

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS**



**“APLICACIÓN DEL PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER PARA  
EL MONITOREO DE CAUDALES EN LA CUENCA DEL RÍO  
PAICHO”**

**Por:**

**OSORIO GUERRERO YAMIL ROBERTO**

**Semestre - I - 2018**  
**TARIJA – BOLIVIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS**

**“APLICACIÓN DEL PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER PARA  
EL MONITOREO DE CAUDALES EN LA CUENCA DEL RÍO  
PAICHO”**

**Por:**

**OSORIO GUERRERO YAMIL ROBERTO**

Proyecto de grado presentado a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO” como requisito para optar el grado académico de Licenciatura de Ingeniería Civil.

**Junio 2018**  
**TARIJA-BOLIVIA**

## HOJA DE APROBACIÓN

-----  
Msc. Ing. Ernesto Álvarez Gozalvez  
**DECANO FAC. DE CS. Y TEC.**

-----  
Msc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa  
**VICEDECANA FAC. CS. Y TEC**

### **TRIBUNAL:**

-----  
Msc. Ing. Loza Velez Juan Carlos

-----  
Msc. Ing. Gamarra Mendoza Mario

-----  
Msc. Ing. Ricaldi Torrez Oscar

El docente y tribunal evaluador del Proyecto de Ingeniería Civil no se solidarizan con los términos, la forma, los modos y las expresiones empleadas en la elaboración del presente trabajo, siendo las mismas únicamente responsabilidad del autor.



# Instituto de Formación Integral

**AUTORIZADO POR EL MINISTERIO DE EDUCACION CON RES. MIN. No. 483**  
SECRETARIADOS - ADMINISTRACION - IDIOMAS: INGLES - PORTUGUES - ESPAÑOL  
Calle Carlos Paz No. 1266 - Esq. Avda. Membrillos - Teléfono 6631021  
**TARIJA - BOLIVIA**

## CERTIFICADO DE CORRECCIÓN GRAMATICAL

La suscrita Prof. Daysi Cassasola M. de la Especialidad de Lenguaje del Instituto de Formación Integral, a nivel Medio y Superior, de esta ciudad.-----

### C E R T I F I C A:

Que revisado el Proyecto de Grado "Aplicación del Perfilador Acústico Doppler para el Monitoreo de Caudales en la Cuenca del Río Paicho", correspondiente al Universitario de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma "Juan Misael Saracho", Sr. OSORIO GUERRERO YAMIL ROBERTO, está correctamente redactado y sin ningún error ortográfico de acuerdo a la Lengua Castellana.

Es cuanto informo en honor a la verdad y para los fines consiguientes.

Tarija, Junio de 2018



*Dassasola*  
As.Ped. Daysi Cassasola M.  
PROFESORA DE LENGUAJE

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por el hermoso don de la vida y permitirme tener y disfrutar a mi familia.

A mis padres Filomeno Osorio y Flora Guerrero, por el esfuerzo realizado en todos los años de estudio brindándome la oportunidad de llegar hasta este momento.

A mis hermanos y familiares, por todo el apoyo brindando en todo este tiempo.

A la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho y a la carrera de ingeniería civil por la oportunidad de realizarme como profesional.

Al Ing. Moisés Perales A., por brindarme su tiempo y ayuda para la elaboración de este trabajo.

A mis amigos que he tenido en este trazo de mi vida, gracias por el apoyo y por la ayuda.

**ÍNDICE**  
**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

	<b>Página</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.1. Ubicación geográfica del proyecto.....	1
1.2. Problema de investigación.....	4
1.2.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2.2. Formulación del problema.....	5
1.2.3. Sistematización del problema.....	5
1.3. Objetivo de proyecto.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Justificaciones del proyecto.....	6
1.4.1. Justificación institucional.....	6
1.4.2. Justificación técnica.....	6
1.4.3. Justificación social.....	7
1.5. Marco de referencia.....	7
1.5.1. Marco teórico.....	7
1.5.2. Marco conceptual.....	7
1.5.3. Marco espacial.....	9

1.5.4. Marco temporal.....	9
1.6. Alcance.....	9

**CAPÍTULO II**  
**FUNDAMENTO TEÓRICO**

	<b>Página</b>
2. Conceptos básicos sobre medición de caudal en cursos de agua.....	10
2.1. Hidrometría.....	10
2.1.1. Pluviometría.....	10
2.2. Métodos para la estimación de caudal.....	11
2.2.1. Instalación y operación de puntos hidrométricos.....	11
2.2.1.1 Medición de niveles.....	13
2.2.1.2 Errores más comunes.....	14
2.2.1.3 Consecuencia de los errores de medición de niveles.....	14
2.2.1.4 Curvas de gasto.....	15
2.2.1.5 Análisis de consistencia.....	16
2.2.1.5.1 Errores groseros.....	16
2.2.1.5.2 Errores sistemáticos.....	17
2.2.1.5.3 Errores fortuitos.....	17
2.2.2. Método volumétrico.....	17
2.2.3. Método hidráulico.....	18



2.2.4. Método área velocidad: el molinete.....	21
2.2.4.1 Distribución de velocidades en una sección de canal.....	22
2.2.5. ADCP.....	25
2.2.6. conceptos básicos sobre acústica, con un lugar destacado para el efecto doppler.....	27
2.2.6.1 Efecto Doppler.....	27
2.2.6.2 Historia del desarrollo de los medidores acústicos con base en el efecto Doppler.....	27
2.2.6.3 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN.....	28
2.2.6.3.1 Pulso Incoherente o NarrowBand.....	29
2.2.6.3.2 Spread Spectrum o BroadBand.....	29
2.2.6.3.3 Coherente Pulso a Pulso.....	29
2.2.6.4 Procesamiento de los datos recogidos por los medidores ADCP.....	30
2.2.6.4.1 Discretización horizontal y vertical de equipos de RDIstruments.....	31
2.2.6.4.2 Superposición de Range Gates.....	33
2.2.6.4.3 Determinación de la profundidad de la primera célula.....	34
2.2.6.5 Mediciones con ADCP en sección con fondo móvil.....	35
2.2.6.6 Test de fondo móvil.....	36
2.2.6.6.1 Método de la subsección media.....	37
2.2.6.6.2 Método de las subsecciones.....	37
2.2.6.6.3 Método de sección por sección.....	38

2.2.6.6.4	Método de Loop.....	38
-----------	---------------------	----

### **CAPÍTULO III**

#### **PRUEBAS DE CAMPO**

	<b>Página</b>	
3.	PRUEBAS DE CAMPO.....	40
3.1.	Localización y descripción de los sitios de medición.....	40
3.1.1.	Localización de las secciones de medición.....	40
3.2.	Variación de parámetros en una sección del río Guadalquivir.....	46
3.2.1.	Prueba N° 1 (modo de agua).....	47
3.2.2.	PRUEBA N° 2 (variación de la profundidad de cada celda).....	50
3.2.3.	PRUEBA N° 3 (medición adecuada).....	53
3.2.4.	PRUEBA N° 4 (variación de la profundidad del transductor).....	55
3.3.	Variación de caudales medidos con ADCP en una sección del río Guadalquivir.....	60
3.3.1.	Datos corregidos.....	70
3.4.	Comparación de perfiles de velocidad obtenidos con un ADCP y un molinete hidráulico.....	71
3.4.1.	Guadalquivir primer perfil de comparación.....	71
3.4.2.	Guadalquivir segundo perfil de comparación.....	72
3.4.3.	Tomayapo tercer perfil de comparación.....	73
3.4.4.	Tomayapo cuarto perfil de comparación.....	74

3.5.	Comparación del caudal por tramos.....	75
3.6.	Comparación entre métodos para la determinación de caudales.....	77

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS HIDROMÉTRICOS CON UN PERFILADOR DE CORRIENTES ACÚSTICO DOPPLER**

	<b>Página</b>
4. Metodología para la obtención de datos hidrométricos con un perfilador de corrientes acústico Doppler.....	80
4.1. Instrumentos.....	80
4.2. Metodología para la obtención de datos hidrométricos con un perfilador acústico Doppler.....	80
4.2.1. Pre proceso.....	81
4.2.2. Parámetros necesarios para empezar la lectura con un ADCP y descripción de las ventanas más importantes .....	99
4.2.3. Posproceso.....	105

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	<b>Página</b>
5.1. Conclusiones.....	112
5.2. Recomendaciones.....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura N° 1. 1. Mapa provincial del departamento de Tarija.....	2
Figura N° 1. 2 Mapa de la sección de la provincia Méndez .....	3
Figura N° 2. 1. Lecho del río bajo condiciones de erosión y deposición.....	12
Figura N° 2. 2. Comportamiento del linnimetro en época húmeda y época seca.....	14
Figura N° 2. 3. Disposición general de una obra para medición de caudales.....	19
Figura N° 2. 4. Canal de aforo Parshall.....	20
Figura N° 2. 5. Elementos de una estructura hidráulica.....	21
Figura N° 2. 6. Distribución de velocidades en un canal rectangular.....	22
Figura N° 2. 7. Curvas de igual velocidad isotacas en diferentes secciones de canal....	23
Figura N° 2. 8. Vista de la sección transversal de un río en que se muestra la ubicación de los puntos de observación.....	24
Figura N° 2. 9 Molinete hidráulico.....	25
Figura N° 2. 10. Perfilador de Corrientes Acústico Doppler.....	26
Figura N° 2. 11. Medidores monoestáticos Doppler de corriente.....	30
Figura N° 2. 12. Un haz monoestatico Doppler.....	30
Figura N° 2. 13. Range Gating y pulso acustico.....	31
Figura N° 2. 14. Resolución y precisión de cada celda.....	32
Figura N° 2. 15. Células menores.....	33
Figura N° 2. 16. Superposición del Range Gate.....	34
Figura N° 2. 17. Profundidad de la primera célula.....	35
Figura N° 2. 18. Sección sin fondo móvil.....	38
Figura N° 2. 19. Sección con fondo móvil.....	39

Figura N° 3. 1. Sección de aforo en el río Guadalquivir.....	40
Figura N° 3. 2. Sección de aforo en el río Guadalquivir.....	41
Figura N° 3. 3. Sección de aforo en el río Paicho cercano al puente.....	41
Figura N° 3. 4. Sección de aforo en el río Paicho ubicada aguas abajo del puente.....	42
Figura N° 3. 5. Sección de aforo en el río Paicho.....	42
Figura N° 3. 6. Sección de aforo en el río Tomayapo aguas abajo del puente.....	43
Figura N° 3. 7 Sección de aforo en el río Tomayapo aguas abajo del puente (ruta a Potosí).....	43
Figura N° 3. 8. Sección de aforo en el río Tomayapo aguas abajo del puente (ruta a Potosí).....	44
Figura N° 3. 9. Sección de aforo en el río Camacho aguas abajo del puente.....	44
Figura N° 3. 10. Sección de aforo en el río Camacho aguas abajo del puente.....	45
Figura N° 3. 11. Sección de aforo en el río Camacho.....	45
Figura N° 3. 12. Sección de aforo en el río Camacho.....	46
Figura N° 3. 13 Perfil de velocidades transecto N° 1.....	47
Figura N° 3. 14. Perfil de velocidades Transecto N° 2.....	48
Figura N° 3. 15. Perfil de velocidades transecto N° 1.....	49
Figura N° 3. 16. Perfil de velocidades transecto N° 2.....	51
Figura N° 3. 17. Perfil de velocidades transecto N° 1.....	53
Figura N° 3. 18. Perfil de velocidades transecto N° 2.....	54
Figura N° 3. 19. Perfil de velocidades transecto N° 1 izquierda.....	56
Figura N° 3. 20. Perfil de velocidades transecto N° 2 derecha.....	57

Figura N° 3. 21. Perfil de velocidades transecto N° 1 izquierda.....	58
Figura N° 3. 22. Perfil de velocidades transecto N° 2 derecha.....	59
Figura N° 3. 23. Perfil de velocidades transecto N° 1.....	61
Figura N° 3. 24. Perfil de velocidades transecto N° 2.....	61
Figura N° 3. 25. Perfil de velocidades transecto N° 3.....	62
Figura N° 3. 26. Perfil de velocidades transecto N° 4.....	62
Figura N° 3. 27. Perfil de velocidades transecto N° 5.....	62
Figura N° 3. 28. Perfil de velocidades transecto N° 6.....	63
Figura N° 3. 29. Perfil de velocidades transecto N° 7.....	63
Figura N° 3. 30. Perfil de velocidades transecto N° 8.....	63
Figura N° 3. 31. Perfil de velocidades transecto N° 9.....	64
Figura N° 3. 32. Perfil de velocidades transecto N° 10.....	64
Figura N° 3. 33. Perfil de velocidades transecto N° 11.....	64
Figura N° 3. 34. Perfil de velocidades transecto N° 12.....	65
Figura N° 3. 35. Perfil de velocidades transecto N° 13.....	65
Figura N° 3. 36. Perfil de velocidades transecto N° 14.....	65
Figura N° 3. 37. Perfil de velocidades en la sección del río Guadalquivir.....	71
Figura N° 3. 38. Perfil de velocidades en la sección del río Guadalquivir.....	72
Figura N° 3. 39. Perfil de velocidades en la sección del río Guadalquivir.....	72
Figura N° 3. 40. Perfil de velocidades en la sección del río Guadalquivir.....	73
Figura N° 3. 41. Perfil de velocidades en la sección del río Tomayapo.....	73
Figura N° 3. 42. Perfil de velocidades en la sección del río Tomayapo.....	74
Figura N° 3. 43. Perfil de velocidades en la sección del río Tomayapo.....	74

Figura N° 3. 44. Perfil de velocidades en la sección del río Tomayapo.....	74
Figura N° 3. 45. Sección transversal con isotacas.....	74
Figura N° 3. 46. Sección para la determinación de caudales por isotacas.....	74
Figura N° 3. 47. Sección para la determinación de caudales por sección media.....	74
Figura N° 3. 48. Determinación de caudales por ADCP.....	74
Figura N° 4. 1. Encendido del ADCP.....	81
Figura N° 4. 2. Pantalla principal de WinRiver II.....	82
Figura N° 4. 3. Ubicación de las pestañas, íconos y características de cada ventana del programa WinRiver II.....	83
Figura N° 4. 4. Configuración del nombre del puerto serial y velocidad de transporte de datos.....	83
Figura N° 4. 5. Ventana al colocar la opción probar puerto.....	84
Figura N° 4. 6. Advertencia que está fallando el puerto.....	85
Figura N° 4. 7. Tipo de fondo del río.....	88
Figura N° 4. 8. Perfil de velocidades en una sección del río Guadalquivir, Modo 12.....	89
Figura N° 4. 9. Perfil de velocidades en una sección del río Guadalquivir, Modo 13.....	89
Figura N° 4. 10. Ventana para la descripción de la ubicación del archivo.....	90
Figura N° 4. 11. Ventana de resumen de las configuraciones previas.....	91
Figura N° 4. 12. Pantalla principal de la calibración de compás.....	92
Figura N° 4. 13. Dialogo de configuración de compás.....	92
Figura N° 4. 14. Girar el instrumento River Boat.....	93

Figura N° 4. 15. Rectificación de errores al girar el ADCP.....	93
Figura N° 4. 16. Ventana principal para iniciar la prueba de fondo móvil.....	94
Figura N° 4. 17. Selección de la prueba de fondo móvil.....	94
Figura N° 4. 18. Ventana principal de las pruebas de fondo móvil.....	95
Figura N° 4. 19. Realizando la prueba de fondo móvil estacionaria.....	95
Figura N° 4. 20. Resultados de la prueba de fondo estacionaria.....	96
Figura N° 4. 21. Ejecutando la prueba de fondo móvil dinámica.....	97
Figura N° 4. 22. Resultados de la prueba de fondo móvil dinámica (loop).....	98
Figura N° 4. 23. Iniciar a lectura un transecto.....	99
Figura N° 4. 24. Distancia de banco.....	99
Figura N° 4. 25. Identificando la posición a la que se encuentra el ADCP.....	100
Figura N° 4. 26. Vista del perfil de velocidades de una sección del río Guadalquivir.....	101
Figura N° 4. 27. Intensidad de los haces de sonido.....	102
Figura N° 4. 28. Huella del ADCP.....	103
Figura N° 4. 29. Detalles del aforo.....	104
Figura N° 4. 30. Finalizar transecto.....	104
Figura N° 4. 31. Selección de la carpeta de medición.....	105
Figura N° 4. 32. Archivo de medición del río Guadalquivir.....	106
Figura N° 4. 33. Resumen de descarga.....	106
Figura N° 4. 34. Ventana de resumen de caudales y transectos realizados.....	107
Figura N° 4. 35. Editado de valores mayores al 5% de variación respecto a la media. .....	108



Figura N° 4. 36 Resumen de todos los parámetros calculados por el ADCP en la sección transversal del río Guadalquivir.....	108
Figura N° 4. 37. Perfil de una sección transversal en el río Guadalquivir.....	109
Figura N° 4. 38. Detalles de la descarga en un tramo de la sección transversal.....	110
Figura N° 4. 39. Perfil de intensidad en el tramo de estudio.....	111

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	<b>Página</b>
Fotografía N° 4. 1. Identificando los puntos más altos de la sección transversal.....	86
Fotografía N° 4.2. Análisis de la sección transversal en cuanto a su altura (cada 20 cm).....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 3.1 Resumen del transecto N° 1.....	48
Tabla 3.2. Resumen del transecto 2.....	49
Tabla 3.3. Resumen transecto N° 1.....	51
Tabla 3.4. Resumen transecto N° 2.....	52
Tabla 3.5. Resumen transecto N° 1.....	54
Tabla 3.6. Resumen transecto N°2.....	55
Tabla 3.7 resumen de medición transecto N° 1.....	56
Tabla 3.8. Resumen de medición transecto N° 2.....	57
Tabla 3.9. Resumen de medición transecto N° 1.....	58
Tabla 3.10. Resumen de medición transecto N° 2.....	59
Tabla 3.11. Resumen de transectos realizados sin editar.....	66
Tabla 3.12. Parámetros corregidos y resultados de un aforo. ....	70
Tabla 3.13. Comparación de caudales por tramos con ADCP y molinete.....	76
Tabla 3.14. Comparación de los métodos de aforo.....	79
Tabla 4.1. Tamaño de la celda en función del tirante de agua.....	79

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	<b>Página</b>
Gráfico N° 3. 1. Comparación de caudales medidos en una sola sección.....	67
Gráfico N° 3. 2. Variación del ancho de sección.....	68
Gráfico N° 3. 3. Variación del área de sección transversal en un sitio de aforo.....	68
Gráfico N° 3. 4. Velocidad máxima presentada en cada medición.....	69
Gráfico N° 3. 5. Caudales corregidos menores a un 5% de variación de la media.....	70

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**Anexo A – INSTRUMENTOS**

**Anexo B – CONEXIÓN DEL DISPOSITIVO BLUETOOTH PARANI AL ADCP  
RIVER BOAT**

**Anexo C – PROTOCOLO DE MEDICIÓN UTILIZANDO UN PERFILADOR DE  
CORRIENTES ACÚSTICO DOPPER (ADCP)**

**Anexo D - RESULTADOS DE AFORO**