medición de tiempo de travesía.



Datos de segundo par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.627 metros.

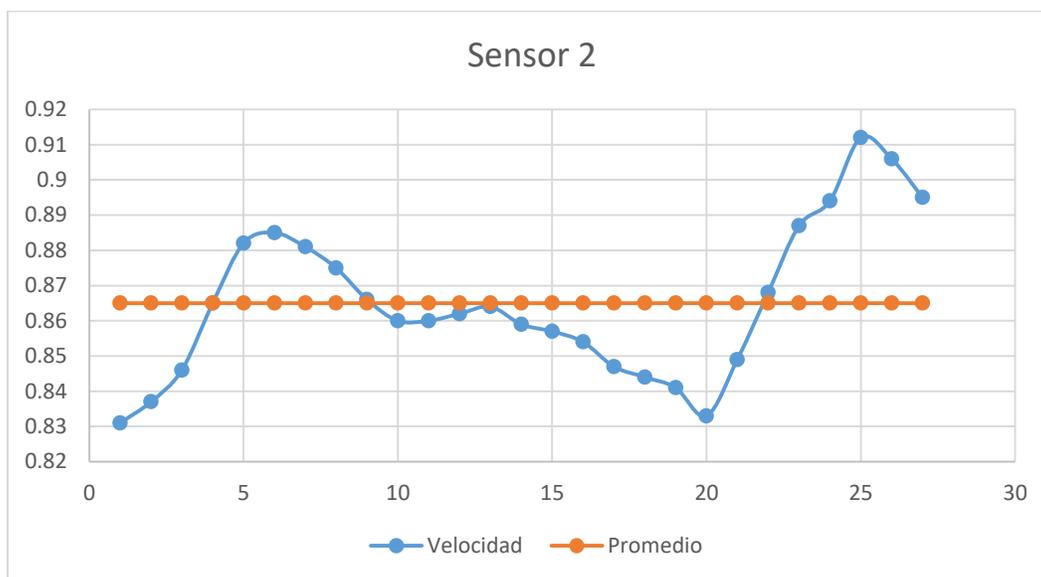
Tabla 10 Datos segundo par de sensores.

Lectura	Velocidad
1	0.831
2	0.837
3	0.846
4	0.865
5	0.882
6	0.885
7	0.881
8	0.875
9	0.866

Lectura	Velocidad
10	0.86
11	0.86
12	0.862
13	0.864
14	0.859
15	0.857
16	0.854
17	0.847
18	0.844

Lectura	Velocidad
19	0.841
20	0.833
21	0.849
22	0.868
23	0.887
24	0.894
25	0.912
26	0.906
27	0.895

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor dos, a una profundidad de 0.627 metros.



Grafica 9 Perfil de velocidades sensor 2.

Los puntos graficados de color azul muestran las velocidades presentadas en el tiempo que tardó el equipo M9 en hacer la trayectoria transversal del canal.



La línea de color naranja muestra el promedio de las velocidades obtenidas con el equipo de medición de tiempo de travesía.

Datos del tercer par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.929 metros.

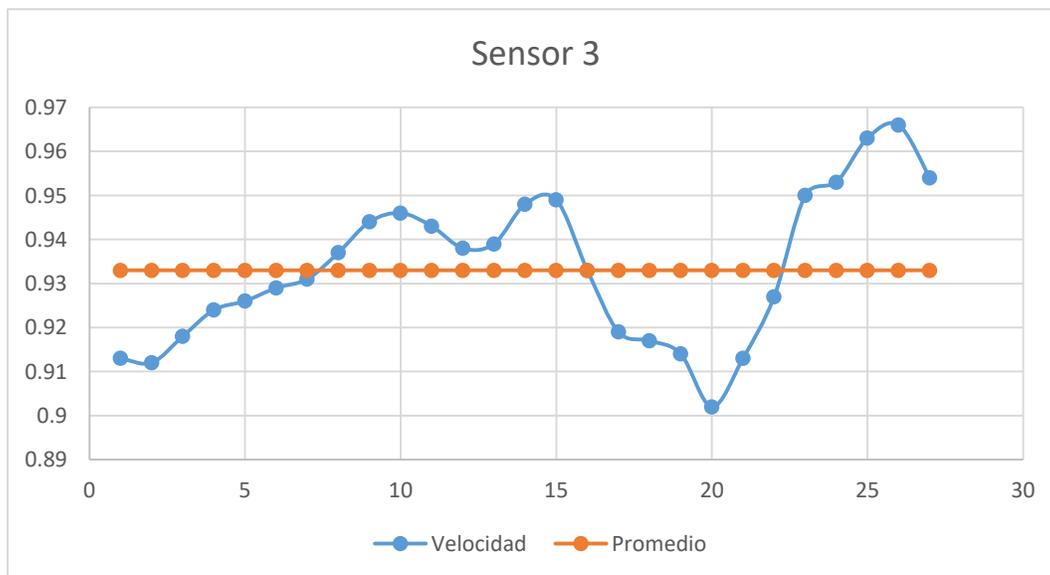
Tabla 11 Datos tercer par de sensores.

Lectura	Velocidad
1	0.913
2	0.912
3	0.918
4	0.924
5	0.926
6	0.929
7	0.931
8	0.937
9	0.944

Lectura	Velocidad
10	0.946
11	0.943
12	0.938
13	0.939
14	0.948
15	0.949
16	0.933
17	0.919
18	0.917

Lectura	Velocidad
19	0.914
20	0.902
21	0.913
22	0.927
23	0.95
24	0.953
25	0.963
26	0.966
27	0.954

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor tres, a una profundidad de 0.929 metros.



Grafica 10 Perfil de velocidades sensor 3.



Los puntos graficados de color azul muestran las velocidades presentadas en el tiempo que tardó el equipo M9 en hacer la trayectoria transversal del canal.

La línea de color naranja muestra el promedio de las velocidades obtenidas con el equipo de medición de tiempo de travesía.

Datos del cuarto par de sensores, ubicado a una profundidad de 1.224 metros

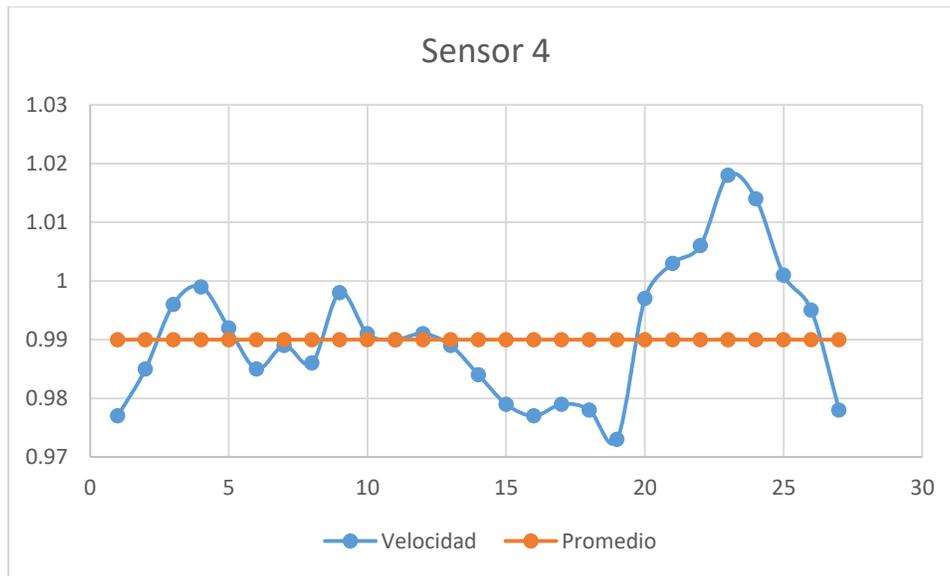
Tabla 12 Datos cuarto par de sensores.

Lectura	Velocidad
1	0.977
2	0.985
3	0.996
4	0.999
5	0.992
6	0.985
7	0.989
8	0.986
9	0.998

Lectura	Velocidad
10	0.991
11	0.99
12	0.991
13	0.989
14	0.984
15	0.979
16	0.977
17	0.979
18	0.978

Lectura	Velocidad
19	0.973
20	0.997
21	1.003
22	1.006
23	1.018
24	1.014
25	1.001
26	0.995
27	0.978

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor cuatro, a una profundidad de 1.224 metros.



Grafica 11 Perfil de velocidades sensor 4.

Los puntos graficados de color azul muestran las velocidades presentadas en el tiempo que tardó el equipo M9 en hacer la trayectoria transversal del canal.

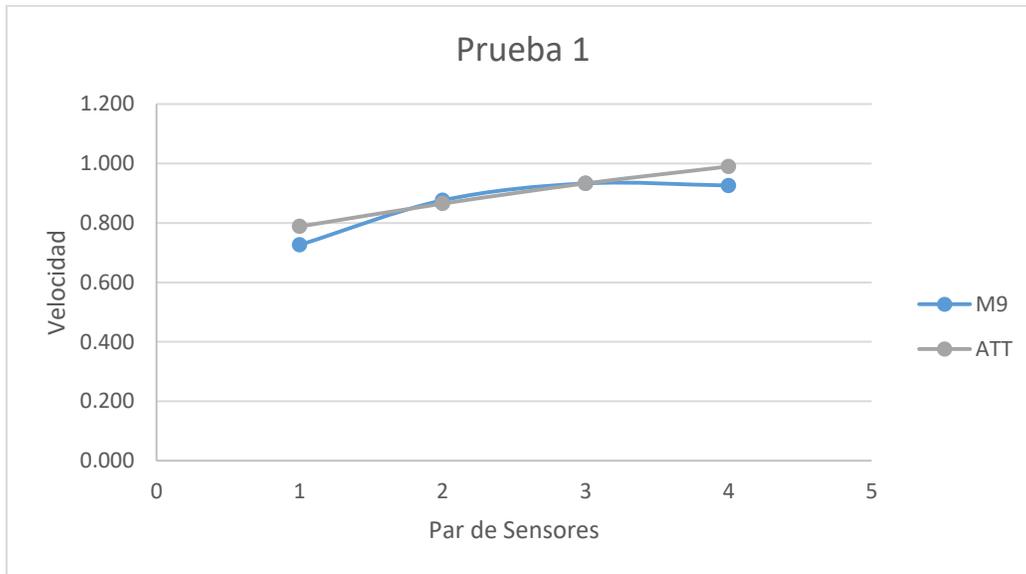
La línea de color naranja muestra el promedio de las velocidades obtenidas con el equipo de medición de tiempo de travesía.

### 5.3. Resultados

A continuación se muestra una tabla resumen y su gráfica correspondiente de los datos obtenidos con los equipos ultrasónicos M9 y ATT (Deltawave).

Tabla 13 Resumen de resultados M9 y ATT Prueba 1

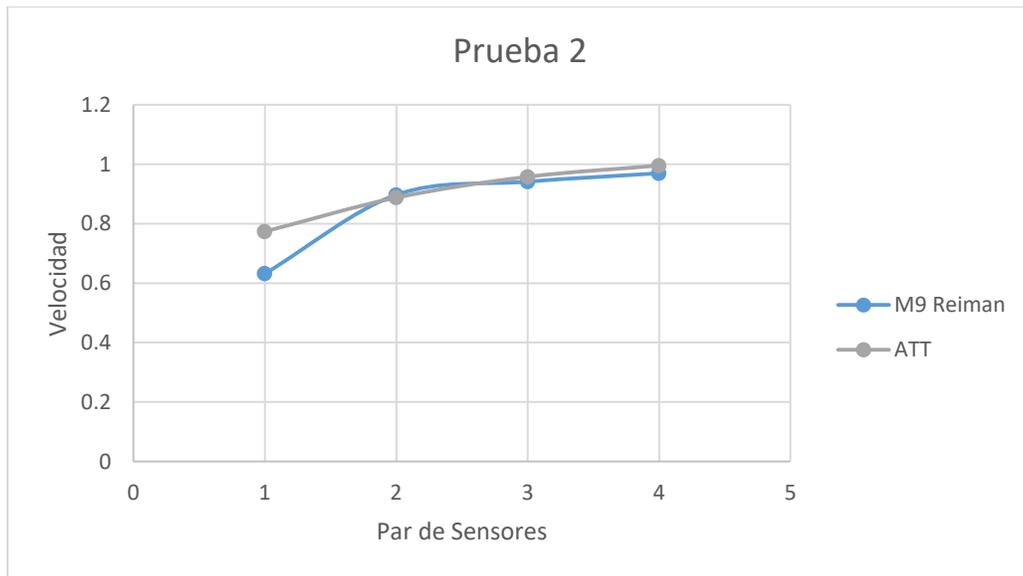
Prueba 1			
	Profundidad (m)	Velocidades	
		M9 (Reiman)	ATT (Deltawave)
Sensor 1	1.318	0.6065	0.781
Sensor 2	1.023	0.7451	0.879
Sensor 3	0.721	0.8527	0.945
Sensor 4	0.426	0.9241	0.994



Grafica 12 Comparación de resultados Prueba 1

Tabla 14 Resumen de resultados M9 y ATT Prueba 2

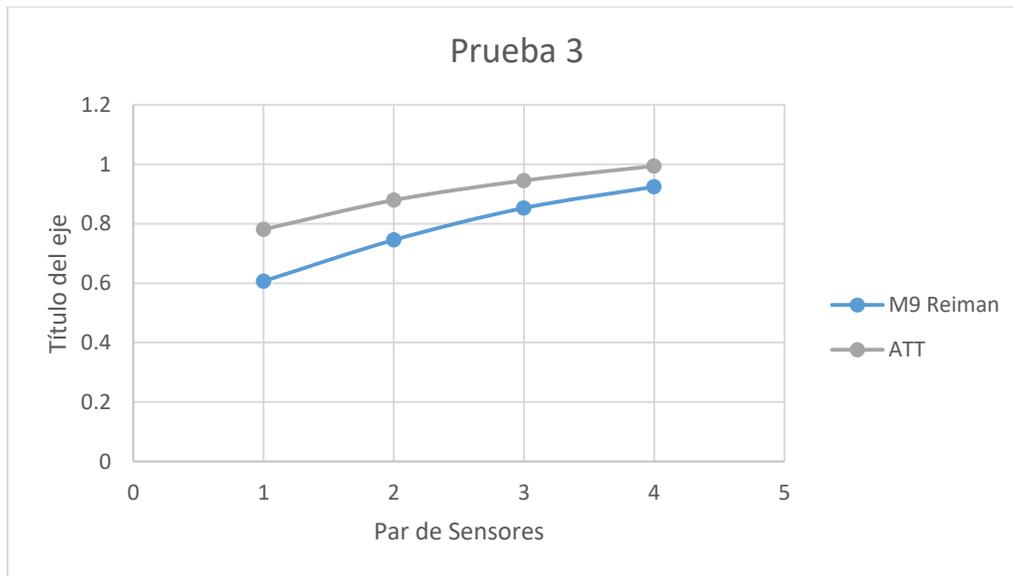
Prueba 2			
	Profundidad (m)	Velocidades	
		M9 (Reiman)	ATT (Deltawave)
Sensor 1	1.318	0.6318	0.7736
Sensor 2	1.023	0.897	0.8898
Sensor 3	0.721	0.9414	0.9578
Sensor 4	0.426	0.9697	0.9956



Grafica 13 Comparación de resultados Prueba 2

Tabla 15 Resumen de resultados M9 y ATT Prueba 3

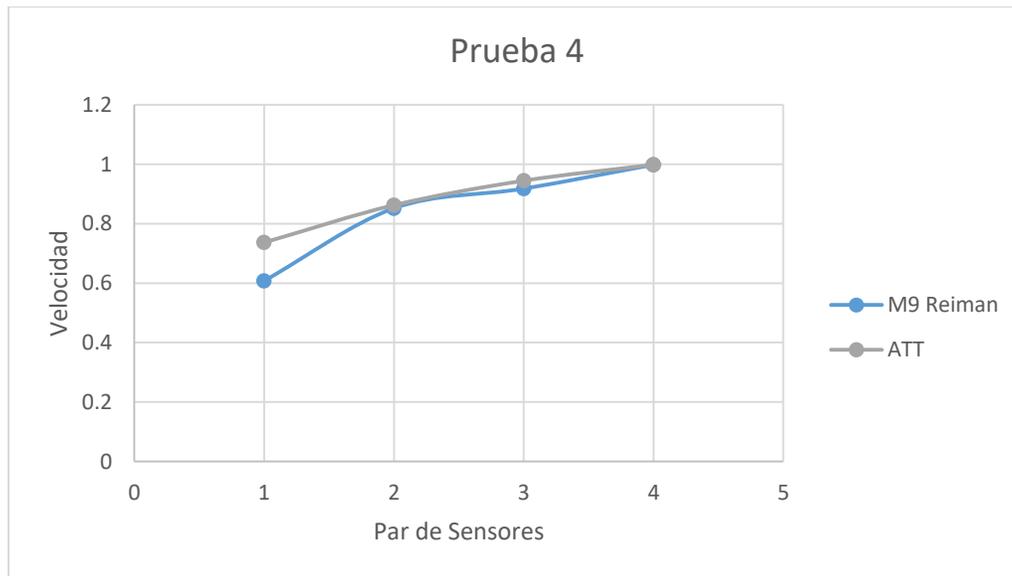
Prueba 3			
	Profundidad (m)	Velocidades	
		M9 (Reiman)	ATT (Deltawave)
Sensor 1	1.318	0.6065	0.781
Sensor 2	1.023	0.7451	0.879
Sensor 3	0.721	0.8527	0.945
Sensor 4	0.426	0.9241	0.994



Grafica 14 Comparación de resultados Prueba 3

Tabla 16 Resumen de resultados M9 y ATT Prueba 4

Prueba 4			
	Profundidad (m)	Velocidades	
		M9 (Reiman)	ATT (Deltawave)
Sensor 1	1.318	0.6076	0.7899
Sensor 2	1.023	0.8519	0.8712
Sensor 3	0.721	0.9179	0.9416
Sensor 4	0.426	0.9982	0.9925

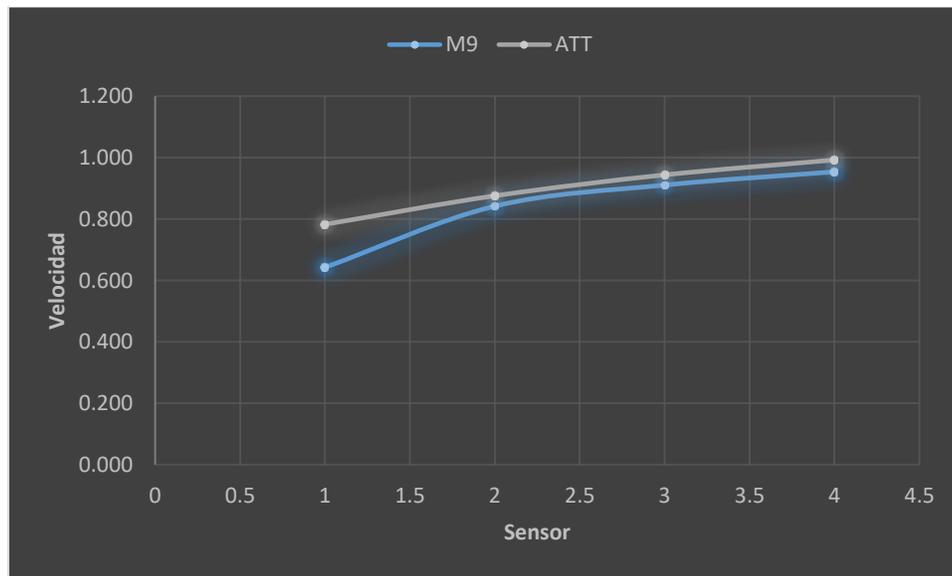


Grafica 15 Comparación de resultados Prueba 4

Promedio de las 4 pruebas realizadas con los dos equipos ultrasónicos.

Tabla 17 Promedio de las 4 pruebas

Tabla Resumen		
	Velocidades	
	M9 (Reiman)	ATT (Deltawave)
Sensor 1	0.643	0.783
Sensor 2	0.843	0.876
Sensor 3	0.911	0.944
Sensor 4	0.955	0.993



Grafica 16 Promedio de las 4 pruebas



# CAPÍTULO

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha explicado de manera sencilla cómo se genera el sonido y cómo se transmite. También se ha realizado un cálculo simplificado para demostrar por qué el sonido viaja más rápido cuando avanza a favor de la dirección de la corriente y viceversa. También se ha propuesto una explicación al fenómeno de la trayectoria preferentemente lineal del ultrasonido, en comparación con el sonido o el subsonido que se transmiten preferentemente de modo radial.

Se propone que una mejor comprensión de los fenómenos físicos posibilita un mejor uso de los instrumentos y sus resultados por parte de los operarios los equipos ultrasónicos.

Por otro lado, se ha concluido que la velocidad que entrega el medidor de tiempo de tránsito es el valor de la velocidad media calculado con el M9. Se hace la aclaración que el concepto “velocidad media” se refiere al derivado del fenómeno hidráulico (suma del área bajo la curva) y no al promedio simple de las velocidades.

Lo anterior podría resultar trivial dado que se podría cuestionar sobre qué otro valor de la velocidad estaría entregando el medidor de tiempo de tránsito. Dicha trivialidad se elimina si se hace otro cuestionamiento: ¿por qué entrega dicho valor si el Delta wave no monitorea las velocidades en el interior del transecto? (Recuérdese que el medidor de tiempo de tránsito se basa, precisamente, en el periodo de ida y regreso de la señal ultrasónica).

La respuesta podría relacionarse con lo siguiente:

Supóngase una distribución teórica de la velocidad del agua en un plano horizontal; es decir, una curva parabólica (**Figura 50**). Los aportes que la velocidad del agua hace a la velocidad del sonido son directamente proporcionales a su magnitud.

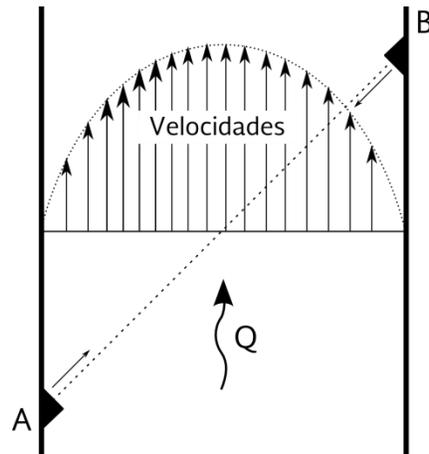


Figura 50 Aporte de la velocidad del agua a la velocidad del sonido.

Los incrementos de velocidad del sonido pueden ser descritos también por la misma forma que la línea punteada que une las puntas de flecha de los vectores. Es por ello que la velocidad que entrega el medidor ultrasónico de tiempo de travesía es igual al valor de la velocidad media de la corriente.

Se recomienda que en la enseñanza y uso de los medidores ultrasónicos, se incluyan contenidos parecidos a los de esta tesis para, como ya se ha mencionado, los resultados de la medición sean los más adecuados.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Chow, V. T. (1959). *Hidráulica de canales abiertos*. Illinois: Mc Graw Hill.
- CONAGUA. (Octubre de 2016). Actualización de Aforadores. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Edmundo, P. G., & Patiño G., C. (1998). *Modernización de técnicas de aforo en presas, segunda etapa. Informe interno*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Edmundo, P. G., Millan, B. C., Arroyo, C. V., Santana, S. J., & Vázquez, L. A. (2007). *Medición de flujo volumétrico en presas, canales y pozos*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (s.f.). Aforador tiempo de travesía. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (s.f.). Perfilador Doppler. *Modelo "RiverSurveyor S5-M9"*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- ISO/TR 8363, T. r. (01 de 09 de 1997). Measurement of liquid flow in open channels – General guidelines for selection of method. Firts Edition.
- Ochoa Alejo, L. H. (s.f.). *Métodos y sistemas de medición de gasto*. (ISBN, Ed.) México, D.F.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Patiño G. C., P. G. (1996). Revisión, evaluación y diagnóstico técnico de la infraestructura y prácticas de aforo en las obras de toma de 10 de las principales presas de riego del estado de Sinaloa. Informe interno. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pedroza González, E., & Patiño G., C. (1997). *Medición automatizada de caudales y volúmenes derivados de 20 prersas del país. Informe interno*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pedroza González, E., & Patiño G., C. (1999). *Modernización de técnicas de aforo en presas, tercera etapa. Informe interno*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pedroza González, E., Arroyo C., V. M., Ochoa A., L., Ruiz A., J., & Santana S., J. (2001). *Propuesta tecnológica para mejorar la medición en pozos agrícolas*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pedroza, G. E. (s.f.). Medidor ultrasónico de efecto doppler para canales. (O. A. L., Ed.) *Serie autodidáctica de medición del agua*, 1.



Pedroza, G., & Hinojosa, C. (2014). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

TecnoMetrica. (2016). *Tecnometrica*. Obtenido de <http://www.tecnometrica.com.mx/Medidor-de-flujo-ultrasonico-TDS-100H.html>



## 8. ANEXOS

### 8.1. Anexo A

#### 8.1.1. Resultados Equipo M9

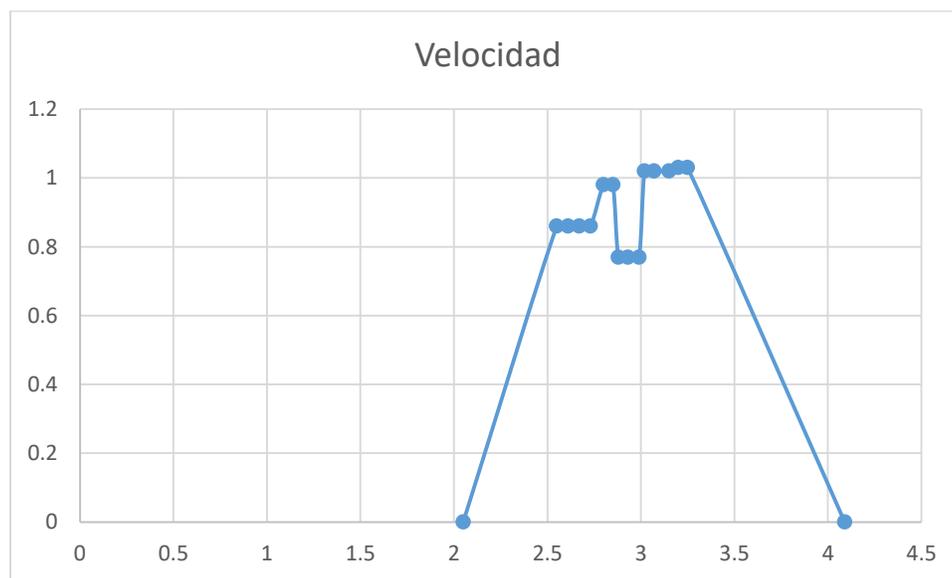
Prueba 2

Datos de sensor uno, ubicado a una profundidad de 0.332 metros.

Trayectoria	Velocidad
4.09	0
3.25	1.03
3.2	1.03
3.15	1.02
3.07	1.02
3.02	1.02
2.99	0.77
2.93	0.77

Trayectoria	Velocidad
2.88	0.77
2.85	0.98
2.8	0.98
2.73	0.86
2.67	0.86
2.61	0.86
2.55	0.86
2.05	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.332 metros.





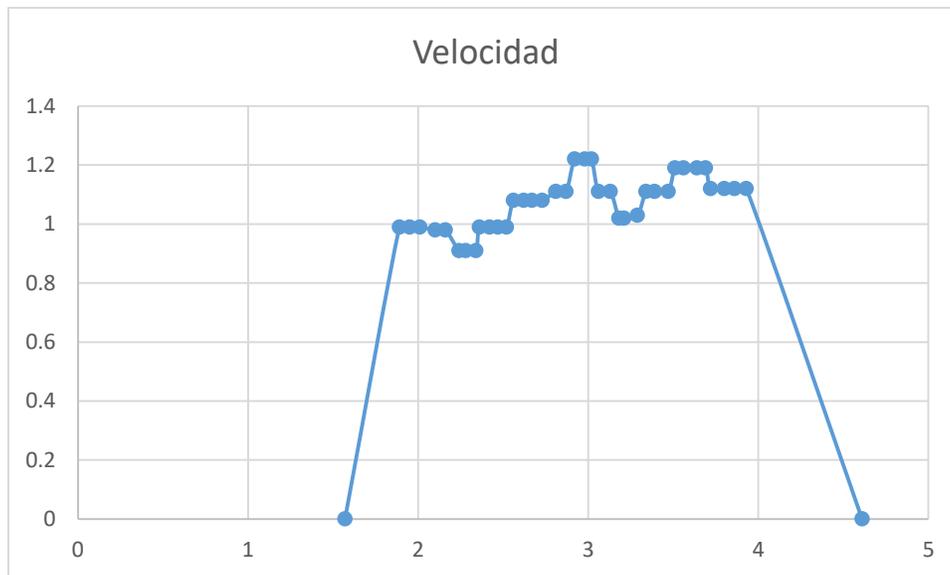
Datos de sensor dos, ubicado a una profundidad de 0.627 metros.

Trayectoria	Velocidad
4.61	0
3.93	1.12
3.86	1.12
3.8	1.12
3.72	1.12
3.69	1.19
3.64	1.19
3.56	1.19
3.51	1.19
3.47	1.11
3.39	1.11
3.34	1.11
3.29	1.03

Trayectoria	Velocidad
3.21	1.02
3.18	1.02
3.13	1.11
3.06	1.11
3.02	1.22
2.98	1.22
2.92	1.22
2.87	1.11
2.81	1.11
2.73	1.08
2.67	1.08
2.62	1.08
2.56	1.08

Trayectoria	Velocidad
2.52	0.99
2.47	0.99
2.42	0.99
2.36	0.99
2.34	0.91
2.28	0.91
2.24	0.91
2.16	0.98
2.1	0.98
2.01	0.99
1.95	0.99
1.89	0.99
1.57	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.627 metros.





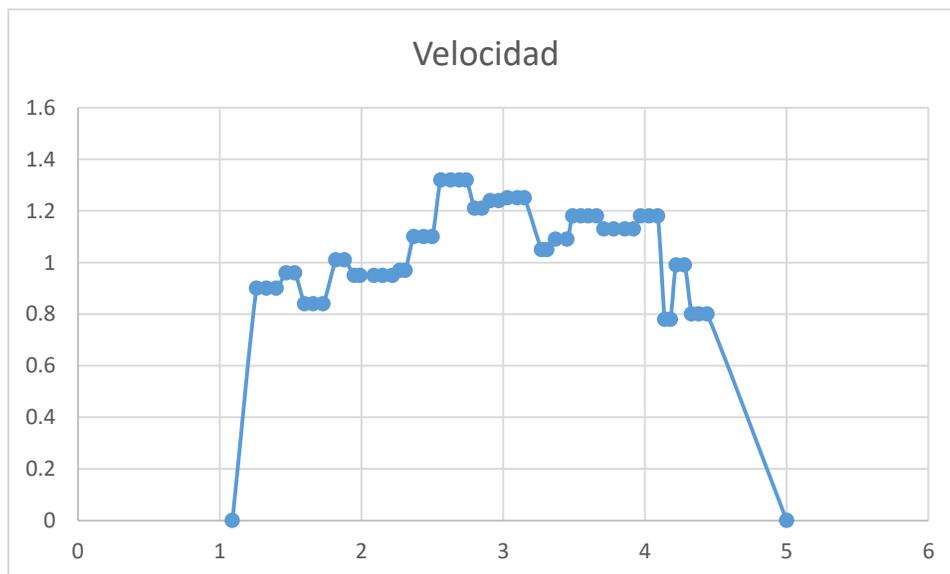
Datos de sensor tres, ubicado a una profundidad de 0.929 metros.

Trayectoria	Velocidad
5	0
4.44	0.8
4.38	0.8
4.33	0.8
4.28	0.99
4.22	0.99
4.18	0.78
4.14	0.78
4.09	1.18
4.03	1.18
3.97	1.18
3.92	1.13
3.86	1.13
3.78	1.13
3.71	1.13
3.66	1.18
3.6	1.18
3.55	1.18

Trayectoria	Velocidad
3.49	1.18
3.45	1.09
3.37	1.09
3.31	1.05
3.27	1.05
3.15	1.25
3.1	1.25
3.03	1.25
2.97	1.24
2.91	1.24
2.85	1.21
2.8	1.21
2.74	1.32
2.69	1.32
2.63	1.32
2.56	1.32
2.5	1.1
2.44	1.1

Trayectoria	Velocidad
2.37	1.1
2.31	0.97
2.27	0.97
2.22	0.95
2.15	0.95
2.09	0.95
1.99	0.95
1.95	0.95
1.88	1.01
1.82	1.01
1.73	0.84
1.66	0.84
1.6	0.84
1.53	0.96
1.47	0.96
1.4	0.9
1.33	0.9
1.26	0.9
1.09	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.929 metros.





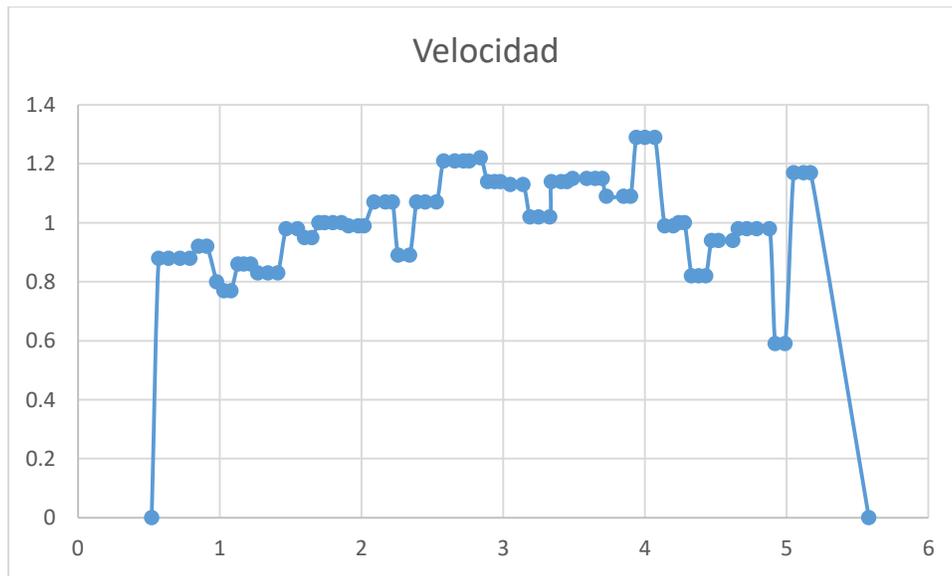
Datos del sensor cuatro, ubicado a una profundidad de 1.224 metros.

Trayectoria	Velocidad
5.58	0
5.17	1.17
5.12	1.17
5.05	1.17
4.99	0.59
4.92	0.59
4.88	0.98
4.79	0.98
4.72	0.98
4.66	0.98
4.62	0.94
4.52	0.94
4.47	0.94
4.43	0.82
4.38	0.82
4.33	0.82
4.28	1
4.24	1
4.2	0.99
4.14	0.99
4.07	1.29
4	1.29
3.94	1.29
3.9	1.09
3.85	1.09
3.73	1.09
3.7	1.15

Trayectoria	Velocidad
3.65	1.15
3.59	1.15
3.49	1.15
3.45	1.14
3.41	1.14
3.34	1.14
3.33	1.02
3.25	1.02
3.19	1.02
3.14	1.13
3.05	1.13
2.98	1.14
2.94	1.14
2.89	1.14
2.84	1.22
2.76	1.21
2.72	1.21
2.66	1.21
2.58	1.21
2.53	1.07
2.45	1.07
2.39	1.07
2.34	0.89
2.26	0.89
2.22	1.07
2.17	1.07
2.09	1.07

Trayectoria	Velocidad
2.02	0.99
1.98	0.99
1.91	0.99
1.86	1
1.8	1
1.74	1
1.7	1
1.65	0.95
1.6	0.95
1.55	0.98
1.47	0.98
1.41	0.83
1.34	0.83
1.27	0.83
1.22	0.86
1.17	0.86
1.13	0.86
1.08	0.77
1.03	0.77
0.98	0.8
0.91	0.92
0.85	0.92
0.79	0.88
0.72	0.88
0.64	0.88
0.57	0.88
0.52	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 1.224 metros.



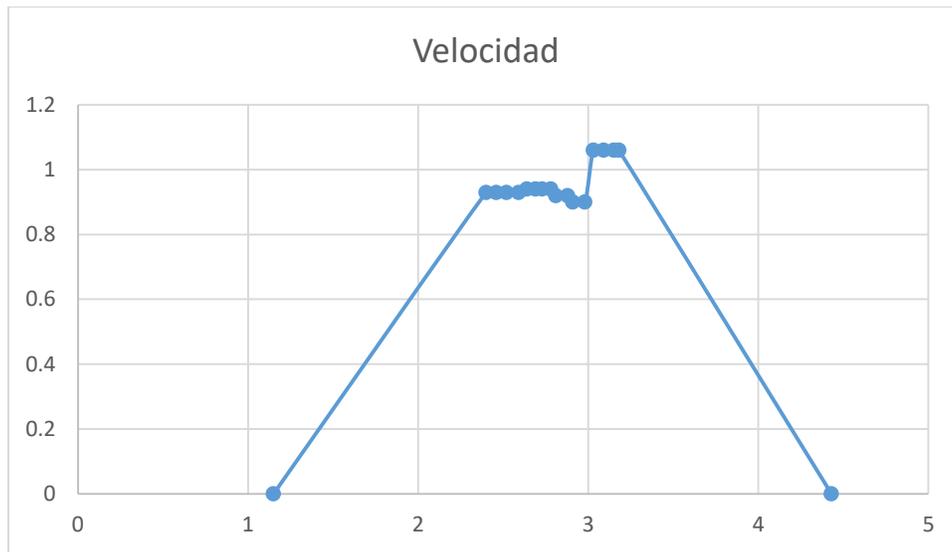
### Prueba 3

Datos de sensor uno, ubicado a una profundidad de 0.332 metros

Traectoria	Velocidad
1.15	0
2.4	0.93
2.46	0.93
2.52	0.93
2.59	0.93
2.64	0.94
2.69	0.94
2.73	0.94
2.78	0.94

Traectoria	Velocidad
2.81	0.92
2.88	0.92
2.91	0.9
2.98	0.9
3.03	1.06
3.09	1.06
3.15	1.06
3.18	1.06
4.43	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.332 metros.



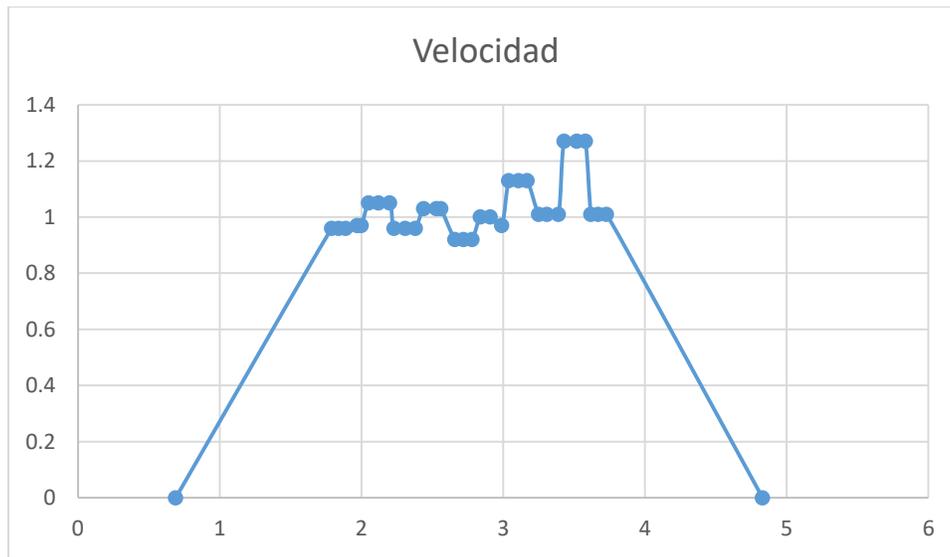
Datos de sensor dos, ubicado a una profundidad de 0.627 metros.

Trayectoria	Velocidad
0.69	0
1.79	0.96
1.84	0.96
1.89	0.96
1.97	0.97
2	0.97
2.05	1.05
2.12	1.05
2.2	1.05
2.23	0.96
2.31	0.96
2.38	0.96

Trayectoria	Velocidad
2.44	1.03
2.53	1.03
2.56	1.03
2.66	0.92
2.72	0.92
2.78	0.92
2.84	1
2.91	1
2.99	0.97
3.04	1.13
3.11	1.13
3.17	1.13

Trayectoria	Velocidad
3.25	1.01
3.31	1.01
3.39	1.01
3.43	1.27
3.52	1.27
3.58	1.27
3.62	1.01
3.67	1.01
3.73	1.01
4.83	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.627 metros.



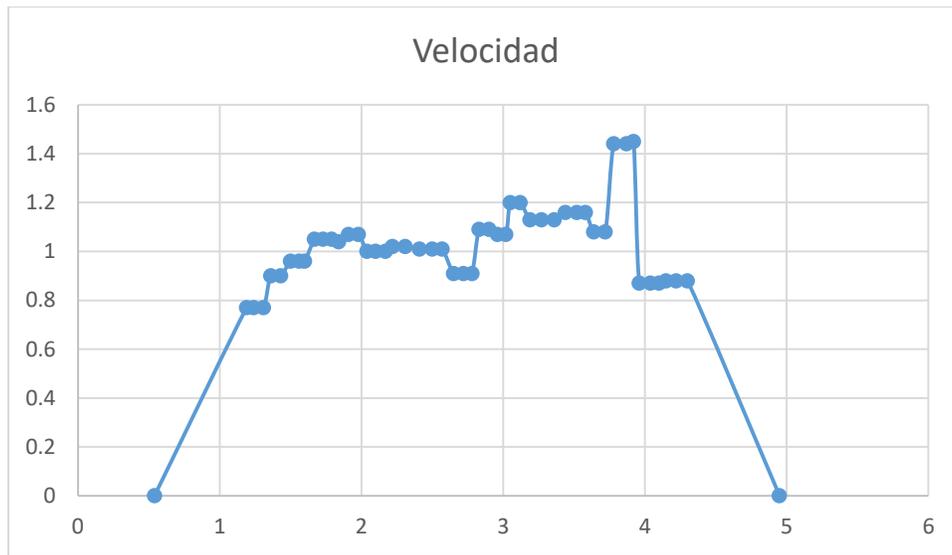
Datos de sensor tres, ubicado a una profundidad de 0.929 metros.

Trayectoria	Velocidad
0.54	0
1.19	0.77
1.24	0.77
1.31	0.77
1.36	0.9
1.43	0.9
1.5	0.96
1.56	0.96
1.6	0.96
1.67	1.05
1.73	1.05
1.79	1.05
1.84	1.04
1.91	1.07
1.98	1.07
2.04	1
2.1	1

Trayectoria	Velocidad
2.17	1
2.22	1.02
2.31	1.02
2.41	1.01
2.5	1.01
2.57	1.01
2.65	0.91
2.72	0.91
2.78	0.91
2.83	1.09
2.9	1.09
2.96	1.07
3.02	1.07
3.05	1.2
3.12	1.2
3.19	1.13
3.27	1.13

Trayectoria	Velocidad
3.36	1.13
3.44	1.16
3.52	1.16
3.58	1.16
3.64	1.08
3.72	1.08
3.78	1.44
3.87	1.44
3.92	1.45
3.96	0.87
4.04	0.87
4.1	0.87
4.15	0.88
4.22	0.88
4.3	0.88
4.95	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.929 metros.



Datos del sensor cuatro, ubicado a una profundidad de 1.224 metros.

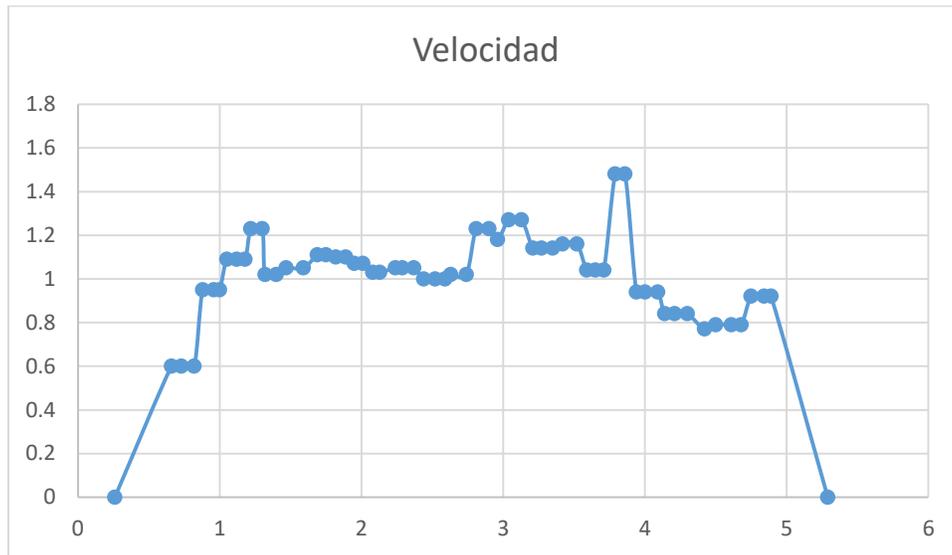
Trayectoria	Velocidad
0.26	0
0.66	0.6
0.73	0.6
0.82	0.6
0.88	0.95
0.96	0.95
1	0.95
1.05	1.09
1.12	1.09
1.18	1.09
1.22	1.23
1.3	1.23
1.32	1.02
1.4	1.02
1.47	1.05
1.59	1.05
1.69	1.11
1.75	1.11
1.82	1.1
1.89	1.1
1.95	1.07

Trayectoria	Velocidad
2.01	1.07
2.08	1.03
2.13	1.03
2.24	1.05
2.29	1.05
2.37	1.05
2.44	1
2.52	1
2.59	1
2.63	1.02
2.74	1.02
2.81	1.23
2.9	1.23
2.96	1.18
3.04	1.27
3.13	1.27
3.21	1.14
3.27	1.14
3.35	1.14
3.42	1.16
3.52	1.16

Trayectoria	Velocidad
3.59	1.04
3.65	1.04
3.71	1.04
3.79	1.48
3.86	1.48
3.94	0.94
4	0.94
4.09	0.94
4.14	0.84
4.21	0.84
4.3	0.84
4.42	0.77
4.5	0.79
4.61	0.79
4.68	0.79
4.75	0.92
4.84	0.92
4.89	0.92
5.29	0



La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 1.224 metros.



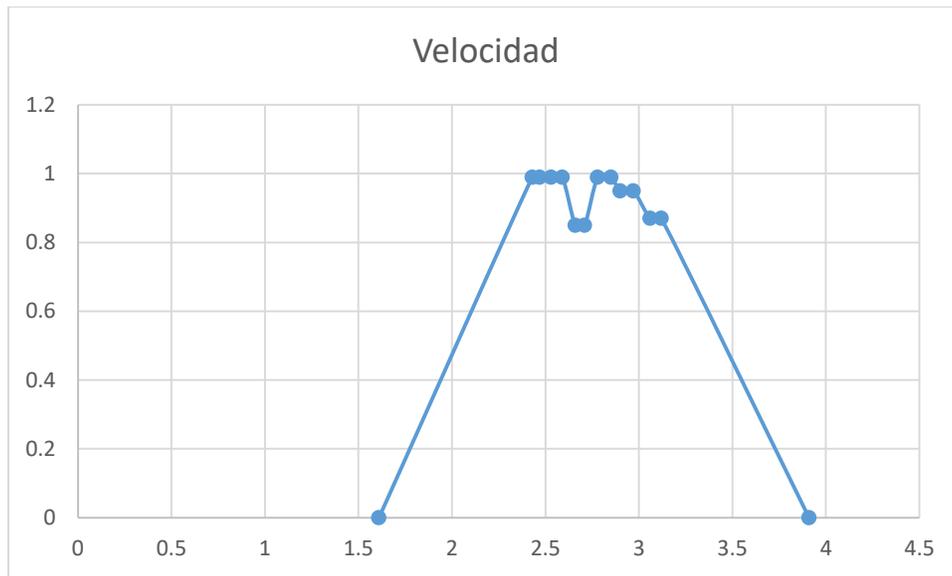
#### Prueba 4

Datos de sensor uno, ubicado a una profundidad de 0.332 metros.

Trayectoria	Velocidad
3.91	0
3.12	0.87
3.06	0.87
2.97	0.95
2.9	0.95
2.85	0.99
2.78	0.99

Trayectoria	Velocidad
2.71	0.85
2.66	0.85
2.59	0.99
2.53	0.99
2.47	0.99
2.43	0.99
1.61	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.332 metros.



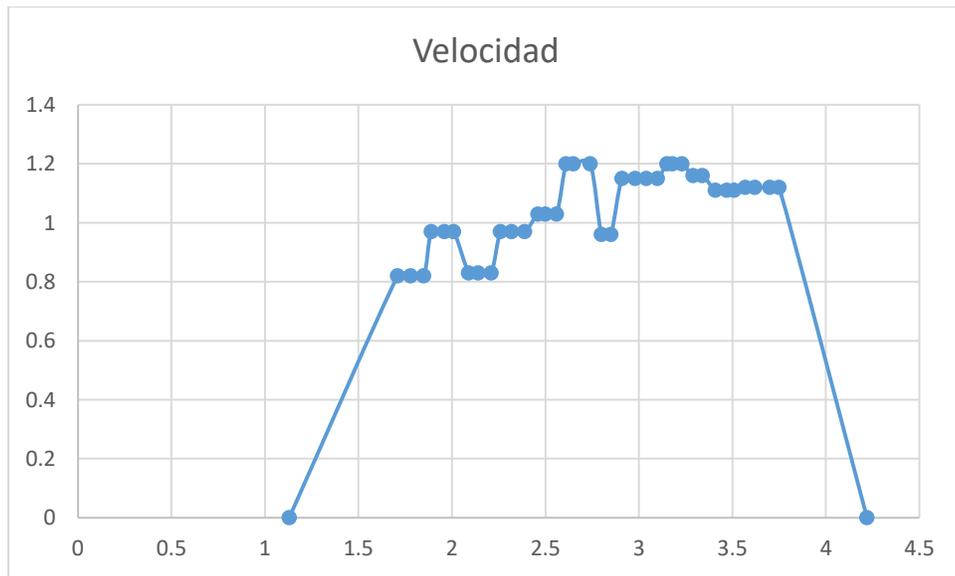
Datos de sensor dos, ubicado a una profundidad de 0.627 metros.

Trayectoria	Velocidad
4.22	0
3.75	1.12
3.7	1.12
3.62	1.12
3.57	1.12
3.51	1.11
3.47	1.11
3.41	1.11
3.34	1.16
3.29	1.16
3.23	1.2
3.18	1.2
3.15	1.2

Trayectoria	Velocidad
3.1	1.15
3.04	1.15
2.98	1.15
2.91	1.15
2.85	0.96
2.8	0.96
2.74	1.2
2.65	1.2
2.61	1.2
2.56	1.03
2.5	1.03
2.46	1.03
2.39	0.97

Trayectoria	Velocidad
2.32	0.97
2.26	0.97
2.21	0.83
2.14	0.83
2.09	0.83
2.01	0.97
1.96	0.97
1.89	0.97
1.85	0.82
1.78	0.82
1.71	0.82
1.13	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.627 metros.



Datos de sensor tres, ubicado a una profundidad de 0.929 metros.

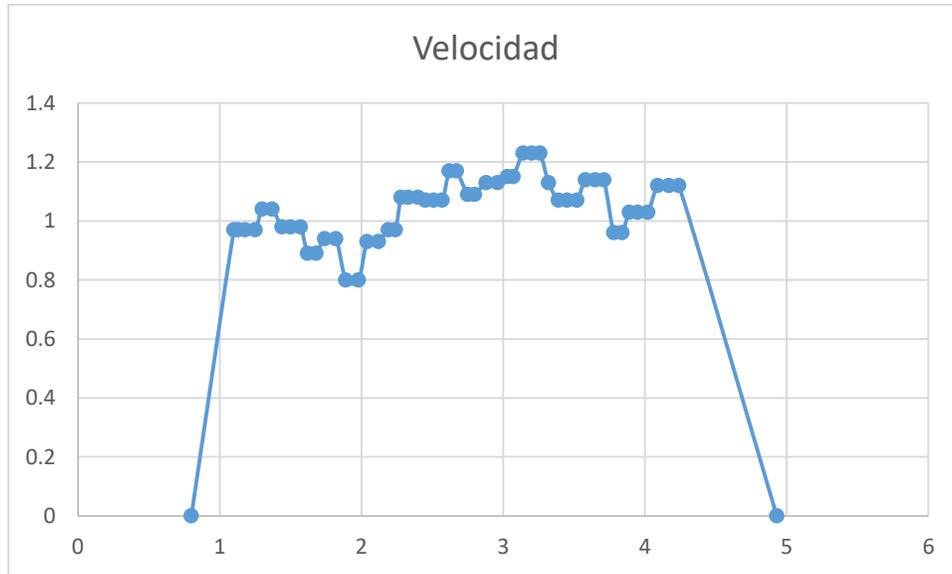
Trayectoria	Velocidad
4.93	0
4.24	1.12
4.17	1.12
4.09	1.12
4.02	1.03
3.95	1.03
3.89	1.03
3.84	0.96
3.78	0.96
3.71	1.14
3.65	1.14
3.58	1.14
3.52	1.07
3.45	1.07
3.39	1.07
3.32	1.13
3.26	1.23
3.2	1.23

Trayectoria	Velocidad
3.14	1.23
3.07	1.15
3.03	1.15
2.96	1.13
2.88	1.13
2.8	1.09
2.75	1.09
2.67	1.17
2.62	1.17
2.57	1.07
2.51	1.07
2.45	1.07
2.4	1.08
2.33	1.08
2.28	1.08
2.24	0.97
2.19	0.97
2.12	0.93

Trayectoria	Velocidad
2.04	0.93
1.98	0.8
1.89	0.8
1.82	0.94
1.74	0.94
1.68	0.89
1.62	0.89
1.57	0.98
1.5	0.98
1.44	0.98
1.37	1.04
1.3	1.04
1.25	0.97
1.18	0.97
1.13	0.97
1.1	0.97
0.8	0



La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 0.929 metros.



Datos del sensor cuatro, ubicado a una profundidad de 1.224 metros.

Trayectoria	Velocidad
5.15	0
5.08	0.68
4.99	0.68
4.93	0.68
4.88	0.74
4.8	0.74
4.72	0.78
4.67	0.78
4.64	1.08
4.6	1.08
4.55	1.08
4.49	1.08
4.43	1.12
4.33	1.12
4.27	1.12
4.22	1.27
4.16	1.27
4.11	1.27

Trayectoria	Velocidad
4.05	1.27
4	1.09
3.93	1.09
3.88	1.09
3.81	0.98
3.75	1.16
3.69	1.16
3.62	1.16
3.55	1.16
3.48	1.1
3.42	1.1
3.37	1.16
3.29	1.16
3.25	1.28
3.16	1.28
3.12	1.14
3.04	1.14
2.98	1.21

Trayectoria	Velocidad
2.94	1.21
2.85	1.21
2.8	1.21
2.75	1.21
2.67	1.18
2.63	1.18
2.56	1.11
2.51	1.11
2.43	1.11
2.38	1.06
2.31	1.06
2.24	1.11
2.17	1.11
2.11	0.98
2.05	0.98
1.99	1.06
1.92	1.06
1.85	0.92

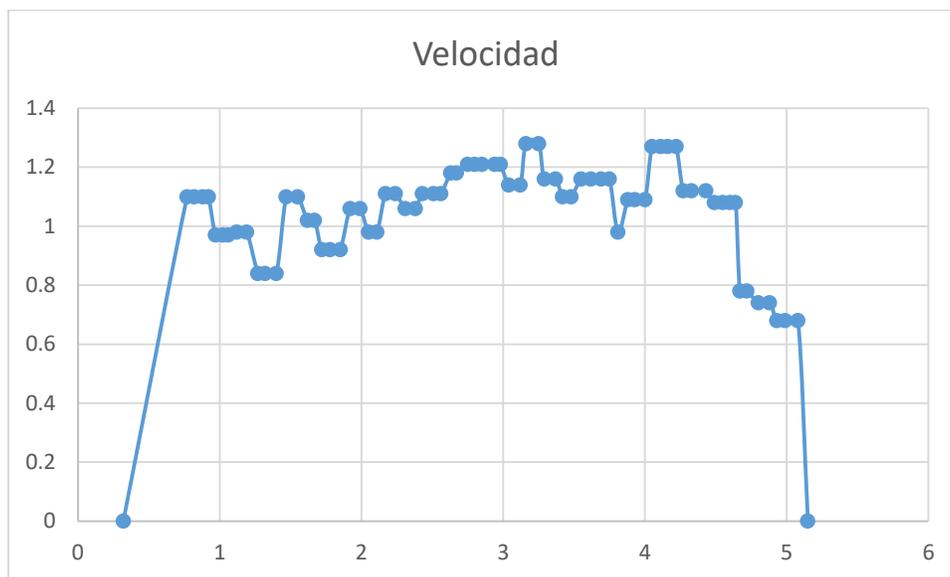


Trayectoria	Velocidad
1.78	0.92
1.72	0.92
1.67	1.02
1.62	1.02
1.55	1.1
1.47	1.1
1.4	0.84

Trayectoria	Velocidad
1.32	0.84
1.27	0.84
1.19	0.98
1.12	0.98
1.06	0.97
1.02	0.97
0.97	0.97

Trayectoria	Velocidad
0.92	1.1
0.88	1.1
0.82	1.1
0.77	1.1
0.32	0

La siguiente gráfica muestra las velocidades tomadas a lo largo del trayecto del canal a la profundidad de 1.224 metros.



### 8.1.2. Áreas por Sumatoria Reiman

Prueba 2

Sensor 1	Sensor 1
0.4326	0.0462
0.0515	0.0385
0.05125	0.02625
0.0816	0.049
0.051	0.0644
0.02685	0.0516

Sensor 1	Sensor 2
0.0516	0.3808
0.0516	0.0784
0.215	0.0672
0	0.0896
	0.03465
	0.0595

Sensor 2	Sensor 2
0.0952	0.082
0.0595	0.0306
0.046	0.05325
0.0888	0.0777
0.0555	0.0466
0.0535	0.0488



Sensor 2	Sensor 3
0.0732	0.224
0.05825	0.048
0.0666	0.04
0.0876	0.04475
0.0648	0.0594
0.054	0.0354
0.0648	0.0312
0.0414	0.049
0.0495	0.0708
0.0495	0.0708
0.0594	0.05775
0.019	0.0678
0.0546	0.0904
0.0364	0.0791
0.0756	0.05775
0.0588	0.0708
0.08865	0.059
0.0594	0.0708
0.0594	0.0454
0.1584	0.0872
0	0.0642
	0.042
	0.138
	0.0625
	0.0875
	0.0747
	0.0744
	0.0735

Sensor 3	Sensor 4
0.0605	0.23985
0.0759	0.0585
0.066	0.0819
0.0792	0.0528
0.0924	0.0413
0.0726	0.0314
0.066	0.0882
0.077	0.0686
0.0621	0.0588
0.0388	0.0384
0.048	0.094
0.0665	0.047
0.057	0.0352
0.095	0.041
0.038	0.041
0.0686	0.0455
0.0606	0.04
0.08325	0.0398
0.0588	0.0594
0.0504	0.0798
0.063	0.0903
0.0576	0.0774
0.0651	0.0476
0.063	0.0545
0.063	0.1308
0.0765	0.0336
0	0.0575
	0.069

Sensor 4	Sensor 4
0.115	0.04975
0.0458	0.06
0.0456	0.06
0.0798	0.04
0.0108	0.04875
0.0816	0.0475
0.0612	0.04825
0.05375	0.0784
0.1017	0.0543
0.07945	0.0581
0.0456	0.0581
0.057	0.04225
0.059	0.043
0.0972	0.0344
0.0484	0.04075
0.0726	0.0385
0.0968	0.03925
0.057	0.0602
0.0856	0.0552
0.0642	0.054
0.049	0.0616
0.0712	0.0704
0.0392	0.0616
0.0535	0.022
0.0856	0
0.0721	
0.0396	
0.0693	

### Prueba 3

Sensor 1	Sensor 1
0.58125	0.0376
0.0558	0.047
0.0558	0.0279
0.0651	0.0644
0.04675	0.0273
0.047	0.063

Sensor 1	Sensor 2
0.049	0.528
0.0636	0.048
0.0636	0.048
0.0318	0.0772
0.6625	0.0291
0	0.0505

Sensor 2	Sensor 2
0.0735	0.0927
0.084	0.0309
0.03015	0.0975
0.0768	0.0552
0.0672	0.0552
0.0597	0.0576



Sensor 2	Sensor 3
0.07	0.25025
0.0788	0.0385
0.0525	0.0539
0.0791	0.04175
0.0678	0.063
0.0856	0.0651
0.0606	0.0576
0.0808	0.0384
0.0456	0.07035
0.1143	0.063
0.0762	0.063
0.0456	0.05225
0.0505	0.07385
0.0606	0.0749
0.5555	0.0621
0	0.06
	0.07
	0.0505
	0.0918
	0.1015
	0.0909
	0.0707
	0.0768
	0.0637
	0.0546

Sensor 3	Sensor 4
0.05	0.12
0.0763	0.042
0.0648	0.054
0.0642	0.0465
0.03405	0.076
0.084	0.038
0.08155	0.051
0.0904	0.0763
0.1017	0.0654
0.0916	0.0464
0.0928	0.0984
0.0696	0.0225
0.0672	0.0816
0.0864	0.07245
0.0756	0.126
0.1296	0.108
0.07225	0.0666
0.0464	0.07735
0.0696	0.077
0.0522	0.0651
0.04375	0.0642
0.0616	0.0735
0.0704	0.0515
0.286	0.1144
0	0.0525

Sensor 4	Sensor 4
0.084	0.0588
0.07175	0.0756
0.08	0.0966
0.07	0.0624
0.0404	0.0869
0.1122	0.0553
0.07875	0.05985
0.1107	0.0828
0.0723	0.046
0.098	0.184
0.1143	0
0.0964	
0.0684	
0.0912	
0.0805	
0.116	
0.077	
0.0624	
0.0624	
0.1008	
0.1036	
0.0968	
0.0564	
0.0846	
0.0445	

#### Prueba 4

Sensor 1	Sensor 1
0.34365	0.0644
0.0522	0.0594
0.0819	0.0594
0.0665	0.0396
0.0485	0.4059
0.0693	0
0.0644	
0.0425	

Sensor 2	Sensor 2
0.2632	0.0708
0.056	0.06
0.0896	0.036
0.056	0.05875
0.0669	0.069
0.0444	0.069
0.0666	0.0805
0.07945	0.0633
0.058	0.048

Sensor 2	Sensor 2
0.0648	0.045
0.108	0.0581
0.048	0.0415
0.05575	0.072
0.0618	0.0485
0.0412	0.0679
0.07	0.0358
0.0679	0.0574
0.0582	0.0574
	0.2378



Sensor 3	Sensor 3
0.3864	0.0904
0.0784	0.056
0.086	0.056
0.07525	0.0642
0.0721	0.0645
0.0597	0.05375
0.04975	0.0756
0.063	0.05125
0.0735	0.041
0.0684	0.0475
0.07735	0.0665
0.0663	0.0692
0.0749	0.0519
0.066	0.0783
0.0805	0.0609
0.0708	0.0732
0.0738	0.0549
0.0714	0.0561
0.0833	0.04675
0.0456	0.0686
0.0798	0.0606
0.0888	0.0707
0.0888	0.07035
0.0565	0.05025

Sensor 3	Sensor 4
0.0679	0.0238
0.0485	0.0612
0.01455	0.0408
0.1455	0.0355
0	0.0592
	0.0608
	0.039
	0.0279
	0.0432
	0.054
	0.0648
	0.066
	0.112
	0.0672
	0.05975
	0.0762
	0.0635
	0.0762
	0.059
	0.0763
	0.0545
	0.07245
	0.0642
	0.0696

Sensor 4	Sensor 4
0.0812	0.0627
0.0812	0.0588
0.0791	0.0612
0.066	0.0742
0.0565	0.0693
0.0928	0.0644
0.0488	0.0552
0.1152	0.0485
0.0484	0.051
0.0912	0.0742
0.0705	0.088
0.0484	0.0679
0.1089	0.0672
0.0605	0.042
0.0605	0.0728
0.0956	0.0686
0.0472	0.0585
0.08015	0.0388
0.0555	0.0485
0.0888	0.05175
0.05425	0.044
0.0742	0.066
0.07595	0.055
0.0777	0.2475
	0

## 8.2. Anexo B

### 8.2.1. Resultados Equipo Deltawave ATT

Prueba 2

Datos de primer par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.332 metros.

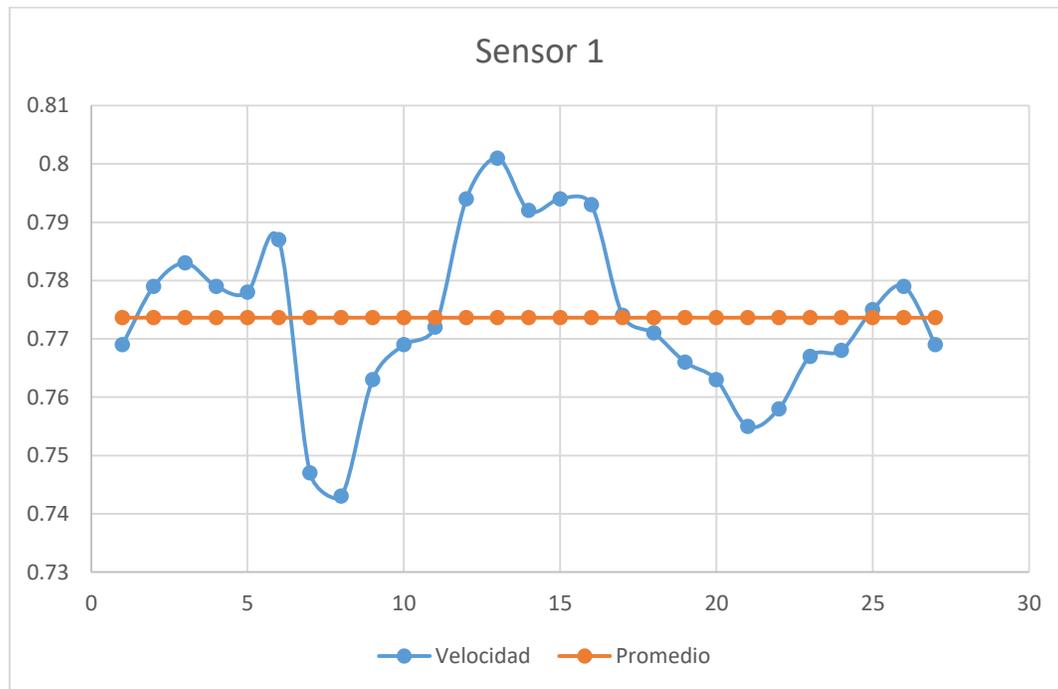


Lectura	Velocidad
1	0.769
2	0.779
3	0.783
4	0.779
5	0.778
6	0.787
7	0.787
8	0.747
9	0.743

Lectura	Velocidad
10	0.769
11	0.772
12	0.794
13	0.801
14	0.792
15	0.794
16	0.793
17	0.774
18	0.771

Lectura	Velocidad
19	0.766
20	0.763
21	0.755
22	0.758
23	0.767
24	0.768
25	0.775
26	0.779
27	0.769

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor uno, a una profundidad de 0.332 metros.





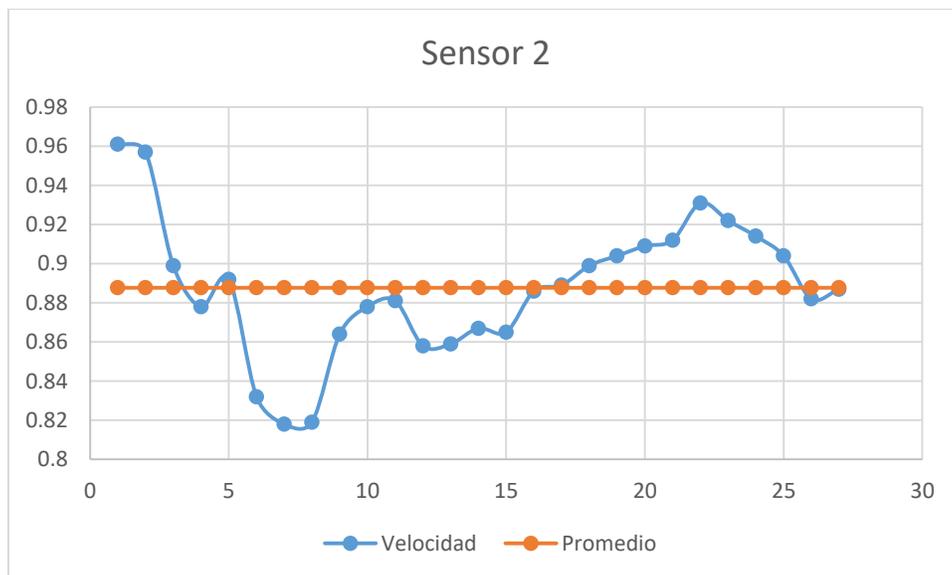
Datos de segundo par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.627 metros.

Lectura	Velocidad
1	0.961
2	0.957
3	0.899
4	0.878
5	0.892
6	0.832
7	0.818
8	0.819
9	0.864

Lectura	Velocidad
10	0.878
11	0.881
12	0.858
13	0.859
14	0.867
15	0.865
16	0.886
17	0.889
18	0.899

Lectura	Velocidad
19	0.904
20	0.909
21	0.912
22	0.931
23	0.922
24	0.914
25	0.904
26	0.882
27	0.887

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor dos, a una profundidad de 0.627 metros.





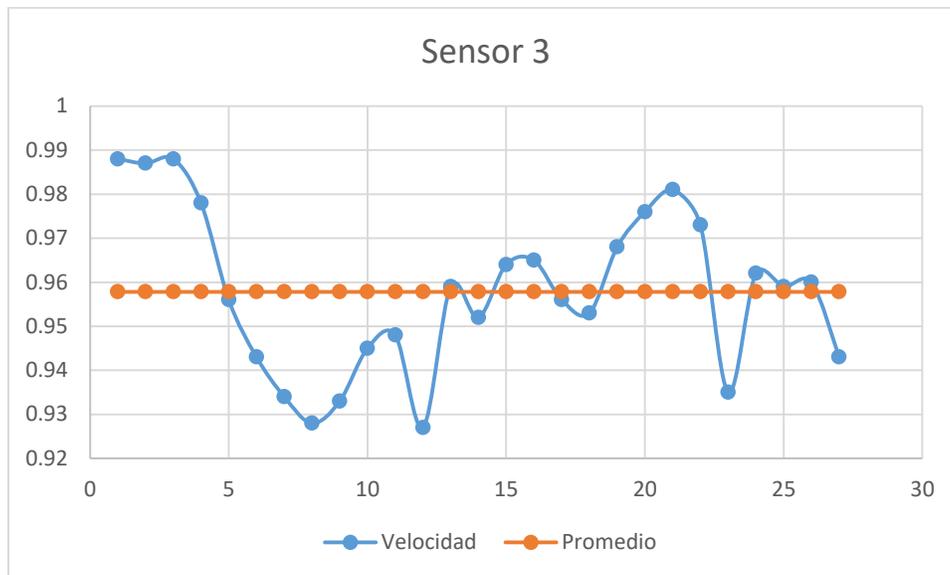
Datos del tercer par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.929 metros.

Lectura	Velocidad
1	0.988
2	0.987
3	0.988
4	0.978
5	0.956
6	0.943
7	0.934
8	0.928
9	0.933

Lectura	Velocidad
10	0.945
11	0.948
12	0.927
13	0.959
14	0.952
15	0.964
16	0.965
17	0.956
18	0.953

Lectura	Velocidad
19	0.968
20	0.976
21	0.981
22	0.973
23	0.935
24	0.962
25	0.959
26	0.96
27	0.943

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor tres, a una profundidad de 0.929 metros.





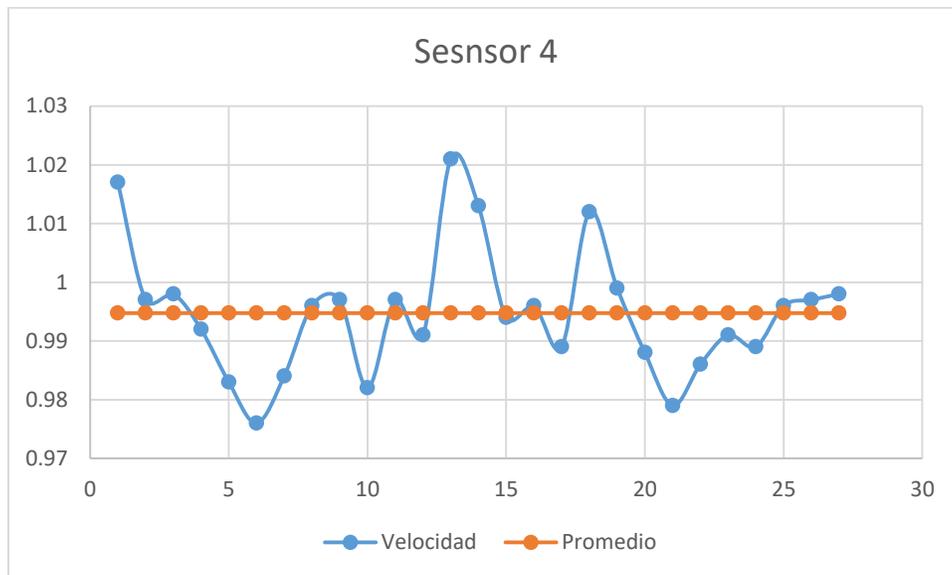
Datos del cuarto par de sensores, ubicado a una profundidad de 1.224 metros

Lectura	Velocidad
1	1.017
2	0.997
3	0.998
4	0.992
5	0.983
6	0.976
7	0.984
8	0.996
9	0.997

Lectura	Velocidad
10	0.982
11	0.997
12	0.991
13	1.021
14	1.013
15	0.994
16	0.996
17	0.989
18	1.012

Lectura	Velocidad
19	0.999
20	0.988
21	0.979
22	0.986
23	0.991
24	0.989
25	0.996
26	0.997
27	0.998

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor cuatro, a una profundidad de 1.224 metros.





### Prueba 3

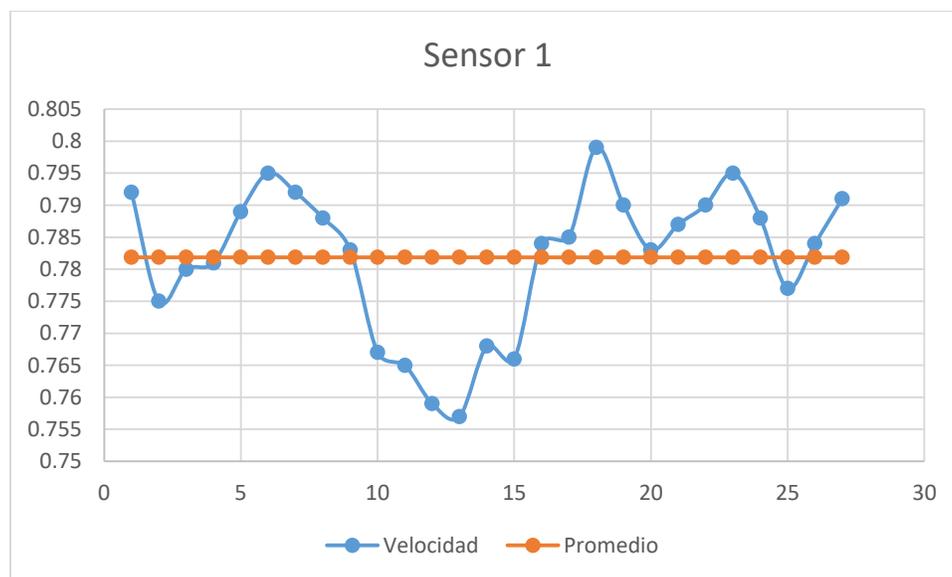
Datos de primer par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.332 metros.

Lectura	Velocidad
1	0.792
2	0.775
3	0.78
4	0.781
5	0.789
6	0.795
7	0.792
8	0.788
9	0.783

Lectura	Velocidad
10	0.767
11	0.765
12	0.759
13	0.757
14	0.768
15	0.766
16	0.784
17	0.785
18	0.799

Lectura	Velocidad
19	0.79
20	0.783
21	0.787
22	0.79
23	0.795
24	0.788
25	0.777
26	0.784
27	0.791

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor uno, a una profundidad de 0.332 metros.





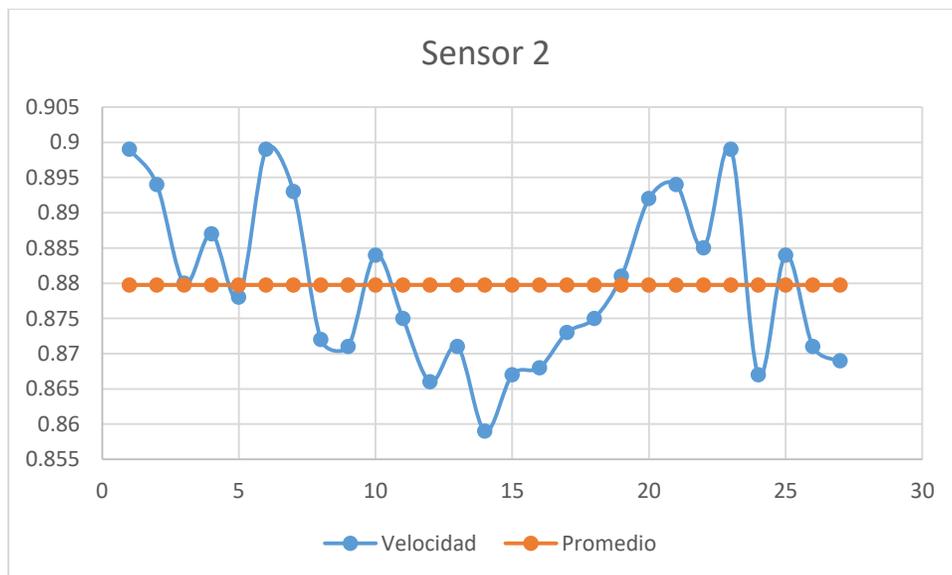
Datos de segundo par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.627 metros.

Lectura	Velocidad
1	0.899
2	0.894
3	0.88
4	0.887
5	0.878
6	0.899
7	0.893
8	0.872
9	0.871

Lectura	Velocidad
10	0.884
11	0.875
12	0.866
13	0.871
14	0.859
15	0.867
16	0.868
17	0.873
18	0.875

Lectura	Velocidad
19	0.881
20	0.892
21	0.894
22	0.885
23	0.899
24	0.867
25	0.884
26	0.871
27	0.869

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor dos, a una profundidad de 0.627 metros.





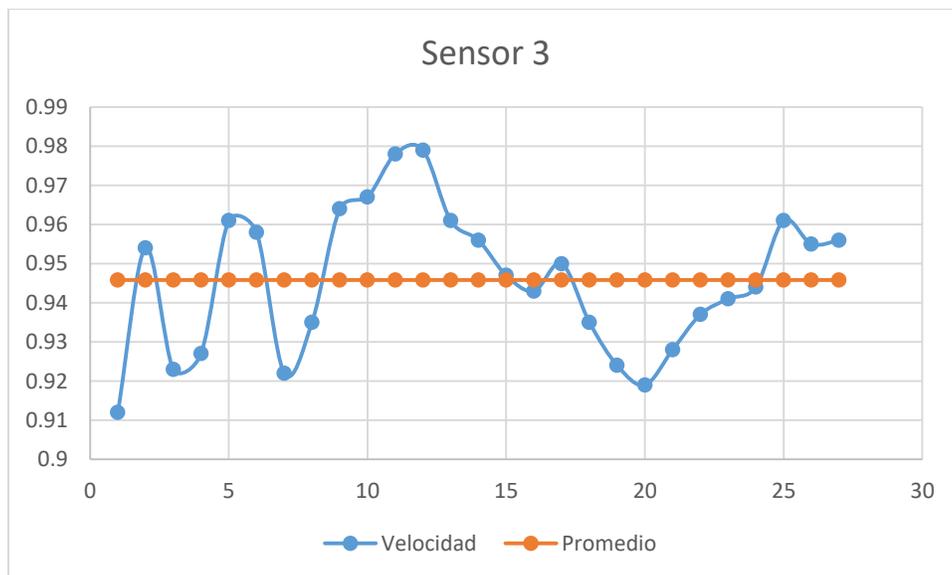
Datos del tercer par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.929 metros.

Lectura	Velocidad
1	0.912
2	0.954
3	0.923
4	0.927
5	0.961
6	0.958
7	0.922
8	0.935
9	0.964

Lectura	Velocidad
10	0.967
11	0.978
12	0.979
13	0.961
14	0.956
15	0.947
16	0.943
17	0.95
18	0.935

Lectura	Velocidad
19	0.924
20	0.919
21	0.928
22	0.937
23	0.941
24	0.944
25	0.961
26	0.955
27	0.956

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor tres, a una profundidad de 0.929 metros.





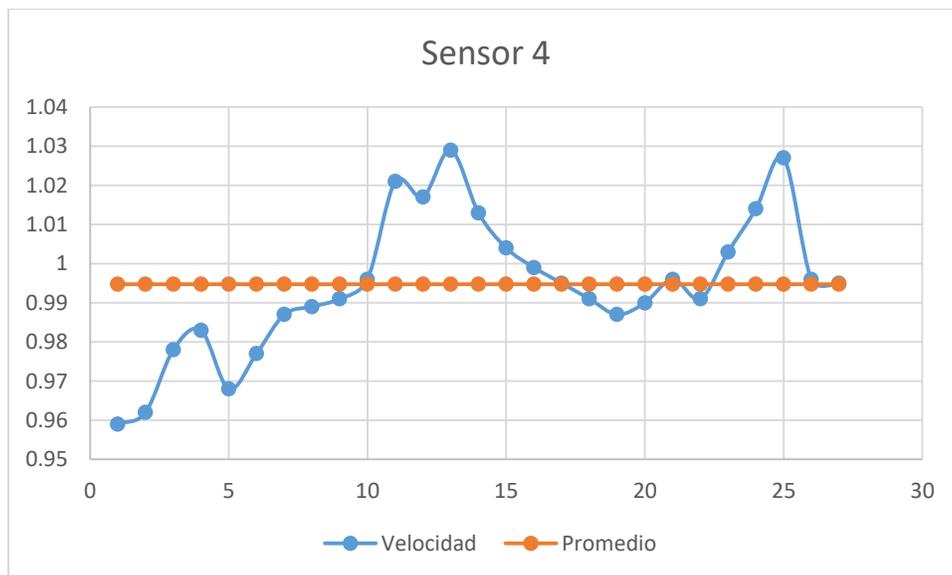
Datos del cuarto par de sensores, ubicado a una profundidad de 1.224 metros

Lectura	Velocidad
1	0.959
2	0.962
3	0.978
4	0.983
5	0.968
6	0.977
7	0.987
8	0.989
9	0.991

Lectura	Velocidad
10	0.996
11	1.021
12	1.017
13	1.029
14	1.013
15	1.004
16	0.999
17	0.995
18	0.991

Lectura	Velocidad
19	0.987
20	0.99
21	0.996
22	0.991
23	1.003
24	1.014
25	1.027
26	0.996
27	0.995

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor cuatro, a una profundidad de 1.224 metros.





### Prueba 4

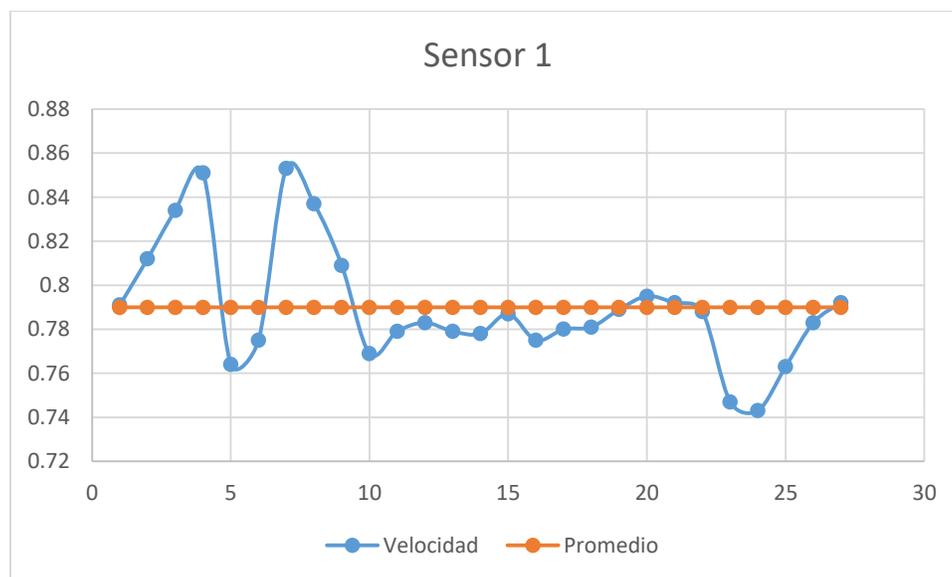
Datos de primer par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.332 metros.

Lectura	Velocidad
1	0.791
2	0.812
3	0.834
4	0.851
5	0.764
6	0.775
7	0.853
8	0.837
9	0.809

Lectura	Velocidad
10	0.769
11	0.779
12	0.783
13	0.779
14	0.778
15	0.787
16	0.775
17	0.78
18	0.781

Lectura	Velocidad
19	0.789
20	0.795
21	0.792
22	0.788
23	0.747
24	0.743
25	0.763
26	0.783
27	0.792

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor uno, a una profundidad de 0.332 metros.





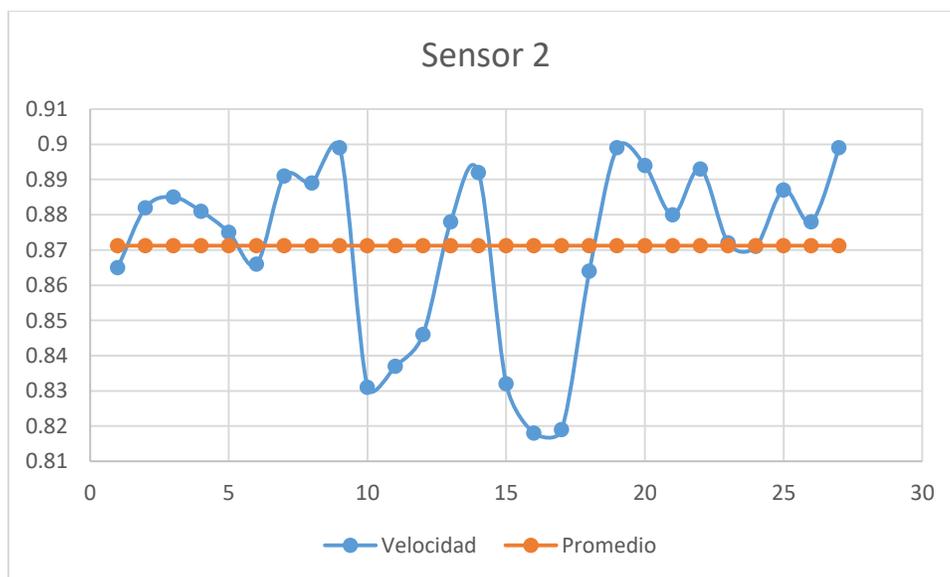
Datos de segundo par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.627 metros.

Lectura	Velocidad
1	0.865
2	0.882
3	0.885
4	0.881
5	0.875
6	0.866
7	0.891
8	0.889
9	0.899

Lectura	Velocidad
10	0.831
11	0.837
12	0.846
13	0.878
14	0.892
15	0.832
16	0.818
17	0.819
18	0.864

Lectura	Velocidad
19	0.899
20	0.894
21	0.88
22	0.893
23	0.872
24	0.871
25	0.887
26	0.878
27	0.899

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor dos, a una profundidad de 0.627 metros.





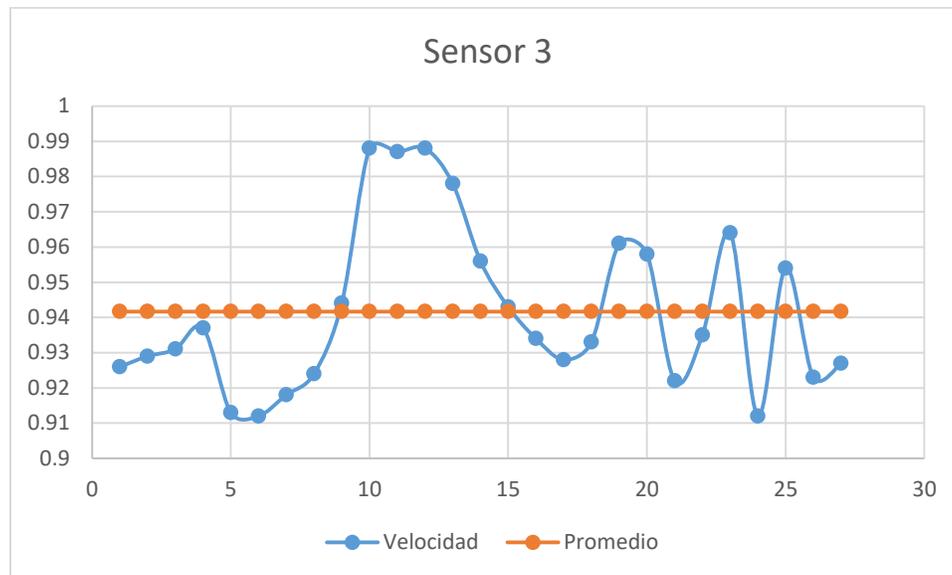
Datos del tercer par de sensores, ubicado a una profundidad de 0.929 metros.

Lectura	Velocidad
1	0.926
2	0.929
3	0.931
4	0.937
5	0.913
6	0.912
7	0.918
8	0.924
9	0.944

Lectura	Velocidad
10	0.988
11	0.987
12	0.988
13	0.978
14	0.956
15	0.943
16	0.934
17	0.928
18	0.933

Lectura	Velocidad
19	0.961
20	0.958
21	0.922
22	0.935
23	0.964
24	0.912
25	0.954
26	0.923
27	0.927

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor tres, a una profundidad de 0.929 metros.





Datos del cuarto par de sensores, ubicado a una profundidad de 1.224 metros

Lectura	Velocidad
1	0.992
2	0.985
3	0.994
4	0.987
5	0.985
6	0.996
7	0.999
8	0.986

Lectura	Velocidad
10	1.017
11	1.021
12	0.992
13	0.983
14	0.986
15	0.994
16	0.996
17	0.997

Lectura	Velocidad
19	0.997
20	0.987
21	0.995
22	0.991
23	0.996
24	0.962
25	0.978
26	0.983

Grafica de velocidades obtenidas por el equipo de tiempo de travesía del sensor cuatro, a una profundidad de 1.224 metros.

