

# Tabla de contenido

1. Capítulo: Introducción y Objetivos .....	1
1.1. Introducción .....	2
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Organización .....	4
2. Capítulo: Marco Teórico .....	5
2.1. Tomógrafo.....	6
2.1.1. Descripción general.....	6
2.1.2. Algoritmo de reconstrucción.....	7
2.2. Métodos de velocimetría por procesamiento de imágenes .....	9
2.2.1. Principio de operación PTV y PIV.....	10
2.2.2. Particle Tracking Velocimetry .....	10
2.2.3. Particle Image Velocimetry.....	11
2.2.4. PivLab .....	12
2.2.5. Consideraciones Experimentales .....	13
2.2.6. Consideraciones PIV .....	16
2.3. Estratigrafía.....	17
2.4. Parámetros adimensionales .....	19
2.4.1. Esfuerzo de corte.....	19
2.4.2. Densidad relativa sumergida del sedimento.....	19
2.4.3. Gasto sólido de fondo .....	19
2.4.4. Número de Reynolds.....	20
2.4.5. Numero de Reynolds de la partícula .....	20
2.5. Esfuerzo de corte.....	20
2.6. Perfil de Velocidad .....	21
2.6.1. Método esfuerzo de Reynolds.....	21
2.6.2. Método logarítmico.....	22
2.7. Transporte de Sedimentos.....	22
2.8. Conclusiones .....	24
3. Capítulo: Instalación Experimental y Metodología .....	25
3.1. Instalación experimental .....	26
3.1.1. Tubería .....	26
3.1.2. Bomba .....	27

3.1.3. Tomógrafo resistivo .....	27
3.1.4. Locación PIV .....	28
3.1.5. Descripción del sistema de iluminación con láser .....	28
3.1.6. Lente para la cámara de alta velocidad .....	29
3.1.7. Cámara Alta velocidad.....	29
3.1.8. Cámara Gopro .....	30
3.2. Calibración Tubo Venturi .....	31
3.2.1. Instalación experimental para la calibración del Venturi.....	32
3.2.2. Metodología .....	33
3.3. Particle image velocimetry .....	34
3.3.1. Instalación Experimental.....	34
3.3.2. Caracterización del error de la locación del PIV.....	36
3.3.3. Metodología .....	39
3.3.4. Procesamiento de la información.....	41
3.3.5. Fabricación de partículas.....	43
3.3.6. Propagación de errores Particle Image Velocimetry.....	46
3.4. Calibración del Tomógrafo .....	46
3.4.1. Calibración del tomógrafo para el caso de Sedimento en el lecho.....	48
3.4.2. Curva Granulométrica y porosidad de la grava y el sedimento fino .....	54
3.4.3. Metodología para la ejecución de las experiencias .....	57
3.4.4. Procesamiento de la información .....	58
4. Capítulo: Resultados .....	60
4.1. Análisis de errores de la técnica PIV .....	61
4.2. Intensidad de la turbulencia .....	61
4.3. Perfiles de velocidad .....	63
4.4. Caracterización Esfuerzo de corte.....	65
4.4.1. Esfuerzos de corte total mediante PIV .....	65
4.4.2. Esfuerzos de corte espacial mediante PIV .....	67
4.4.3. Esfuerzo de corte turbulento mediante PIV .....	69
4.4.4. Resumen PIV .....	72
4.4.5. Esfuerzo de corte mediante perfil logarítmico .....	74
4.4.6. Comparación esfuerzo corte logarítmico y PIV .....	77
4.5. Resultados Tomógrafo .....	78
4.5.1. Granulometría depositada .....	78

4.5.2. Estratigrafía.....	80
4.5.3. Series de tiempo .....	81
4.5.4. Tomogramas.....	84
4.6. Descripción del gasto sólido de fondo .....	89
5. Capítulo: Discusión y Conclusiones .....	93
5.1. Discusión .....	94
Montaje Experimental .....	94
Instrumentación .....	94
Metodología experimental .....	95
5.2. Conclusiones .....	96
Metodología experimental .....	96
Parámetros derivados de la velocidad del flujo .....	96
Estratigrafía .....	97
Gasto sólido de fondo .....	97
6. Bibliografía .....	98
7. Anexos .....	102
A.1. Propagación de errores tubo Venturi .....	102
A.2. Propagación de errores PIV .....	104
A.3. Efecto de las burbujas .....	112

# Índice de Figuras

FIGURA 2.1. REPRESENTACIÓN DE LOS 16 ELECTRODOS DE UNO DE LOS ANILLOS DEL TOMÓGRAFO. ....	7
FIGURA 2.2. RESOLUCIÓN DE LA IMAGEN RECONSTRUIDA POR EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS. ....	8
FIGURA 2.3. ESQUEMA DEL DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS DE DOS FRAMES CONSECUTIVOS EN ALGORITMO PTV. PARTÍCULAS OSCURAS Y CLARAS REPRESENTAN EL INSTANTE $t_0$ Y $t_0 + \Delta t$ RESPECTIVAMENTE. ....	11
FIGURA 2.4. ESQUEMA DEL DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS DE DOS FRAMES CONSECUTIVOS EN ALGORITMO PIV. PARTÍCULAS OSCURAS Y CLARAS REPRESENTAN EL INSTANTE $t_0$ Y $t_0 + \Delta t$ RESPECTIVAMENTE. ....	11
FIGURA 2.5. ESQUEMA LEY DE SNELL. ....	16
FIGURA 2.6. DIFERENTES CONFIGURACIONES DE ALTIMETRIA DE SEDIMENTO FINO. (KUHNLE ET AL., 2013). ....	18
FIGURA 3.1. MONTAJE EXPERIMENTAL.....	26
FIGURA 3.2. ESQUEMA DE LA IZQUIERDA CORRESPONDE AL PERFIL TRANSVERSAL DE LA TUBERÍA DE PVC. ESQUEMA DE LA DERECHA CORRESPONDE AL PERFIL TRANSVERSAL DE LA TUBERÍA DE ACRÍLICO. ....	27
FIGURA 3.3. TOMÓGRAFO RESISTIVO INSTALADO EN EL MONTAJE EXPERIMENTAL. ....	27
FIGURA 3.4. LOCALIZACIÓN DE PIV Y CONTENEDOR DE AGUA. ....	28
FIGURA 3.5. LÁSER FLEX. ....	29
FIGURA 3.6. LENTE. ....	29
FIGURA 3.7. CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD. ....	30
FIGURA 3.8. CÁMARA GOPRO HERO 3 .....	30
FIGURA 3.9. ESQUEMA TUBO VENTURI.....	31
FIGURA 3.10. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CALIBRACIÓN. ....	32
FIGURA 3.11. REGRESIÓN POTENCIAL EN PLANO LOGARÍTMICO ENTRE CAUDAL Y VARIACIÓN DE PRESIÓN.....	34
FIGURA 3.12. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PIV.....	35
FIGURA 3.13. ESQUEMA DE LAS POSICIONES DEL PLANO LÁSER A LO LARGO DE LA TRANSVERSAL DEL FLUJO.....	35
FIGURA 3.14. ESQUEMA DE LA DISTORSIÓN DE LA POSICIÓN DEL PLANO DE LA LUZ AL ATRAVESAR LA TUBERÍA. ESQUEMA DE LA IZQUIERDA Y DERECHA CORRESPONDEN A LA DISTORSIÓN EN LA TRANSVERSAL Y VERTICAL RESPECTIVAMENTE.....	37
FIGURA 3.15. CORRECCIÓN DEL HAZ DE LUZ EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO CENTRAL DE LA TUBERÍA.....	38
FIGURA 3.16. RELACIÓN DATOS EXPERIMENTALES Y DATOS CORREGIDOS PARA TODOS LOS PLANOS DE MEDICIÓN.....	39
FIGURA 3.17. IMAGEN PRE-PROCESADA (A LA IZQUIERDA) Y ORIGINAL (A LA DERECHA) EN PIVLAB.....	41
FIGURA 3.18. IMAGEN PRE-PROCESADA LISTA PARA SER EVALUADA E IMAGEN ORIGINAL .....	42
FIGURA 3.19. VECTORES DE VELOCIDAD CALCULADOS MEDIANTE FFT EN LA REGIÓN DE INTERÉS. ....	43
FIGURA 3.20. MÉTODO DE GENERACIÓN DE PARTÍCULAS USANDO LIMA.....	44
FIGURA 3.21. MÉTODO DE GENERACIÓN DE PARTÍCULAS USANDO UN ESMERIL DREMEL.....	45
FIGURA 3.22. CURVA GRANULOMÉTRICA PARTÍCULAS DE RODAMINA. ....	45
FIGURA 3.23. MÉTODO PARA OBTENER LA REFERENCIA AGUA.....	47
FIGURA 3.24. COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES PROMEDIO EN BASE A REFERENCIA W Y WG.....	49
FIGURA 3.25. TOMOGRAMAS COLECTADOS DURANTE LA CALIBRACIÓN DEL SEDIMENTO FINO. ....	50
FIGURA 3.26. TOMOGRAMAS COLECTADOS DURANTE LA CALIBRACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE SEDIMENTO FINO Y GRAVA.....	51
FIGURA 3.27. CALIBRACIÓN TOMÓGRAFO. COMPARACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTO FINO USANDO REFERENCIA AGUA Y REFERENCIA AGUA-GRAVA. ....	52
FIGURA 3.28. PERFILES DE CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE SEDIMENTO FINO Y SEDIMENTO FINO MÁS GRAVA.....	53
FIGURA 3.29. PERFIL DE LA POROSIDAD DE UNA MUESTRA DE SUELO.....	54
FIGURA 3.30. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE LOS 100 TOMOGRAMAS COLECTADOS PARA CADA DE LAS TRES MEDICIONES SOBRE EL LECHO DE GRAVA. ....	55
FIGURA 3.31. CURVA GRANULOMÉTRICA MICROESFERAS DE VIDRIO.....	56
FIGURA 3.32. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL LECHO DE GRAVA.....	56

FIGURA 3.33. REPRESENTACIÓN CUALITATIVA DEL PERFIL DE SEDIMENTO ESTIMADO EN BASE A FOTOGRAFÍA Y TOMOGRAMA. ZONA DEL TOMOGRAMA REPRESENTADA EN ROJO APROXIMA LA DISTRIBUCIÓN DE MICROESFERAS DE VIDRIOS DEPOSITADA EN EL LECHO. ....	59
FIGURA 4.1. COMPARACIÓN DE LOS PERFILES DE LA INTENSIDAD TURBULENTO $u'$ Y $v'$ CON LAS EXPRESIONES UNIVERSALES DE NEZU Y NAKAGAWA (1993) Y KIRONOTO Y GRAF (1994). ....	62
FIGURA 4.2. PERFILES DE VELOCIDAD ADIMENSIONALES PARA CADA UNO DE LOS PLANOS. ....	63
FIGURA 4.3. COMPARACIÓN PERFILES DE VELOCIDAD ADIMENSIONALES COLECTADOS POR CAUDAL. P1, P2 Y P3 CORRESPONDEN A PLANO 1, PLANO 2 Y PLANO 3 RESPECTIVAMENTE. ....	64
FIGURA 4.4. PERFILES DEL ESFUERZO CORTE DE REYNOLDS TOTAL ADIMENSIONAL DE LOS PLANOS 1,2 Y 3. ....	65
FIGURA 4.5. COMPARACIÓN PERFILES DE ESFUERZO DE CORTE ADIMENSIONALES COLECTADOS POR CAUDAL. P1, P2 Y P3 CORRESPONDEN A PLANO 1, PLANO 2 Y PLANO 3 RESPECTIVAMENTE. ....	66
FIGURA 4.6. PERFILES DEL ESFUERZO CORTE ESPACIAL ADIMENSIONAL DE LOS PLANOS 1,2 Y 3. ....	67
FIGURA 4.7. COMPARACIÓN PERFILES DE ESFUERZO DE CORTE ESPACIAL ADIMENSIONALES COLECTADOS POR CAUDAL. P1, P2 Y P3 CORRESPONDEN A PLANO 1, PLANO 2 Y PLANO 3 RESPECTIVAMENTE. ....	68
FIGURA 4.8. PERFILES DEL ESFUERZO CORTE TURBULENTO ADIMENSIONAL DE LOS PLANOS 1,2 Y 3. ....	69
FIGURA 4.9. COMPARACIÓN PERFILES DE ESFUERZO DE REYNOLDS ADIMENSIONALES COLECTADOS POR CAUDAL. P1, P2 Y P3 CORRESPONDEN A PLANO 1, PLANO 2 Y PLANO 3 RESPECTIVAMENTE. ....	70
FIGURA 4.10. APROXIMACIÓN PERFIL LOGARÍTMICO DE VELOCIDAD POR CAUDAL Y PLANO. ....	75
FIGURA 4.11. PERFILES DE RUGOSIDAD DE CADA PLANO. A), B) Y C) CORRESPONDEN A PLANO 1, 2 Y 3 RESPECTIVAMENTE. LA LÍNEA SEGMENTADA INDICA POSICIÓN DE $d$ . ....	76
FIGURA 4.12. COMPARACIÓN ESFUERZO DE CORTE DE REYNOLDS EXTENDIDO Y LOGARÍTMICO. ....	77
FIGURA 4.13. TAMAÑO DE LAS MICROESFERAS DE VIDRIO DEPOSITADAS A LO LARGO DEL TRAMO DE ESTUDIO DE IZQUIERDA A DERECHA. .	79
FIGURA 4.14. POSICIÓN DE LAS MICROESFERAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN LOS PRIMEROS DOS METROS DE TUBERÍA. ....	80
FIGURA 4.15. PERFILES DE SEDIMENTO REALES PARA LOS TIEMPOS 0, 7 Y 38 MINUTOS RESPECTIVAMENTE PARA EL TRAMO 1. ....	80
FIGURA 4.16. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DEL SEDIMENTO DEPOSITADO EN EL TIEMPO SOBRE LA SECCIÓN DEL LECHO MEDIANTE REFERENCIA W PARA A) 1 [L], B) 2 [L] C) 3 [L]. ....	82
FIGURA 4.17. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DEL SEDIMENTO DEPOSITADO EN EL TIEMPO SOBRE LA SECCIÓN DEL LECHO MEDIANTE REFERENCIA WG PARA A) 1 [L], B) 2 [L] C) 3 [L]. ....	83
FIGURA 4.18. TOMOGRAMAS EN BASE A REFERENCIA WG EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DISTINTOS CAUDALES PARA UN VOLUMEN DE 3 LITROS DE SEDIMENTO FINO. ....	85
FIGURA 4.19. TOMOGRAMAS EN BASE A REFERENCIA W EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DISTINTOS CAUDALES PARA UN VOLUMEN DE 3 LITROS DE SEDIMENTO FINO. ....	85
FIGURA 4.20. TOMOGRAMAS EN BASE A REFERENCIA WG EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DISTINTOS CAUDALES PARA UN VOLUMEN DE 2 LITROS DE SEDIMENTO FINO. ....	86
FIGURA 4.21. TOMOGRAMAS EN BASE A REFERENCIA W EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DISTINTOS CAUDALES PARA UN VOLUMEN DE 2 LITROS DE SEDIMENTO FINO. ....	86
FIGURA 4.22. TOMOGRAMAS EN BASE A REFERENCIA WG EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DISTINTOS CAUDALES PARA UN VOLUMEN DE 1 LITROS DE SEDIMENTO FINO. ....	87
FIGURA 4.23. TOMOGRAMAS EN BASE A REFERENCIA W EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DISTINTOS CAUDALES PARA UN VOLUMEN DE 1 LITROS DE SEDIMENTO FINO. ....	87
FIGURA 4.24. TOMOGRAMAS EN BASE A REFERENCIA WG EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DISTINTOS CAUDALES PARA UN VOLUMEN DE 0.5 LITROS DE SEDIMENTO FINO. ....	88
FIGURA 4.25. TOMOGRAMAS EN BASE A REFERENCIA W EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DISTINTOS CAUDALES PARA UN VOLUMEN DE 0.5 LITROS DE SEDIMENTO FINO. ....	88
FIGURA 4.26. DESCRIPCIÓN DEL PARÁMETRO $e/Dg$ Y $D(z)$ . ....	89
FIGURA 4.27. CURVA DE AJUSTE EXPERIMENTAL PARA GASTO SÓLIDO ADIMENSIONAL EN FUNCIÓN DE $e/Dg$ Y $D(z)$ . SE PRESENTAN EXPRESIONES PREDICTIVAS DE GASTO SÓLIDO DE MEYER-PETER AND MÜLLER (1948) Y ENGELUND AND FREDSDØE (1976) SON PRESENTADAS. ....	91

FIGURA 4.28. GASTO SÓLIDO ADIMENSIONAL EN FUNCIÓN DE $e/Dg$ Y $D(z)$ . SE PRESENTAN RESULTADOS EXPERIMENTALES DE NIÑO ET AL. (2017), KUHNLE ET AL. (2013) Y EXPRESIONES PREDICTIVAS DE GASTO SÓLIDO DE MEYER-PETER AND MÜLLER (1948), ASHIDA AND MICHIE (1972), ENGELUND AND FREDSSØE (1976). .....	92
FIGURA A7.1. CONCENTRACIÓN DE BURBUJAS. LA PRIMERA Y SEGUNDA CORRESPONDE A LA CONCENTRACIÓN DE REFERENCIA Y BURBUJAS DE CADA ANILLO Y PROMEDIO DEL TOMÓGRAFO. LA ÚLTIMA IMAGEN REPRESENTA LOS ERRORES ASOCIADOS DE LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE REFERENCIA Y BURBUJAS.....	113

# Índice de Tablas

TABLA 3.1. CURVA OPERACIÓN DE LA BOMBA. ....	27
TABLA 3.2. POSICIONES OBSERVADAS Y CORREGIDAS POR REFRACCIÓN. ....	37
TABLA 3.3. POSICIONES OBSERVADAS Y CORREGIDAS. ....	39
TABLA 4.1. VALOR DEL ESFUERZO DE CORTE ADIMENSIONAL PARA TODOS LOS PLANOS Y CAUDALES. ....	63
TABLA 4.2. RAZÓN ENTRE LAS COMPONENTES DEL ESFUERZO DE CORTE OBTENIDOS MEDIANTE PIV. ....	72
TABLA 4.3. BALANCE VOLUMÉTRICO TUBERÍA. ....	73
TABLA 4.4. RESULTADO PROPAGACIÓN DE ERRORES. ....	73
TABLA 4.5. RESUMEN DATOS PERFIL LOGARÍTMICO. ....	75
TABLA 4.6. VOLUMEN DEPOSITADO POR TRAMO CON RESPECTO AL DEPOSITADO EN TODA LA SECCIÓN DE ESTUDIO. ....	79
TABLA 4.7. RESUMEN EXPERIMENTOS GASTO SÓLIDOS DE FONDO ....	90
TABLA A1. ERROR INTRÍNSECO DE CADA VARIABLE MEDIDA. ....	102
TABLA A2. PROPAGACIÓN ERRORES DE LAS VARIABLES VOLUMEN, CAUDAL Y VARIACIÓN DE PRESIÓN ....	104
TABLA A3. ERROR ASOCIADO A LA MAGNIFICACIÓN DE LA IMAGEN PLANO CENTRAL. ....	105
TABLA A4. ERROR ASOCIADO A LA MAGNIFICACIÓN DE LA IMAGEN PLANO MEDIO ....	105
TABLA A5. ERROR ASOCIADO A LA MAGNIFICACIÓN DE LA IMAGEN PLANO PARED ....	105
TABLA A6. ERROR ASOCIADO AL DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS PLANO CENTRAL ....	106
TABLA A7. ERROR ASOCIADO AL DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS PLANO MEDIO ....	107
TABLA A8. ERROR ASOCIADO AL DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS PLANO PARED ....	107
TABLA A9. ERROR ASOCIADO AL PASAR DE UN CAMPO 3D A 2D PLANO CENTRAL ....	108
TABLA A10. ERROR ASOCIADO AL PASAR DE UN CAMPO 3D A 2D PLANO MEDIO ....	108
TABLA A11. ERROR ASOCIADO AL PASAR DE UN CAMPO 3D A 2D PLANO PARED ....	109
TABLA A12. RESUMEN ERRORES PLANO CENTRAL ....	109
TABLA A13. RESUMEN ERRORES PLANO MEDIO ....	109
TABLA A14. RESUMEN ERRORES PLANO PARED ....	110
TABLA A15. ERROR DEL VECTOR DESPLAZAMIENTO PLANO CENTRAL ....	110
TABLA A16. ERROR DEL VECTOR DESPLAZAMIENTO PLANO MEDIO ....	111
TABLA A17. ERROR DEL VECTOR DESPLAZAMIENTO PLANO PARED ....	111