



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA EXPERIMENTAL
DE VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE
PARTÍCULAS (PTV) PARA CUANTIFICAR EL RECURSO
HÍDRICO SUPERFICIAL EN CURSOS FLUVIALES DE LA
PROVINCIA DE CATAMARCA”**

Ada Patricia Lobo

Tesis remitida al Comité Académico de la Maestría
como parte de los requisitos para la obtención
del grado de
**MAGÍSTER EN INGENIERÍA
DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

2019

Comisión de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria, Paraje “El Pozo”,
S3000, Santa Fe, Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA EXPERIMENTAL
DE VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE
PARTÍCULAS (PTV) PARA CUANTIFICAR EL RECURSO
HÍDRICO SUPERFICIAL EN CURSOS FLUVIALES DE LA
PROVINCIA DE CATAMARCA”**

Ada Patricia Lobo

Lugar de Trabajo:

FICH

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional del Litoral

Director:

Carlos Marcelo García

Universidad Nacional de Córdoba

Co-director:

Ricardo Szupiany

Universidad Nacional del Litoral

Jurado Evaluador:

Francisco Pedocchi

Universidad de la República, Uruguay

Aylen Carrasco

Universidad Nacional del Litoral

Gerardo Riccardi

Universidad Nacional de Rosario


2019

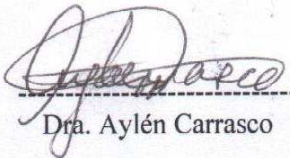


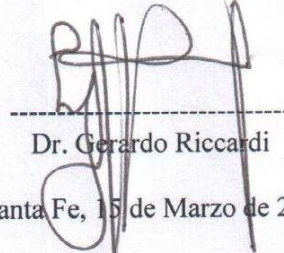
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Santa Fe, 15 de marzo de 2019.

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Maestría titulada *“Implementación de la Técnica experimental de Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV) para cuantificar el recurso hídrico superficial en cursos fluviales de la Provincia de Catamarca”*, desarrollada por la Ing. Ada Patricia LOBO, certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos. La aprobación final de esta disertación está condicionada a la presentación de dos copias encuadernadas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

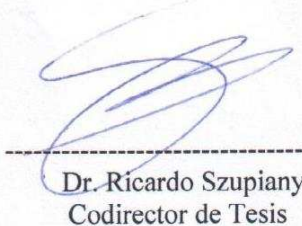

Dr. Franciseo Pedocchi


Dra. Aylén Carrasco


Dr. Gerardo Riccardi

Santa Fe, 15 de Marzo de 2019.

Certifico haber leído esta Tesis preparada bajo mi dirección y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos.


Dr. Ricardo Szupiany
Codirector de Tesis


Dr. Carlos Marcelo García
Director de Tesis

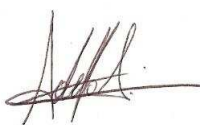
Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Hídricas
Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria
C.C. 217
Ruta Nacional Nº 168 - Km. 472,4
(3000) Santa Fe
Tel: (54) (0342) 4575 229
Fax: (54) (0342) 4575 224
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

DECLARACIÓN LEGAL DEL AUTOR

Esta Tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disposición de sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el Reglamento de la mencionada Biblioteca.

Citaciones breves de esta Tesis son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para una citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán exigidas por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Patricia Lobo', is written over a faint rectangular stamp or watermark.

Ing. Patricia Lobo

A las tres personas más importantes de mi vida

Quique, Joaquín y Facundo

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han aportado de distinta manera para la realización de esta tesis. En primera instancia, quiero agradecer al Dr. Marcelo García por su guía y consejo constante y por haberme introducido en la temática de las técnicas de Velocimetría por Imágenes LSPTV y LSPIV, guiando tanto los trabajos de campo como la escritura de esta tesis, pero, sobre todo, gracias por la tolerancia demostrada en todo este tiempo. Al Dr. Ricardo Szupiany, por haber codirigido esta tesis y otorgarme su apoyo y comprensión en todo este transitar.

Quiero también agradecer a los funcionarios del área de Recursos Hídricos de Catamarca por permitir la financiación de mi Maestría y aportar todos los recursos disponibles de la Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos en la realización de ésta investigación.

Un especial lugar ocupan aquellas personas con las que realicé los trabajos de campo, Cesar Solohaga y Luciano Alvarado. A ellos quiero agradecerles sus consejos, charlas, y experiencias.

Un agradecimiento especial a Antoine, Nico, Horacio, Pipa, y al equipo de trabajo del CETA (CONICET-UNC) que en varias ocasiones me recibieron y con la mejor de las voluntades me enseñaron a procesar los videos y a aplicar las técnicas aprendidas.

Muchas personas contribuyeron de diferentes maneras a este trabajo. Para todos ellos gracias.

Finalmente, pero lo más importante, les tengo que agradecer a la familia. A mis padres Marta y Orlando, por haberme brindado un apoyo constante a lo largo de toda mi vida.

Marion Schwarzenberger, sin tu apoyo incondicional y tus viajes a Catamarca para cuidar a mi hijo Joaquín en mis continuos viajes, hoy no estaría sentada aquí pensando en cómo decirte lo mucho que significa para mi tenerte a mi lado. Y, sobre todo, quiero agradecer a Quique mi marido por ser el pilar fundamental en el cual me apoyo día a día y, por hacerse cargo de todo lo cotidiano permitiéndome así el tiempo para la escritura de éste trabajo.

A todas estas personas, y a muchas más de las que seguramente me he olvidado les estaré eternamente agradecido por los aciertos de esta investigación. De los errores me hago cargo sola.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XVI
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problemática en la provincia de Catamarca.....	5
1.2.1 Introducción.....	5
1.2.2 Descripción de Cuencas Hidrográficas.....	6
1.2.2.3 Cuenca del Abaucán Colorado Salado	9
1.2.2.5 Cuenca del río Santa María	12
1.2.3 Disponibilidad de información hidrológica.....	14
1.2.4 Implementación de tecnicas convencionales de medición de caudales en la provincia de Catamarca.	26
1.2.5 Ultimos eventos extremos hidrológicos en la provincia de Catamarca.....	35
1.2.5.1 Sequias.....	35
1.2.5.2 Crecidas	41
1.2.5.2.1 Crecidas sobre el río Ambato (enero 2014).....	41
1.2.5.2.2 Crecidas sobre los ríos San Francisco, El Abra y Bañado de Ovanta (años 2014 - 2015)	47
1.2.5.2.3 Crecidas sobre el río Paclín. (marzo 2017).....	64
1.3 Motivación Tecnológica	72
1.4 Técnicas de Velocimetría por Imágenes	75
1.4.1 Introducción.....	75

1.4.2 Estado del Arte	77
1.4.2.1 Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV).....	77
1.4.2.2 Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV).....	85
1.4.2.3 Implementación a gran escala de ambas técnicas (LSPIV y LSPTV)	93
1.4.2.4 Rectificación de resultados para la implementación a gran escala de ambas técnicas (LSPIV y LSPTV)	95
1.5 Motivación Científica	99
1.6 Objetivos	100
CAPITULO 2: METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES DE ESTIAJES Y CRECIDAS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS LSPTV Y LSPIV EN CURSOS DE AGUAS SUPERFICIALES	101
2.1 Introducción	101
2.2 Actividades requeridas para la medición de caudales usando LSPIV y LSPTV	103
2.2.1 Etapa de medición.....	103
2.2.2 Etapa de pre procesamiento.....	106
2.2.2.1 Actividades comunes a ambas técnicas.....	106
2.2.2.2 Preprocesamiento LSPTV	108
2.2.2.3 Preprocesamiento LSPIV	110
2.2.3 Etapa de procesamiento de la imagen.....	111
2.2.4 Etapa de orto rectificación y post-procesamiento de resultados de LSPTV y LSPIV usando paquete computacional River.....	114

CAPÍTULO 3: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CAUDALES DE ESTIAJES (MÍNIMOS HIDROLÓGICOS) MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPTV EN EL RÍO LOS NOGALES, DPTO AMBATO, PROVINCIA DE CATAMARCA..... 120

3.1 Introducción	120
3.2 Sitios de medición.....	120
3.3 Métodos experimentales	123
3.4 Resultados	128
3.4.1 Medición 28-04-2014	129
3.4.2 Medición 15-04-2015	131
3.4.3 Medición 10-07-2015	132
3.4.4 Medición 04-09-2015	134
3.4.4 Medición 17-08-2017	136
3.4.5 Análisis de resultados	137
3.5 Fuentes de errores detectadas.....	139

CAPÍTULO 4: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CAUDALES DE CRECIDAS (MÁXIMOS HIDROLÓGICOS) MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPIV EN EL RÍO DEL VALLE, DPTO AMBATO, PROVINCIA DE CATAMARCA..... 140

4.1 Introducción	140
4.2 Sitios de medición.....	140
4.3 Métodos experimentales	144
4.4 Resultados	147
4.4.1 Medición 14-01-2016 altura de escala 3.50 metros.....	147
4.4.2 Medición 01-02-2016 altura de escala 1.40 metros.....	149
4.4.3 Medición 07-02-2016 altura de escala 1.80 metros.....	151
4.4.4 Medición 13-02-2016 altura de escala 1.60 metros.....	153

4.4.5 Medición 08-03-2017 altura de escala 2.40 metros.....	154
4.4.6 Medición 01-04-2017 altura de escala 3.20 metros.....	156
4.4.7 Medición 01-04-2017 altura de escala 3.60 metros.....	158
4.5 Análisis de resultados.....	161
4.6 Implementación de LSPIV para caudales de estiajes sobre el río Los Nogales	173
4.6.1.-Resultados Los Nogales 17-08-2017.....	173
4.6.2. Comparación entre técnicas.....	174
4.7 Fuentes de errores detectadas.....	176

**CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA
POR IMÁGENES DIGITALES A GRAN ESCALA EN LA CUANTIFICACIÓN DEL
RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL A NIVEL PROVINCIAL. 177**

5.1 Introducción	177
5.2 Objetivos	179
5.3 Lugar de implementación.....	180
5.4 Implementación.....	181
5.4.1. Implementación de la metodología LSPIV a corto plazo (horizonte temporal 2 años).....	181
5.4.2. Implementación de la metodología LSPIV a mediano plazo (horizonte temporal 5 años)	189

**CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS
FUTUROS 194**

6.1 Conclusiones	194
6.1.1 Conclusiones generales.....	194
6.1.2 Conclusiones sobre la implementación de LSPTV en el río Los Nogales dpto. Ambato provincia de Catamarca.	197
6.1.3 Conclusiones sobre la implementación de LSPIV en el río Del Valle, dpto. Ambato provincia de Catamarca.	199

6.1.4 Conclusiones sobre el proyecto implementación de las técnicas por imágenes digitales a gran escala en la cuantificación del recurso hídrico superficial a nivel provincial.	201
6.2 Recomendaciones.....	203
6.3 Trabajos futuros	205
BIBLIOGRAFÍA	207
ANEXOS.....	211
Anexo I: cuantificación y caracterización de eventos hidrológicos extremos para mitigar el riesgo hídrico asociado en la provincia de catamarca	211

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Principales cuencas de la provincia de Catamarca según el INCYTH (Instituto Nacional de Tecnología Hídrica), tomado de la DPHyERH.....	6
Figura 1. 2: Ubicación y paisaje natural de la cuenca del Este- Infanzón dpto El Alto.....	8
Figura 1. 3: Ubicación y paisaje natural de la cuenca de la Falda Oriental del Ambato- Quebrada del Tipán- dpto. Capayán.	9
Figura 1. 4: Ubicación y Paisaje Natural de la cuenca del Abaucán-Colorado-Salado - Dunas en Tatón - dpto. Tinogasta.....	11
Figura 1. 5: Paisaje natural de la Cuenca del Salar del Pipanaco - Quebrada de Belén.....	12
Figura 1. 6: Paisaje Natural de la cuenca del río Santa María - Unión ríos Agua Dulce y Sajarapampa- dpto. Santa María	14
Figura 1. 7: Cumbre del Cerro Manchao (naciente de los ríos Ambato y Siján), y ubicación de los Termos- Pluviómetros instalados en las localidades de Siján y El Rodeo (cuenca baja de ambos ríos).	15
Figura 1. 8: Ríos de cauce errático y alto poder de transporte de sólidos finos- río Abaucán dpto. Tinogasta.....	18
Figura 1. 9: Ríos de Montaña de cauces bien definidos y alto poder de transporte de cantos rodados de gran tamaño – río Ambato dpto. Ambato	18
Figura 1. 10: Mapa Hidrográfico y Secciones Fijas de Aforo de la provincia de Catamarca. Fuente: Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos.	20
Figura 1. 11: Estación Meteorológica completa instalada en la localidad del Rodeo – departamento Ambato	22
Figura 1. 12: Estación Pluviométrica telemétrica que conforma el Sistema de Alerta temprana para la Localidad del Rodeo – Departamento Ambato – Provincia de Catamarca.....	23
Figura 1. 13: Sensor de nivel colocado sobre el Río Ambato que conforma para el Sistema de Alerta Temprana para la localidad de El Rodeo	23
Figura 1. 14: Sensor de Nivel ubicado sobre el Río Paclín en la localidad de La Merced departamento Paclín.....	24

Figura 1. 15: Resaca de una crecida importante en el Río del Valle- localidad de Huaycama departamento Ambato	25
Figura 1. 16: Aforo Volumétrico sobre la vertiente El Sauco - Localidad de Rosario de Colana departamento Pomán, provincia de Catamarca	27
Figura 1. 17: Aforo con Molinete realizado sobre el río Asampay- dpto. Belén.....	29
Figura 1. 18: Vagoneta de Aforo a cable carril (izquierda) – Molinete Hidrométrico empleado bajo condiciones de crecidas (derecha)	31
Figura 1. 19: Canaleta Parshall utilizada para determinar el caudal derivado del Dique Motegasta (dpto., La Paz) a su la planta potabilizadora.	32
Figura 1. 20: Vertedero del dique Las Pirquitas.....	33
Figura 1. 21: Curva de Descarga por Vertedero – Dique Las Pirquitas	34
Figura 1. 22: Precipitaciones Totales Anuales El Talar (2004-2012). Fuente: DPHyERH (Catamarca).....	36
Figura 1. 23: Precipitaciones Totales Anuales Alijilán (1999–2012). Fuente: DPHyERH (Catamarca).....	37
Figura 1. 24: Nivel del Dique Collagasta - Abril del 2013	39
Figura 1. 25: Nivel del Dique de Ipizca - Abril del 2013.....	39
Figura 1. 26: Nivel del Dique Motegasta – Abril 2013.....	40
Figura 1. 27: Nivel del Dique La Cañada – Abril 2013	40
Figura 1. 28: Cuenca del río Ambato (tomada de Maza et al. 2012).....	42
Figura 1. 29: Cuenca Alta del río Ambato (tomada de Niz 2014).....	46
Figura 1. 30: Daños ocasionados en la localidad turística de El Rodeo por la crecida del Río Ambato	47
Figura 1. 31: Cuencas de Aportes al Rio Marapa (tomada del documento síntesis de la Problemática del Área Sur de Tucumán, Este de Catamarca y Río Hondo.....	53
Figura 1. 32: Ubicación de estaciones pluviométricas Milkaut del Noa	55
Figura 1. 33: Excedentes hídricos de propiedades agrícolas ubicadas al Oeste de la RP N° 27 (Abril 2014)	59

Figura 1. 34: Rotura de la capa asfáltica producto del cárcavamiento debido a la erosión retrocedente del Río El Abra (Abril 2014)	59
Figura 1. 35: Afectación del cruce por el vado Los Pensamientos –Río El Abra. Abril 2014	60
Figura 1. 36: Cárcava generada por los desbordes del río Ovanta en La Bajada (afectación estancia La Tirolesa). Abril 2014	61
Figura 1. 37: Cárcava generada por el desborde del río Ovanta. Marzo 2015.....	61
Figura 1. 38: Corte terraplén de aproximación margen izquierda río El Abra RN N° 64 Marzo 2015.	62
Figura 1. 39: Cárcava conformada en un camino rural (sector norte de Puerta Grande) de 500 m de longitud y 10 m de profundidad.....	62
Figura 1. 40: Nacientes del sistema del río Paclín	65
Figura 1. 41: Cuenca del río Paclín.....	66
Figura 1. 42: Rompimiento de los terraplenes de acceso - puente RN 38	70
Figura 1. 43: Ruptura por socavación del terraplén de desvío del cauce del río Paclín.....	71
Figura 1. 44: Escurrimiento superficial del río Paclín por camino vecinal (cauce activo del río antes de la construcción del terraplén)	71
Figura 1. 45: Ejemplo de extrapolación curva H-Q medida por la empresa EVARSA sobre el Río del Valle en la localidad de Huaycama provincia de Catamarca	72
Figura 1. 46: Principio de funcionamiento de PIV en su forma clásica tomada de Patalano 2017	76
Figura 1. 47: Etapas de implementación de la técnica (tomada de Thielicke et al. 2014) ...	78
Figura 1. 48: efecto de diferentes filtros de pre-procesamiento sobre una imagen de trazadores utilizados en laboratorio (tomada de Patalano 2017).....	79
Figura 1. 49: Cálculo del desplazamiento a partir de la correlación de una ventana de interrogación (tomada de Barja 2015)	80
Figura 1. 50: Correlación Cruzada para un tamaño de ventana de 4X4 (tomada de Barja 2015)	82

Figura 1. 51: Diagrama del proceso de obtención de la función de correlación mediante el algoritmo de FFT	83
Figura 1. 52: Sustracción del fondo de imagen. A) Imagen Instantánea del flujo vertical en un campo de espigones fluviales. B) Imagen Media calculada usando 14400 cuadros. C) Imagen Instantánea mostrada en A), pero con la imagen media sustraída. (Tomada de Patalano)	86
Figura 1. 53: Campo de Flujo muestreado para un tiempo T1 y la ventana de correlación W_{t1n}	89
Figura 1. 54: Campo de flujo desplazado para un tiempo T2.....	90
Figura 1. 55: Ventana de correlación para la partícula i en el tiempo T2	90
Figura 1. 56: Similitud entre ventanas de correlación.....	91
Figura 1. 57: Desplazamiento de la partícula n y su vector.....	91
Figura 1. 58: vectores de velocidad para todas las partículas en el campo visual	92
Figura 2. 1: Opciones del paquete computacional River en la extracción de imágenes del video	107
Figura 2. 2: Secuencia de imágenes consecutivas extraídas de un video	107
Figura 2. 3: Definición del área de interés (ROI).....	108
Figura 2. 4: Sustracción del fondo de la imagen	109
Figura 2. 5: Detección de Partículas	110
Figura 2. 6: Pre-procesamiento de la imagen – Aplicación de filtros.....	111
Figura 2. 7: Resultado de correspondencia de pares entre dos imágenes resultantes LSPTV	112
Figura 2. 8: Resultado de correspondencia de pares entre dos imágenes consecutivas mediante LSPIV.....	113
Figura 2. 9: Vectores de desplazamientos promediados	113
Figura 2. 10: Vectores de desplazamientos promediados.	114
Figura 2. 11: Distancias entre Puntos de Control seleccionados	115
Figura 2.12: Rectificación del área de interés de la imagen usando como referencia 4 puntos de control (PC) establecidos.....	116

Figura 2. 13: Vectores promedios de velocidad e imagen de fondo rectificadas.	116
Figura 2. 14: Valores de velocidad superficial para la sección transversal definida.	117
Figura 3. 1: Ríos que escurren en la localidad de El Rodeo (imagen tomada de Google Earth)	121
Figura 3. 2: Lugar de mediciones LSPTV	122
Figura 3. 3: Tipo de trazadores empleados	123
Figura 3. 4: Recolección de Partículas.....	124
Figura 3. 5: Imagen extraída del video tomado arriba del puente peatonal (fecha de medición 15-04-2014)	126
Figura 3. 6: Imagen extraída del video tomado sobre margen derecha del río en el puente peatonal (fecha de medición 10-07-2015).....	126
Figura 3. 7: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). Tipo de trazador empleado: goma eva (izquierda). Tipo de trazador empleado: telgopor (derecha).....	130
Figura 3. 8: Batimetría de la Sección Relevada para el cálculo de caudales con LSPTV y Molinete.....	130
Figura 3. 9: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).	131
Figura 3. 10: Batimetría de la Sección Relevada para el cálculo de caudales con LSPTV y Molinete.....	132
Figura 3. 11: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). ...	133
Figura 3. 12: Batimetría de la sección relevada para el cálculo de caudales con LSPTV .	133
Figura 3. 13: Batimetría de la sección relevada para el cálculo de caudales con Molinete	134
Figura 3. 14: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). ...	135
Figura 3. 15: Batimetría de la Sección Relevada para el Cálculo de caudales con LSPTV	135
Figura 3. 16: Campos de velocidades medias de flujo interpolados (izquierda) y rango de velocidad adquirida (m/s) (derecha).	136
Figura 3. 17: Batimetría de la Sección Relevada para el cálculo de caudales con LSPTV	137
Figura 4. 1: Lugar de las mediciones con LSPIV	142

Figura 4. 2: Comparación de áreas inundadas entre perfiles transversales.....	143
Figura 4. 3: Ondulaciones Visibles del flujo – Medición 14/01/2016 -Altura de escala 3.5 m.	144
Figura 4. 4: Imagen extraída del video tomado sobre el puente peatonal (sector centro) (fecha de medición 14-01-2016).....	145
Figura 4. 5: Imagen extraída del video tomado sobre margen lateral izquierda del río (fecha de medición 01-02-2016).....	145
Figura 4. 6: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s) para toda el área de interés. (H= 3.50 m).....	147
Figura 4. 7: Ubicación de la sección transversal relevada para el Cálculo del caudal mediante LSPIV. (H = 3.50 m).....	148
Figura 4. 8: Batimetría de la sección transversal. (H = 3.50 m).....	148
Figura 4. 9: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). (H = 1.40 m).....	149
Figura 4. 10: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV y campo de velocidades superficiales obtenidas para esa sección. (H = 1.40 m).....	150
Figura 4. 11: Batimetría de la sección transversal. (H = 1.40 m).....	150
Figura 4. 12: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). (H = 1.80 m).....	151
Figura 4. 13: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV y campo de velocidades superficiales obtenidas para esa sección. (H = 1.80m).....	152
Figura 4. 14: Batimetría de la sección transversal. (H = 1.80m).....	152
Figura 4. 15: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). (H = 1.60 m).....	153
Figura 4. 16: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV y campo de velocidades superficiales obtenidas para esa sección. (H = 1.60 m).....	153
Figura 4. 17: Batimetría de la sección transversal (H = 1.60 m).....	154
Figura 4. 18: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). (H = 2.40 m).....	155

Figura 4. 19: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV - Imagen original (izquierda) – Imagen rectificada (derecha). (H = 2.40 m)	155
Figura 4. 20: Batimetría de la sección transversal. (H = 2.40 m)	156
Figura 4. 21: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). (H = 3.20 m).....	157
Figura 4. 22: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV - Imagen original (izquierda) – Imagen rectificada (derecha). (H = 3.20 m)	157
Figura 4. 23: Batimetría de la sección transversal. (H = 3.20 m)	158
Figura 4. 24: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). (H = 3.60 m).....	159
Figura 4. 25: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV - Imagen original (izquierda) – Imagen rectificada (derecha). (H = 3.60 m)	159
Figura 4. 26: Batimetría de la sección transversal. (H = 3.60 m)	160
Figura 4. 27: Comparación entre Rango de Mediciones	162
Figura 4. 28: Esquema de un canal rectangular donde se representa al nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo (HQ0) (tomada de Díaz 2014).....	162
Figura 4. 29: Curva (H-Q) determinada en función del comportamiento hidráulico del cauce según los datos de SSRHN.....	163
Figura 4. 30: Curva H-Q ajustada para todo el rango de H disponible.....	167
Figura 4. 31: Granulometría del cauce	171
Figura 4. 32: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).	174
Figura 5. 1: Puntos de implementación de LSPIV zona centro y este de Catamarca (Horizonte Temporal - 2 años)	183
Figura 5. 2: Puntos de Implementación de LSPIV zona Norte y Oeste de Catamarca (Horizonte Temporal de 2 años).....	184

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Cantidad y tipos de equipo instalados de la red pluviométrica provincial - Fuente: (DPHyERH) -----	25
Tabla 1.2: Planilla de Aforo con Molinete sobre el Río Los Nogales depto. Ambato. Fuente:(D.P.H.y.E.R.H.) -----	30
Tabla 1.3: Red Hidrológica Nacional – Publicaciones Hidrometeorológicas 2016 (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos – Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda - Presidencia de la Nación) -----	31
Tabla 1.4: Comparación de caudales en los ríos de aporte a los embalses ubicados en el Este Catamarqueño. (Fuente: DPHyERH)-----	38
Tabla 1.5: Estado de los Embalses. (Fuente: DPHyERH).-----	38
Tabla 1.6: Comparación de Niveles Estáticos - Año (2012-2013). Fuente: DPHyERH----	41
Tabla 1.7: Área de pendientes por subcuencas (Maza et al. 2012) -----	43
Tabla 1.8: Caudales Máximos asociados a tiempos de recurrencia de entre 2 y 200 años para precipitaciones de 3 y 6 horas de duración (tomada de Maza et al.2012) -----	44
Tabla 1.9: Estaciones pluviométricas de la empresa Milkaut del Noa-----	54
Tabla 1.10: Análisis de precipitaciones estaciones Milkaut del Noa. (Fuente: Colegio de Geólogos de la provincia de Catamarca) -----	56
Tabla 1.11: Precipitación Mensual Estación Pluviométrica Alijilán-----	56
Tabla 1.12: Precipitación Mensual Estación Termo-pluviométrica Digital - Alijilán-----	57
Tabla 1.13: : Recrecimientos de cárcavas activadas por la crecida del río San Francisco. Fuente: (Comisión de Emergencia para el tratamiento de la problemática de inundaciones en el sur de la provincia de Tucumán, Este de Catamarca y Río Hondo, 2017). -----	64
Tabla 1.14: : Precipitaciones Diarias Máximas –Cuenca del Río Paclín. (Gioria, 2006)---	67
Tabla 1.15: Diferencia porcentual entre eventos máximos registrados-----	68
Tabla 1.16: Laminas Totales de Precipitación para cada Núcleo – Cuenca del río Paclín -	69
Tabla 1.17: Caudales Máximos de Crecidas para la posición de tormenta más crítica – Cuenca del Río Paclín.-----	69

Tabla 2.1: Componente transversal y longitudinal de velocidad-----	118
Tabla 2.2: Cálculo de los caudales superficiales de cada tramo -----	118
Tabla 3.1: Fecha, sección y tipo de trazador empleado en las mediciones con LSPTV ---	123
Tabla 3.2: Características del video e imágenes extraídas para las distintas mediciones--	127
Tabla 4.1: Características del video e imágenes extraídas para las distintas mediciones...	146
Tabla 4. 2: Parámetros calibrados de la curva H-Q en la sección de estudio asumiendo un $H_{Q0}=0$	163
Tabla 4. 3: Parámetros de la ecuacion 4.1 calibrados que representan el comportamiento hidráulico del cauce	164
Tabla 4. 4: Diferencias Porcentuales obtenidas entre la ecuación con base teórica y LSPIV	165
Tabla 4. 5: Variación del caudal para una misma altura de superficie de agua libre	165
Tabla 4. 6: Parámetros de la ecuacion 4.1 calibrados representando el comportamiento hidráulico del río para $H > 2m$	167
Tabla 4. 7: Diferencia porcentual los valores de Caudales obtenidos mediante la curva H-Q y LSPIV	168
Tabla 4. 8: Intervalo de las variables hidráulicas	170
Tabla 4. 9: Rango de velocidades medias encontradas mediante LSPIV	171
Tabla 4. 10: Comparación entre resultados LSPTV Y LSPIV	174
Tabla 5.1: Posibles lugares de implementación de la Técnica LSPIV para medición de caudales.....	182
Tabla 5.2: Cronograma tentativo de actividades-----	189

RESUMEN

La Provincia de Catamarca cuenta en la actualidad con una alta densidad de puntos de medición de caudales en su red hidrográfica provincial, pero es posible observar importantes falencias debido a la falta de sistematización en la determinación de los caudales y la imposibilidad de medición en épocas de crecidas. Una posible solución a la problemática planteada es la utilización de técnicas de Velocimetría por Imágenes, empleadas en hidráulica en experimentos en laboratorios. Ésta tesis presenta la implementación a gran escala de las técnicas de Velocimetría por Imágenes disponibles en el estado del arte denominadas LSPTV (Velocimetría por Seguimiento de Partículas a Gran Escala) y LSPIV (Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala) para caracterizar flujo de aguas con superficie libre durante condiciones hidrológicas extremas (crecidas y estiajes) en cursos fluviales de la provincia de Catamarca, evaluando las ventajas y desventajas en el uso de esta nueva tecnología para la medición de caudales, aplicando LSPTV sobre el Río Los Nogales en la localidad de El Rodeo y LSPIV sobre el río Del Valle en la localidad de Huaycama. En cada caso se validan las metodologías empleadas, con la comparación de los caudales obtenidos mediante técnicas de aforos tradicionales. Finalmente se presenta un proyecto de implementación de la metodología LSPIV a nivel provincial buscando la participación activa por parte del gobierno provincial, municipal y la comunidad local consistente en la colocación de estaciones permanentes de LSPIV, y el análisis del material digital proveniente de la colaboración abierta de los diferentes actores (técnicos, ciudadanos). Los resultados obtenidos en el presente trabajo brindan un aporte al requerimiento de organismos gubernamentales y la comunidad científica, de la aplicación de una nueva metodología de medición de caudales que permita lograr una mejor comprensión de los ríos de la provincia de Catamarca bajo condiciones extremas.

ABSTRACT

The province of Catamarca counts at this time with a high density of measuring points regarding flow measurements in the hydrographic net of the province, but it is possible to observe important misstatement due to the lack of systems in the flow determinations and the impossibility of measurements during flood times. A possible solution to the problematic raised, would be the use of techniques of velocimetry by images, used in hydraulics in laboratory experiments. This thesis presents the implementation at a great scale of velocimetry by images techniques available in the state art designed as LSPTV (Large Scale Particle Tracking Velocimetry) y LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) in order to characterize the water flow with free surface during extreme hydrological conditions (high and low tides) in river courses in the province of Catamarca. Through this work, advantages and disadvantages in the use of this new technology for flow measurement are assessed, applying LSPTV on the Los Nogales river located in El Rodeo and LSPIV on the Del Valle river in Huaycama. In each case the applied methodologies are validated, by comparing the obtained flows with traditional gaging techniques. Finally, a project of implementation of the LSPIV methodology in the whole province is presented, looking for the active participation by the province government, the municipality and the local community which would consist in the placement of permanent stations of LSPIV and the analysis of the digital material coming from the different actors (technicians, citizens). The obtained results in this paper provides a contribution, of the use of a new flow measuring methodology which allows to get a better comprehension of the rivers in the province of Catamarca under extreme conditions to governmental agencies and the scientific community.

CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL

1.1 INTRODUCCIÓN

Muchas veces se ha utilizado la frase “El agua es vida, cuidemos la vida”. Sin embargo, el agua puede tener un impacto negativo que atenta contra la integridad física de las personas e infraestructura si se la asocia con fenómenos naturales que pueden convertirse en amenazas hídricas como son las inundaciones y/o crecidas repentinas. El inadecuado uso del suelo influye de manera negativa en la vulnerabilidad urbana ante inundaciones afectando especialmente a los asentamientos espontáneos que, en los últimos años del siglo XX, avanzaron sobre los cursos de agua consolidándose en las planicies de inundación.

A raíz de los eventos hídricos extremos ocurridos se hace necesario contar con información de base para el diseño de estructuras hidráulicas que mitiguen los efectos derivados. La Gestión Integrada de Crecidas (GIC) se sustenta en primer lugar por el conocimiento y análisis de la peligrosidad del evento natural. Esta peligrosidad estará dada en función de la probabilidad de ocurrencia del evento y por la magnitud del mismo expresada en variables hidráulicas como la altura de agua en el curso y la velocidad de escurrimiento.

Un sobredimensionamiento de las medidas genera un impacto innecesario sobre el medio ambiente y es antieconómico, en tanto que si se subestiman estas medidas pueden desatarse resultados catastróficos con un impacto aún mayor para la sociedad y el medio ambiente, tanto por la pérdida de vidas humanas como de bienes públicos y privados. En

este marco, el diseño sustentable de las medidas estructurales y no estructurales requiere la definición precisa de las variables hidrológicas de diseño (por ejemplo: caudal).

Un diseño hidrológico puede definirse como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo. La predicción de eventos extremos constituye un paradigma de este último tipo, puesto que su objetivo es la mitigación de los efectos de amenazas hídricas.

En la actualidad se utilizan dos metodologías para PREDECIR las variables de diseño en el empleo de medidas estructurales y no estructurales cuya finalidad es la mitigación de los efectos ante crecidas de magnitudes considerables, como ser: la predicción de un evento hipotético (magnitud y probabilidad de ocurrencia) y la selección de las variables características de un evento hidrológico extremo observado. Cualquiera sea la metodología adoptada el dato de la magnitud de caudal toma un rol protagónico.

Con ésta tesis, se busca brindar una solución a la problemática existente en la provincia de Catamarca, tratando de generar nuevas metodologías para la medición de caudales de características extremas implementado técnicas de Velocimetría por Imágenes para la caracterización del flujo superficial.

Este trabajo consta de 6 capítulos, que se resumen con una breve explicación del contenido de cada uno y de cómo están relacionados entre si

El capítulo 1 introduce al lector a la problemática planteada realizando una caracterización de las principales cuencas hidrográficas de la provincia y la presentación de los objetivos generales y particulares de esta tesis. Para ello, se caracteriza la información hidrológica disponible (precipitaciones y caudales) con que cuenta el organismo gubernamental de incumbencia y se plantea la problemática de establecer mediciones de

variables meteorológicas e hidrológicas en condiciones extremas ante la ocurrencia de eventos (estiajes, crecidas). Basado en el estado del arte que explica las técnicas de Velocimetría por Imágenes (PTV y PIV) que se encuentran disponibles, se sustenta la motivación científica y tecnológica de contar con una técnica moderna, no intrusiva, que permita la cuantificación de caudales, permitiendo así dar una solución a la problemática establecida.

El capítulo 2 describe paso a paso la metodología empleada en la determinación de caudales de estiajes y crecidas mediante la implementación de las técnicas LSPTV y LSPIV para cada actividad requerida en las etapas de medición, pre procesamiento y procesamiento de las imágenes, orto rectificación y post- procesamiento de los resultados.

En el capítulo 3 se aplica la metodología descrita para la determinación de los caudales de estiajes sobre el río Los Nogales, departamento Ambato provincia de Catamarca. En total se realizan 5 mediciones en distintas fechas validando los resultados obtenidos mediante la realización de aforos con molinete hidrométrico.

El capítulo 4 consiste en la aplicación de la metodología detallada para la determinación de caudales de crecidas sobre el Río Del Valle, departamento Ambato, provincia de Catamarca. En distintas fechas se ejecutaron en total 7 mediciones que se validaron hasta 1.80 m de altura de escala asociada con los datos obtenidos de la estación fija de aforo de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de Nación que se encuentra en la sección, para luego ajustar una curva H-Q con las mediciones de LSPIV hasta una altura de escala asociada de 3.60 m.

En el capítulo 5 se presenta un proyecto para la implementación de las técnicas de velocimetría por imágenes digitales a nivel provincial donde se consigna el objetivo general,

los objetivos particulares, lugares de medición, actividades requeridas, cronogramas a corto y mediano plazo para un horizonte temporal de 2 y 5 años respectivamente, promoviendo la participación activa de la sociedad en la filmación de los eventos para la cuantificación del recurso hídrico superficial.

Por último, el capítulo 6 presenta las principales conclusiones alcanzadas, las recomendaciones sugeridas y las propuestas de trabajos futuros derivados de ésta investigación. El informe se completa con el listado de las referencias bibliográficas y un anexo que incorpora el proyecto “*Cuantificación y caracterización de eventos hidrológicos extremos para mitigar el riesgo hídrico asociado en la provincia de Catamarca*”, presentado por la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicada de la Universidad Nacional de Catamarca a la Secretaria de Políticas Universitarias en el marco de la convocatoria Universidad y Desarrollo Local. El mismo contempla entre otras cosas, la implementación de una estación fija de aforo LSPIV en el río Del Valle en la localidad de Huaycama, departamento Ambato provincia de Catamarca.

1.2 PROBLEMÁTICA EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA

1.2.1 INTRODUCCIÓN

La provincia de Catamarca, se encuentra ubicada en el Noroeste de la República Argentina, entre los 25° 12' y los 30° 04' de latitud Sur, y entre los 69° 03' y los 64° 58' de longitud Oeste. La superficie del territorio es de 102.602 km² (2,7% del total nacional) y limita al norte con la Provincia de Salta, al noreste con Tucumán al este con Santiago del Estero, al sudoeste con La Rioja, al sur con Córdoba y al oeste con la República de Chile. La mayor parte de su superficie está cubierta por montañas, que se agrupan en cuatro sistemas bien diferenciados: las sierras pampeanas, el sistema Narvárez Cerro Negro Famatina, la zona de transición cordillerana catamarqueña y la puna (Lobo et al. 2007). Catamarca tiene una división política de 16 Departamentos comprendidos dentro de las siguientes zonas:

- Este: Departamentos Ancasti, La Paz, El Alto y Santa Rosa.
- Centro: Departamentos Capital, Fray Mamerto Esquiú, Valle Viejo, Ambato, Paclín y Capayán.
- Oeste: Departamento Santa María, Andalgalá, Pomán, Belén y Tinogasta.
- Puna: Departamento Antofagasta de la Sierra.

1.2.2 DESCRIPCIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

El territorio de la provincia de Catamarca se encuentra dividida en 10 grandes cuencas hídricas (Figura 1.1), con un escurrimiento superficial medio anual estimado entre 20 a 35 m³/seg, valor que resulta incierto debido a la falta de información especialmente durante las crecidas que presentan el mayor volumen escurrido. El 90 % del territorio provincial se encuentra caracterizado como zona árida con precipitaciones inferiores a 500 milímetros mientras que el 10% restante se encuentra en zona semiárida con precipitaciones hasta 1000 milímetros anuales.

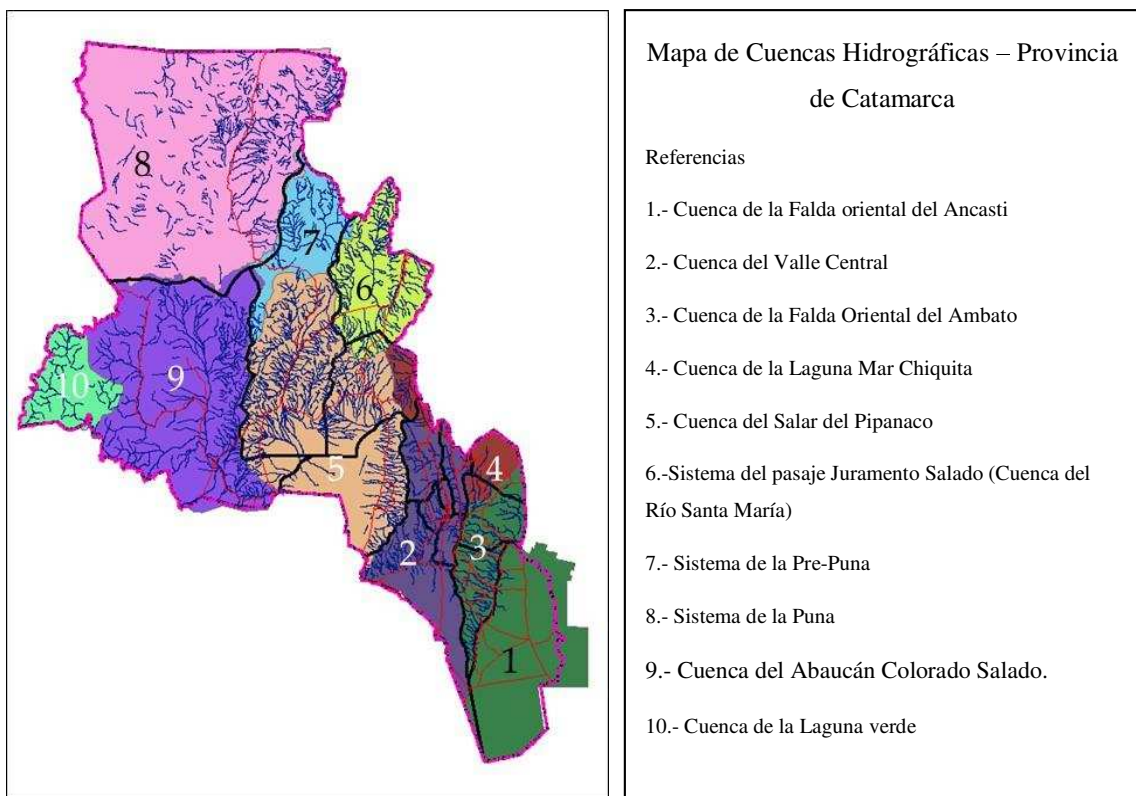


Figura 1. 1: Principales cuencas de la provincia de Catamarca según el INCYTH (Instituto Nacional de Tecnología Hídrica), tomado de la DPHyERH

El libro “La hidrología y el Agua en Catamarca” (Lobo *et al.* 2007) realiza una pequeña caracterización de las principales cuencas de la provincia. Parte de la misma es utilizada en una somera descripción de los sistemas hidrográficos que aquí se presentan.

1.2.2.1 CUENCA DEL ESTE

La cuenca del Este abarca una superficie de 11627 km² y se ubica en los departamentos de La Paz, Ancasti, Santa Rosa y El Alto (Figura 1.2). Posee una dirección predominante Norte-Sur con una pendiente más pronunciada hacia la región centro.

Esta región está separada de la cuenca Central por el cordón de El Alto-Ancasti. En ella descienden cursos de agua de régimen estacional aprovechados por los diques La Cañada, Coyagasta, Sumampa, Motegasta e Ipizca que permiten a la zona Este contar con agua en épocas de estiaje o sequía para riego y/o consumo humano directo.

Geológicamente, se puede afirmar que la sierra de El Alto-Ancasti tiene una dirección predominante Norte-Sur y su pendiente más abrupta está enfrentada a la zona del Valle Central de Catamarca; las mismas rocas metamórficas que componen las sierras mencionadas, configuran su zócalo hidrogeológico.

Desde el punto de vista hidrográfico, los ríos y arroyos son de pobre entidad en general, siendo los principales los ríos Albigasta, Icaño y San Francisco o Huacra. Las lluvias son escasas con precipitaciones medias anuales que rondan entre los 550 mm y los 850mm, y disminuyen de Norte a Sur. El verano es caluroso y el invierno es templado. Los vientos soplan del Este, Noreste y Sudoeste.

La flora se desarrolla con una vegetación adaptada a la aridez del clima y del relieve existiendo matorrales y bosques de vegetación xerófilos de maderas duras y resistentes.

Entre las especies más representativas de la fauna se encuentran: huemules, pumas, comadrejas, quirquinchos, chinchillas, lagartos, boas de las vizcacheras, zorros grises, gato del monte, búhos, lechuzas, vizcachas y perdices del cerro.

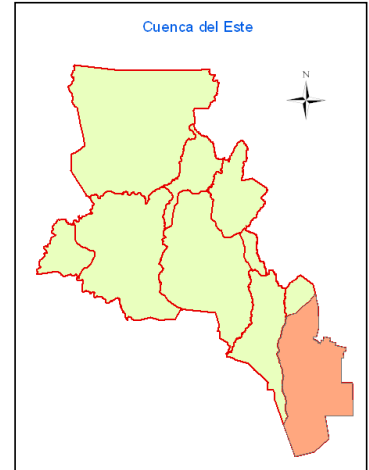


Figura 1. 2: Ubicación y paisaje natural de la cuenca del Este- Infañzón dpto El Alto

1.2.2.2 CUENCA DE LA FALDA ORIENTAL DEL AMBATO

La Cuenca del Valle Central (Figura 1.3), es denominada por el INCYTH (Instituto Nacional de Ciencias y Tecnología Hídrica) como cuenca de la “Falda Oriental del Ambato”. Con 5315 Km² de superficie comprende los departamentos de Capital, Valle Viejo, Fray Mamerto Esquiú, Capayán, Ambato y Paclín. Posee un clima semi-árido de sierras y bolsones. Hacia las laderas orientales de las sierras donde las condiciones son menos severas, permiten la radicación de oasis de riego con una alternancia de microclimas húmedos. Los vientos pueden clasificarse como suaves, en su mayor proporción predominando el viento del noroeste en el oriente y del sudeste en el centro occidental.

La flora se desarrolla con una vegetación dominante de quebracho colorado y blanco, palo borracho, sombra de toro, tala, espinillo, chañar, y cactáceas como cardón, etc.

Entre las especies más representativas de su fauna se encuentran víboras de diferentes clases, chanco del monte, perdices, palomas, quirquinchos, liebres, conejos, vizcachas, corzuelas, cotorras, loros, patos, cuises, comadrejas, gato montés, iguanas, lechuzas, etc. También cuenta con la posibilidad para la pesca en ríos o diques donde existen especies tales como: pejerrey, percas, carpas, bagres y truchas.

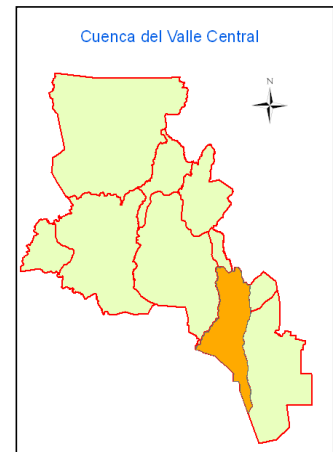


Figura 1. 3: Ubicación y paisaje natural de la cuenca de la Falda Oriental del Ambato-Quebrada del Tipán- dpto. Capayán.

1.2.2.3 CUENCA DEL ABAUCÁN COLORADO SALADO

La cuenca del río Abaucán equivale a un 21% de la superficie provincial. Se encuentra situada al Noroeste de la provincia de Catamarca y una franja septentrional de la provincia de La Rioja. Se conforma por una serie de torrentes, que descienden del borde de la Puna y las sierras Pampeanas (alturas superiores a 4000 msnm), con lechos profundos entre barrancas escarpadas y de caudales en general temporarios (con importantes crecidas en épocas de deshielo y sequías durante casi todo el año).

Con una superficie de aproximadamente 21500 km² en la provincia de Catamarca y 6800 km² en la provincia de La Rioja esta cuenca comprende casi la totalidad de los departamentos de Tinogasta (Provincia de Catamarca), y de Arauco, Castro Barros y Pelagio

B. Luna, así como la mitad aproximadamente del de Famatina y una pequeña parte del Departamento Capital (La Rioja).

La región es de extrema aridez, con una precipitación media total anual de aproximadamente 200 mm. Su paisaje se encuentra formado por montañas sin vegetación, arenales, y desiertos llanos y de poca extensión, y médanos que cubren casi la totalidad de las faldas de las sierras como se muestra en la figura 1.4

Los vientos predominantes de la región son del sector Sur-Sureste, con una velocidad promedio de 20 a 70 km/h y excepcionalmente de 90 km/h. En la estación invernal prevalece un viento caliente y seco, llamado Zonda, que procede de la cordillera con velocidades que oscilan entre 70 a 80 Km/h.

La flora se desarrolla con una vegetación típica integrada de arbustos tipo xerófila, especies achaparradas, como el pasto puno; leñosos y a menudo espinosos, de escaso follaje y una altura media de 1 m. hasta 3 m. como máximo.

La fauna se encuentra caracterizada por la existencia de animales característicos de climas áridos: Alpacas, guanacos, chinchilla, zorro colorado, puma, vicuña, etc.

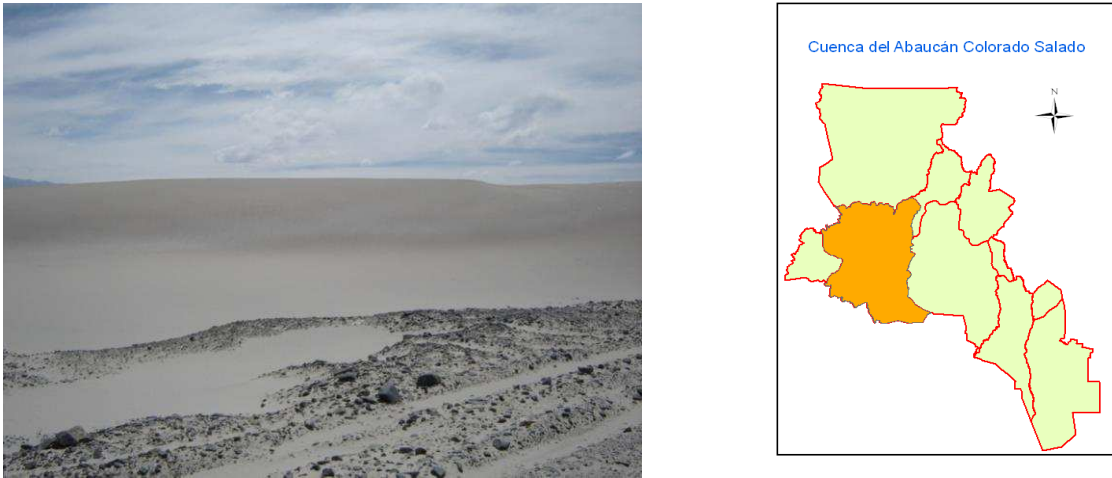


Figura 1. 4: Ubicación y Paisaje Natural de la cuenca del Abaucán-Colorado-Salado - Dunas en Tatón - dpto. Tinogasta

1.2.2.4 CUENCA DEL SALAR DEL PIPANACO

Ésta cuenca está constituida por numerosos ríos y arroyos que convergen en una depresión central, conocida como Salar de Pipanaco.

La extensión del Salar propiamente dicho es de aproximadamente de 600 km², siendo una hoyada cerrada, limitada al Norte, Oeste y Este por altas montañas y al Sur por una planicie que se confunde prácticamente con el límite Norte de la Cuenca de río Abaucán-Colorado, cuya tendencia parece haber sido de desaguar en el Salar.

Con una superficie de 17994 km², abarca íntegramente el departamento Pomán, la mayor parte de los departamentos de Belén y Andalgalá, y parte Sur-Este del departamento Tinogasta.

Como consecuencia del clima continental seco que presenta, la vegetación es de tipo xerófila, pobre y achaparrada, diferenciándose en los valles de las sierras de Andalgalá y Belén donde adquiere un gran desarrollo como presencia de elementos florísticos de la selva tucumana.

Entre la Fauna local figuran los guanacos, las vicuñas y los zorros.

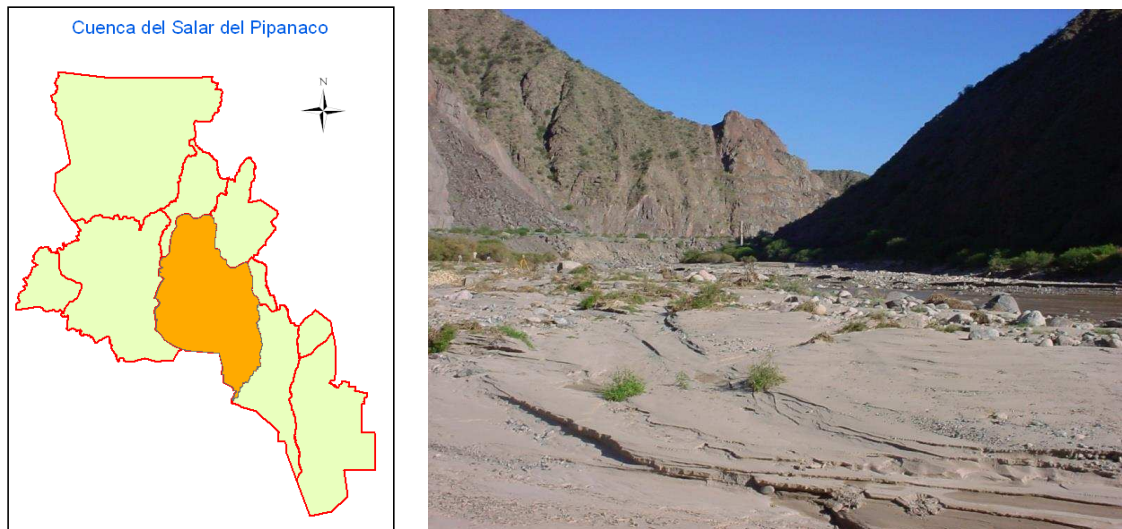


Figura 1. 5: Paisaje natural de la Cuenca del Salar del Pipanaco - Quebrada de Belén

1.2.2.5 CUENCA DEL RÍO SANTA MARÍA

El río Santa María se encuentra en el extremo Noroccidental de la Provincia de Tucumán y hacia el Norte de la Provincia de Catamarca, a 1900 metros sobre el nivel del mar dentro del valle ínter-montano de Santa María. Este valle corresponde a una cubeta tectónica con orientación Norte-Sur, que se extiende desde la provincia de Salta al Norte hasta la Provincia de Catamarca al Sur y que atraviesa el sector Oeste de Tucumán. Se trata de un valle con un ancho variable entre 20 y 25 km.

Nace al Oeste de la sierra de Quilmes o del Cajón, en los bordes de los Nevados de Catreál con el nombre de Arroyo del Cajón, formado por los ríos de Agua Caliente y de Tomás a casi 4500 metros de altitud y sigue con rumbo Sur paralelamente a la sierra del Cajón, luego toma el nombre de río Colorado y se orienta con un recorrido Norte-Sur. En el Codo de Punta de Balasto, se denomina río Saladillo desde donde inicia una amplia curva

con la que su curso toma una dirección totalmente contraria Sur-Norte. En el valle lleva la denominación de río Santa María, que recolecta todos sus afluentes y remonta durante 45 kilómetros el territorio de Catamarca hasta encontrar el límite de la provincia de Tucumán. Al Norte, en la Provincia de Salta, se une al río Calchaquí y forma el río de las Conchas-Guachipas, dando origen después al río Juramento o Salado que desagua en el río Paraná. Cabe destacar que el río Santa María es un río de carácter exorreico que pertenece a la cuenca del Plata que desemboca en el mar argentino.

Con una superficie de aproximadamente 1700 km² abarca en el territorio provincial al departamento Santa María en su totalidad.

Presenta un clima árido de sierras y bolsones. El rasgo más sobresaliente es la sequedad del ambiente y la gran amplitud térmica.

La flora predominante es la del monte occidental xerofítico con abundantes especies medicinales y aromáticas. La vegetación es muy escasa debido a las bajas precipitaciones que imperan en la región. Es característica de la zona la jarilla, el algarrobo negro, la brea, la tusca, y el chañar.

Las especies faunísticas más comunes son el guanaco, la vicuña, el conejo de palo, la chinchilla, el cuis, el zorro, la lagartija, la perdiz, el quirquincho, etc.



Figura 1. 6: Paisaje Natural de la cuenca del río Santa María - Unión ríos Agua Dulce y Sajarapampa- dpto. Santa María

1.2.3 DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

Existen diversas formas de estimar la disponibilidad de agua que tiene un país o región, pero la precisión y el realismo del valor calculado dependen mucho de la información con que se cuente (Lobo et al. 2007).

La falta de información de variables meteorológicas e hidrológicas (precipitaciones, caudales) que sirven para calibrar modelos hidrológicos e hidráulicos y que pueda simular el comportamiento de un determinado curso fluvial, dificulta la determinación de zonas susceptibles de inundación ante crecidas de distintas magnitudes, haciendo ineficaz la gestión del riesgo hídrico.

Para acentuar la problemática, el uso y costumbre de la población ante la situación de sequía genera resistencia y falta de conciencia del riesgo que implica el asentamiento en lugares propensos a inundaciones.

La Red Pluviométrica Provincial, creada en la década de 1970, fue diseñada con un criterio agropecuario, debido al escaso régimen de precipitaciones que caracterizaba la

provincia. Se puede pensar que contar con 160 equipos de medición de precipitaciones instalados es suficiente para registrar las lluvias que originan crecidas de diferentes magnitudes. Sin embargo, los pluviómetros se encuentran ubicados principalmente en la cuenca media y baja, no siendo muchas veces representativos de la magnitud del evento ocurrido. Como ejemplo de ello, podemos citar las crecidas de carácter extraordinario ocurridas sobre los ríos Ambato y Siján el día 23 de enero del 2014 originadas por una intensa precipitación concentrada en la cumbre del Cerro Manchao (cuenca alta de ambos ríos), de la cual no se tiene registro a pesar de contar con equipos de medición en la cuenca baja de ambas localidades. (Figura 1.7).

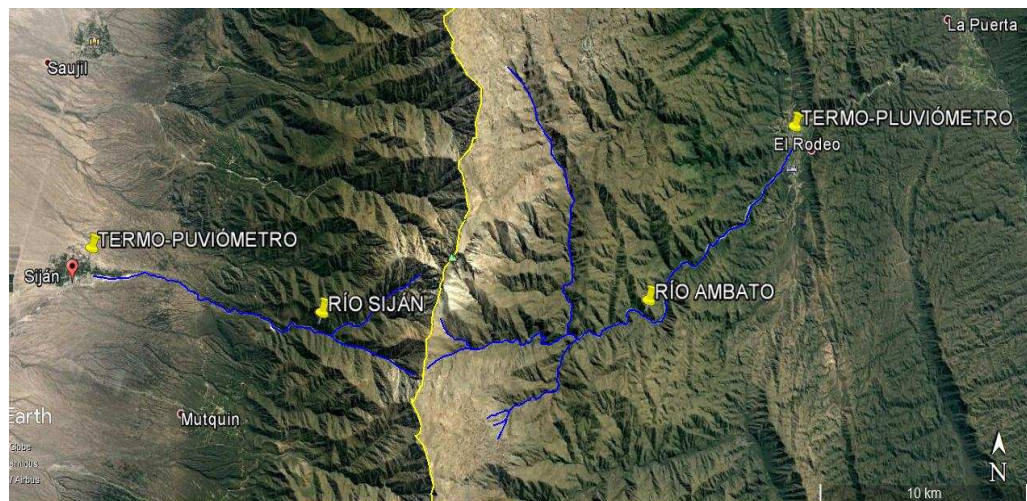


Figura 1. 7: Cumbre del Cerro Manchao (naciente de los ríos Ambato y Siján), y ubicación de los Termos- Pluviómetros instalados en las localidades de Siján y El Rodeo (cuenca baja de ambos ríos).

En casi todas las cuencas hidrográficas de la provincia, y en otras regiones de la geografía argentina, estamos en presencia de lo que se denomina un sistema hidrológico pobremente aforado. Es decir, no se realizan mediciones regulares y sistemáticas de las variables hidro meteorológicas e hidrológicas de mayor interés para estudios de esta naturaleza, tales como lluvias y caudales. Si bien existen modelos hidrológicos transformación lluvia-escorrentía, los mismos no se encuentra calibrados debido a la falta de

datos, y si sumamos a esto la carencia de mediciones de caudales de crecidas, nos encontramos ante meras estimaciones de eventos de diferentes magnitudes.

La pregunta es: ¿Es posible colocar equipos en la cuenca alta de los principales ríos de la provincia?

En respuesta a lo planteado se puede afirmar que, es posible la colocación de equipos en las cuencas altas. Sin embargo, la logística de instalación y la obtención del dato es muy dificultosa debido a:

- La Topografía: de los 102.602 kilómetros cuadrados que tiene la provincia, aproximadamente el 70 % está cubierto por un relieve de tipo montañoso, donde, en la mayoría de los casos, el acceso a los posibles puntos de medición es extremadamente arduo debido a la inexistencia de caminos. Ante esta situación, la posible instalación de algún equipo de medición, el mantenimiento y obtención de datos se hace muy dificultoso.
- Falta de asentamientos poblacionales: al tratarse de lugares tan inhóspitos, los mismos carecen de asentamientos poblacionales o son de muy baja escala, como puestos para pasturas de animales habitados esporádicamente y en ciertas épocas del año, por lo que pensar en la posibilidad de colocar pluviómetros de lectura por operador sería imposible. Debería estudiarse la factibilidad de instalación de equipos digitales de medición con automatización energética propia mediante paneles solares, introduciendo con esto la problemática de asegurar la integridad de los mismos y la forma de poder visualizar el correcto funcionamiento del equipo a la distancia, para evitar la pérdida de información ante eventos de características importantes.

A pesar de los esfuerzos realizados para lograr cuantificar el recurso hídrico superficial, no se ha podido hasta el momento, obtener una aproximación aceptable, debido

a la falta de datos sistemáticos de aforos, especialmente en lo que se refiere a la cuantificación de valores de crecida. Dicha problemática ha sido identificada y puntualizada en algunos puntos fundamentales, como ser:

- La mayor parte de la superficie de Catamarca está cubierta por montañas, que se agrupan en sistemas bien diferenciados y con condiciones particulares y muy disímiles entre sí. A modo de ejemplo, los ríos ubicados en el sector Oeste de la provincia poseen un cauce errático y con un ancho variable en el cual, la ubicación del pelo de agua varía en el ancho total oscilando entre 10 y 300 metros (Figura 1.8). Estos ríos transportan una parte importante de sólidos finos (arcilla, arenas) ocasionando algunos problemas en las plantas potabilizadoras. En contraposición, los ríos del sector Centro de la provincia poseen cauces bien definidos y encajonados con un transporte de grandes cantos rodados que arrastran todo a su paso en crecidas significativas, lo que impide el uso de técnicas de medición intrusivas (Figura 1.9).



Figura 1. 8: Ríos de cauce errático y alto poder de transporte de sólidos finos- río Abaucán dpto. Tinogasta



Figura 1. 9: Ríos de Montaña de cauces bien definidos y alto poder de transporte de cantos rodados de gran tamaño – río Ambato dpto. Ambato

- El régimen de crecida de los cursos fluviales: la provincia de Catamarca se define como zona árida y semiárida con un régimen de lluvia dado por intensas precipitaciones en los períodos de diciembre a marzo, originando crecidas repentinas con

escasos tiempos de concentración y de pocas horas de duración, lo que muchas veces imposibilita llegar al lugar para poder evaluar el pico del hidrograma.

- Falta de obras que aseguren la medición de valores de caudales con precisión: se cuenta con muy pocas estructuras hidráulicas que permiten la cuantificación del caudal. Uno de los limitantes principales es el costo elevado en la construcción de las mismas.

El organismo provincial encargado de cuantificar el recurso hídrico en Catamarca cuenta con 235 puntos de aforos instantáneos no sistemático repartidos en aproximadamente 90 ríos a lo largo del territorio provincial (Figura 1.10). A pesar de la alta densidad existente de los puntos de medición en la red hidrográfica, la misma observa falencias importantes, como la falta de sistematización en la toma de datos y la imposibilidad de medición en época de crecidas.

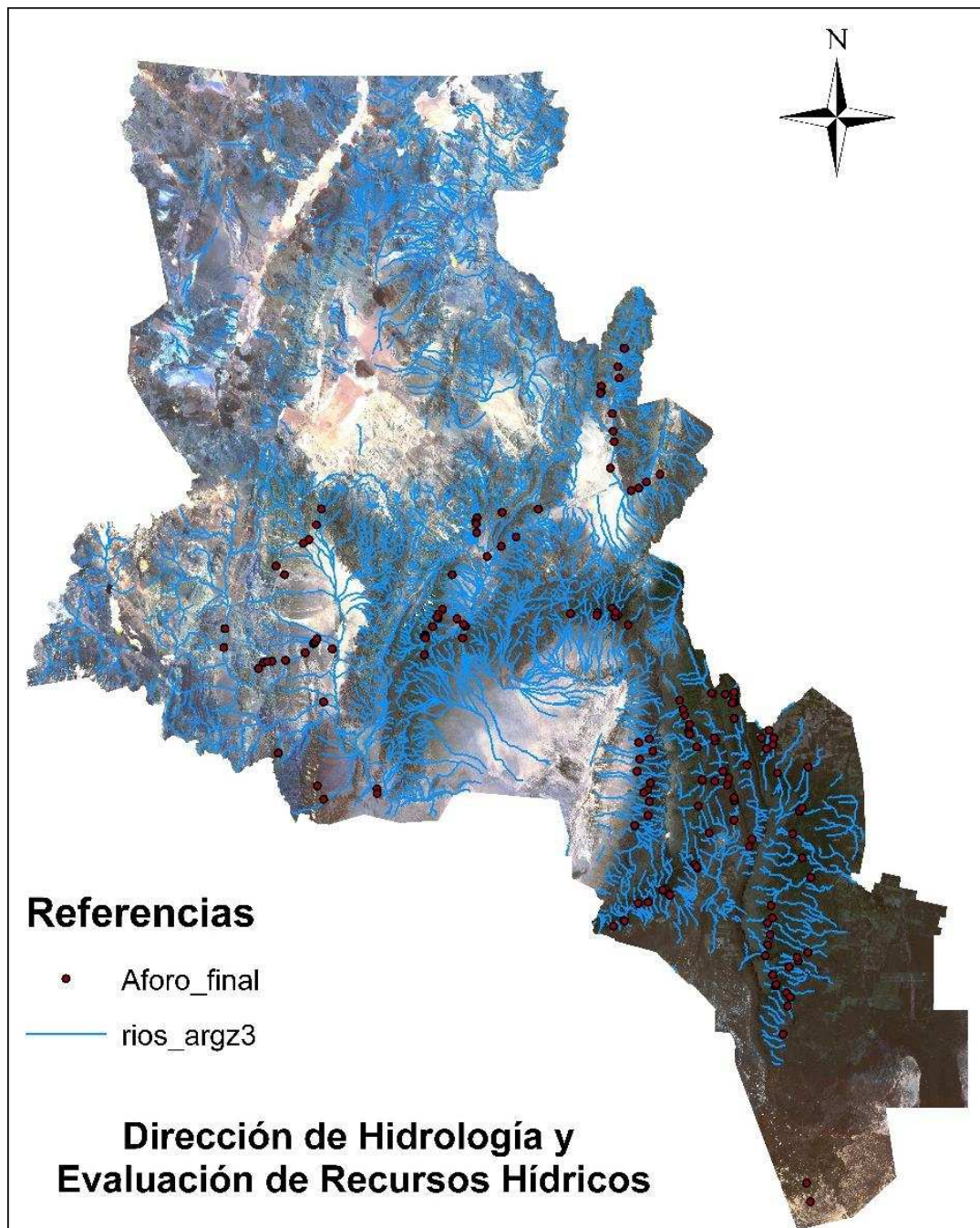


Figura 1. 10: Mapa Hidrográfico y Secciones Fijas de Aforo de la provincia de Catamarca.
Fuente: Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos.

La cuantificación de variables hidrológicas durante eventos extremos es fundamental para una gestión eficiente de los recursos hídricos y la validación de los modelos hidrológicos.

En síntesis, en los ríos de montaña, como es el caso de Catamarca, las cuencas presentan una respuesta rápida generando crecidas de carácter repentino caracterizadas por niveles y velocidades de flujo muy superiores al régimen hidrológico normal, asociándose en la mayoría de los casos al transporte de material sólido en suspensión o arrastrado ya sea natural o antrópico, que imposibilita la medición intrusiva de los caudales.

Ante la inexistencia de datos de caudales escurridos durante crecidas repentinas, otra manera de estimar caudales es mediante la utilización de modelos de transformación lluvia – caudal, donde partiendo del dato de precipitación se pueden obtener valores de caudales asociados a cierta recurrencia. En la aplicación de estos modelos es importante contar con series largas de precipitaciones.

La red meteorológica provincial cuenta actualmente con aproximadamente 42 estaciones meteorológicas instaladas a lo largo de todo el territorio provincial de los cuales 38 son termo-pluviómetros digitales que miden solamente temperatura y precipitación, y 4 son meteorológicas completas que miden las variables de temperatura, precipitación, presión, humedad, dirección y velocidad del viento. (Figura 1.11)



Figura 1. 11: Estación Meteorológica completa instalada en la localidad del Rodeo – departamento Ambato

De los 38 termo-pluviómetros instalados, 15 son telemétricos cuyo dato es transmitido mediante GPRS a la página web de la dirección de Hidrología de la provincia (actualmente en construcción). El sistema telemétrico integrado a los equipos todavía se encuentra en una etapa de prueba, pero es importante destacar el trabajo realizado, ya que él mismo permitirá contar con el dato de las mediciones de las distintas variables a tiempo real, permitiendo conocer el evento en el mismo momento en que está sucediendo. Además de los equipos de medición mencionados en los últimos tres años, se han colocado 3 sensores de nivel sobre el río en la cuenca media del río Ambato (figura 1.12) cuya transmisión telemétrica es vía UHF como parte del primer Sistema de Alerta Temprana instalado en la provincia en la localidad del Rodeo (villa turística afectada por un evento extraordinario en el año 2013) y que se complementa con tres pluviómetros telemétricos emplazados estratégicamente. (Figura 1.13)



Figura 1. 12: Estación Pluviométrica telemétrica que conforma el Sistema de Alerta temprana para la Localidad del Rodeo – Departamento Ambato – Provincia de Catamarca



Figura 1. 13: Sensor de nivel colocado sobre el Río Ambato que conforma para el Sistema de Alerta Temprana para la localidad de El Rodeo

Debido a la crecida extraordinaria del Río Paclín en marzo del 2017, que terminó con la abnegación de varios sectores ubicados en la planicie de inundación del río y en paleo cauces que se activaron ante la magnitud del evento, la provincia ha instalado en la localidad de La Merced (cuenca media del río Paclín) un sensor de nivel cuya transmisión telemétrica es vía GPRS (Figura 1.14)



Figura 1. 14: Sensor de Nivel ubicado sobre el Río Paclín en la localidad de La Merced departamento Paclín

En sumatoria a los equipos de medición digitales, la red pluviométrica provincial cuenta con datos de aproximadamente 90 pluviómetros activos tipo B distribuidos por departamentos como se visualiza en la tabla 1.1

Departamento	Pluviómetro tipo b (activos)	Pluviómetro tipo b (inactivos)	Pluviómetro tipo b (totales)	Termo-Pluviómetros digitales	Termo-Pluviómetro Digitales Telemétricos	Estaciones meteorológicas
Ambato	5	7	12	-	4	1
Ancasti	13	8	21	1	-	-
Andalgalá	3	2	5	-	2	-
Belén	9	4	13	5	-	-
Capital	1	1	2	-	1	1
Capayán	8	7	15	1	1	-
El Alto	11	11	22	1	1	-
La Paz	11	7	18	1	-	-
Paclín	7	3	10	3	1	-
Pomán	4	1	5	1	1	-
Santa María	3	1	4	3	1	1
Santa Rosa	2	3	5	1	2	-
Tinogasta	12	9	21	6	-	1
Valle Viejo	1	1	2	-	1	-
TOTALES	90	65	155	23	15	4

Tabla 1.1: Cantidad y tipos de equipo instalados de la red pluviométrica provincial -
Fuente: DPHyERH

Otra alternativa para determinar caudales picos sería forzar, mediante modelización hidráulica, los niveles de agua medidos *in situ* en lugares donde las resacas de crecidas puedan ser determinadas, asumiendo que las indeterminaciones en los parámetros hidráulicos requeridos podrían generar grandes incertidumbres en la estimación (Figura 1.15)



Figura 1. 15: Resaca de una crecida importante en el Río del Valle- localidad de Huaycama departamento Ambato

1.2.4 IMPLEMENTACION DE TECNICAS CONVENCIONALES DE MEDICION DE CAUDALES EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA.

La necesidad de contar con valores (máximos y mínimos) de caudales que permitan realizar una gestión eficiente del recurso hídrico en situaciones extremas, ha conducido a desarrollar diversas metodologías, técnicas y estructuras hidráulicas a través del tiempo que permiten una cuantificación de caudales tanto en estiajes como en crecidas.

La Dirección de Hidrología es la encargada en la provincia de cuantificar el recurso hídrico superficial y subterráneo. Para ello los técnicos se valen de diversos procedimientos que se describen a continuación para aforar el cauce de un río o canal de riego.

- Aforo por método volumétrico
- Aforo por el método de flotadores
- Aforos por molinete
- Aforo por cálculo directo
- Aforo por estrangulación de la corriente
- Aforo por vertederos

Aforo por método volumétrico: permite la medición directa del caudal de agua escurrido en una sección (Figura 1.16). Consiste en medir el tiempo que tarda el flujo de agua en llenar un volumen conocido. Para la medición se necesita un recipiente calibrado y un cronómetro. La provincia ha utilizado este método muy pocas veces y en condiciones donde el flujo de agua es tan escaso que no sería viable la medición con molinete.

Generalmente este método es utilizado en la medición de caudales de vertientes de pocos litros por segundo.



Figura 1. 16: Aforo Volumétrico sobre la vertiente El Sauco - Localidad de Rosario de Colana departamento Pomán, provincia de Catamarca

Aforo por el método de flotadores (ISO 2007): el flotador utilizado puede ser natural (ramas, hojas, troncos, etc.) o artificial (botellas, latas, o todo elemento que se mantenga a flote en el agua). Para su implementación se elige dos secciones transversales ubicadas a lo largo de un tramo recto del curso de agua que se quiere aforar y a una distancia conocida. La metodología consiste en distribuir un número de flotadores de manera uniforme a lo ancho de la sección y medir el tiempo que tardan en recorrer cada uno de ellos esa distancia. La velocidad del flotador es igual a la distancia que separa las dos secciones transversales dividida el tiempo que tarda en transitar la misma, multiplicada por un coeficiente de 0.85 a 0.88 que comúnmente se utiliza para convertir la velocidad superficial del flotador a la velocidad media de la columna de agua. El caudal en cada una de las subsecciones se obtiene de multiplicar la velocidad media por el área de cada subsección, resultando el caudal total como la suma de cada uno de los caudales parciales.

Al no contar muchas veces con el equipo necesario de aforo o a la imposibilidad de la medición debido a la magnitud del caudal, el método del flotador ha sido utilizado en

numerosas veces por los técnicos de hidrología de la provincia de Catamarca para determinar caudales en cursos fluviales (estiaje y crecidas) y en canales de riego. Los valores de caudales obtenidos por éste método se toman como estimativos debido al gran porcentaje de error derivado, que reside en la interpolación de la geometría del lecho, las velocidades puntuales medidas, la influencia del viento en superficie, etc.

Aforo por Molinete (ISO 2007): ésta técnica contempla la medición puntual de la velocidad en el flujo. El molinete de hélice está calibrado de forma tal que existe una relación conocida entre la velocidad de rotación de la hélice y la velocidad del flujo. El molinete se puede presentar como un micro-molinete para la medición de bajos caudales, o lastrado de un peso de forma hidrodinámica para la medición de caudales en crecidas. Se puede medir con molinete por el método de vadeo, desde un puente, desde un cable carril o desde una embarcación móvil, aunque su implementación en crecidas extraordinarias es muy dificultosa. El procedimiento consiste en dividir la sección transversal del curso de agua a aforar en varias franjas de igual ancho. En cada una ellas, la velocidad media que se calcula a partir de las velocidades medidas a 0.2, 0.6, y 0.8 de la profundidad de cada franja si la misma es superior a 0.6 metros. Esta velocidad multiplicada por el área entre franjas dará el caudal para esa subsección. Para profundidades de flujo inferiores a 0.6 metros, la velocidad del flujo se mide efectuando una única lectura a 0.6 de la profundidad del flujo. El caudal total se calcula por la suma de los caudales parciales obtenidos en cada una de las franjas delimitadas. (Figura 1.17).

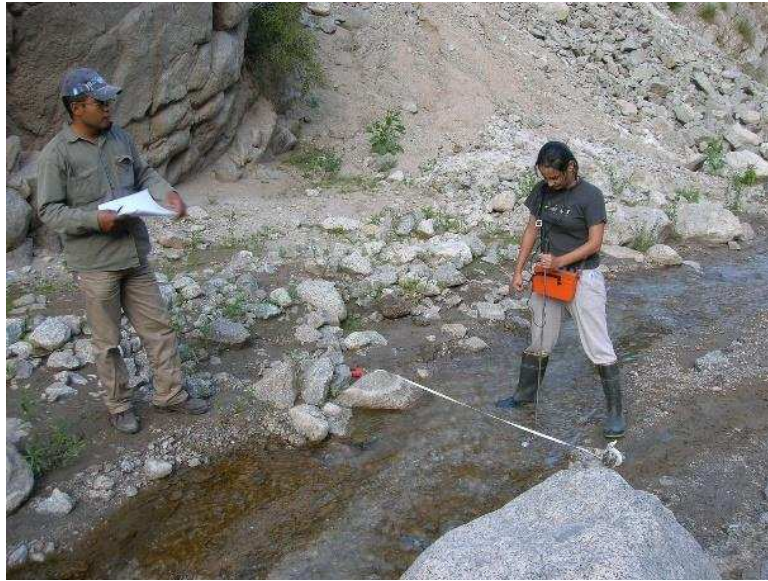


Figura 1. 17: Aforo con Molinete realizado sobre el río Asampay- dpto. Belén

La tabla 1.2 muestra la planilla de cálculo mediante la técnica descrita que emplean los técnicos de Hidrología en la determinación de los caudales.

DIRECCION PROVINCIAL DE HIDROLOGÍA Y EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS											
RIO : LOS NOGALES			Lugar: EL RODEO (aguas abajo del puente peatonal)								
DEPARTAMENTO: Ambato											
Fecha : 04-09-2015											
Velocimetro : A-OTT - Helice N° 1						FORMULA: $V = 0,0548 \times n + 0,0713$					
Vmáx = 2,5 m/s - Vmin = 0,25 m/s											
Latitud :				Longitud :				Altitud :			
OPERADOR : ALVARADO LUCIANO											
distancia del origen	Profundidades		Ancho	Area	revoluciones	Tiempo en segundos	Velocidades			Profundidad de Observación	Caudal Parcial
	en la vertical	Media					en los puntos	Media en la Vertical	Media en la sección		
0.00	0.00				0	30	0.0713				
		0.030	0.200	0.0060					0.1352		0.001
0.20	0.06				70	30	0.1992				
		0.070	0.200	0.0140					0.3170		0.004
0.40	0.08				199	30	0.4348				
		0.080	0.200	0.0160					0.4814		0.008
0.60	0.08				250	30	0.5280				
		0.070	0.200	0.0140					0.5563		0.008

Tabla 1.2: Planilla de Aforo con Molinete sobre el Río Los Nogales depto. Ambato.
Fuente:(D.P.H.y.E.R.H.)

Los 235 puntos de aforos instantáneos no sistemáticos que conforman la red hidrométrica provincial fueron obtenidos empleando ésta técnica, de los cuales ningún valor de caudal corresponde a determinaciones en condiciones de crecidas. Sin embargo, actualmente la subsecretaría de Recursos Hídricos dependiente del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda de la Presidencia de la Nación a través de la empresa privada EVARSA, realiza mediciones de caudales en estaciones fijas de aforos que cuentan con una escala hidrométrica para medir altura de agua y una vagoneta con sistema de cable carril que permite realizar la técnica de aforo por molinete descrita anteriormente en condiciones de crecidas (Tabla 1.3).

RÍO	LUGAR	SISTEMA	CUENCA	LATITUD	LONGITUD
Abaucán	Tinogasta	Serrano	Río Abaucán	27° 59' 35,00"	67° 37' 37,33"
Abaucán	Límite con la Rioja	Varias Cerradas	Salar de Pipanaco	28° 15' 41,41"	67° 01' 15,29"
Del Campo	Cabo San Miguel	Laguna Mar Chiquita	Río Salí-Dulce	27° 26' 01,40"	65° 59' 50,40"
Santa María	Pié de Médano	Río Salado	Alta Cuenca del Río Juramento	26° 59' 43,70"	66° 13' 03,73"
Del Valle	Huaycama	Varias Cerradas	la Falda Oriental del Ambato	28° 07' 13,50"	65° 47' 53,40"

Tabla 1.3: Red Hidrológica Nacional – Publicaciones Hidrometeorológicas 2016 (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos – Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda - Presidencia de la Nación)

La figura 1.18 visualiza la vagoneta de aforo y el equipo aforador que se encuentran en la localidad de Pie de Médano departamento Santa María y que es utilizado para medir caudales bajo condiciones de crecidas.



Figura 1. 18: Vagoneta de Aforo a cable carril (izquierda) – Molinete Hidrométrico empleado bajo condiciones de crecidas (derecha)

Aforo por Cálculo Directo: consiste en asimilar el cauce del río a un canal regular en el que se estableciese un régimen uniforme y aplicar la fórmula empleadas para canales. Éste procedimiento es muy inexacto, pues por más regular que sea el tramo del río que se considere, la sección y la pendiente cambian de un punto a otro y el régimen uniforme no se establece. Éste procedimiento es utilizado en muy contadas ocasiones para estimar, en forma

grosera, el caudal donde se puede determinar la altura de crecida mediante la visualización de las resacas.

Aforos por estrangulación de la corriente, Canaleta Parshall (ISO, 1992): por su parecido al aforador Venturi en tuberías, se le ha llamado Venturi en canales, y también por emplear el principio del resalto hidráulico, aforo por resalto. Dentro de este tipo de aforador se puede citar a la Canaleta Parshall creada en por Ralf Parshall en 1915. El canal Parshall es una estructura hidráulica que permite obtener la cantidad de caudal Q que pasa por una sección de un canal a partir de la medición del nivel de agua h que pasa por arriba de su estructura. La precisión de éste método depende de la calidad de fabricación de la estructura. En la provincia de Catamarca este tipo de estructura hidráulica es muy utilizada para medir los caudales que entran a las plantas potabilizadoras. (Figura 1.19).



Figura 1. 19: Canaleta Parshall utilizada para determinar el caudal derivado del Dique Motegasta (dpto., La Paz) a su la planta potabilizadora.

Aforo por vertederos: de los 7 diques construidos en la década del 50 en Catamarca, el dique Las Pirquitas es el que adquiere un carácter protagónico por ser el de mayor envergadura con una capacidad inicial de 75 hm^3 y encontrarse ubicado aguas arriba y a

pocos kilómetros de San Fernando del Valle de Catamarca, capital provincial y lugar donde se concentra la mayor densidad poblacional de la provincia.

La presa de embalse “Las Pirquitas” se halla ubicada sobre el Río del Valle, en el departamento Fray Mamerto Esquiú, a la altura de Km. 28 de la ruta nacional N° 62 que une la capital de la provincia con Singuil.

Esta obra cuya ejecución finalizó en el año 1961, permite la regulación de los caudales del Río del Valle, uno de los ríos más caudalosos de la provincia.

El vertedero libre adoptado de tipo CREAGER en pared gruesa, con una lámina guiada, construido en hormigón, posee 100 m de ancho y una máxima carga fijada en 3.50 m que permite evacuar un caudal máximo de 1400 m³/s (Figura 1.20)



Figura 1. 20: Vertedero del dique Las Pirquitas

El caudal erogado por vertedero y determinado mediante su ecuación de descarga es conducido a través del cauce principal atravesando zonas densamente pobladas del

departamento Valle Viejo y Capital, por lo que el conocimiento del mismo es fundamental en la prevención de eventos extremos (Figura 1.21)

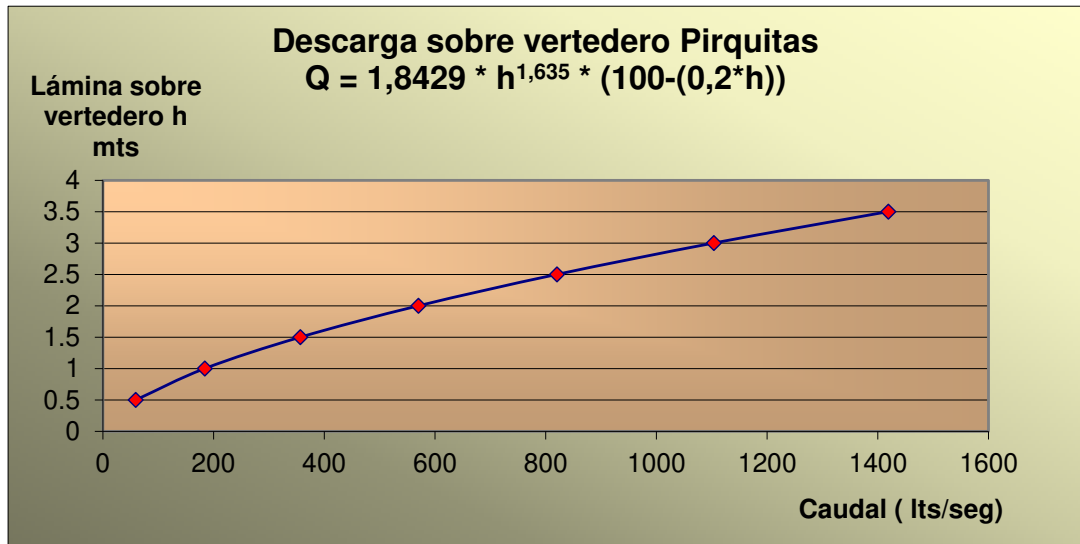


Figura 1. 21: Curva de Descarga por Vertedero – Dique Las Pirquitas

En épocas de lluvias, el personal de la Dirección Provincial de Riego lleva a cabo un plan de embalse y desembalse para maximizar la función del dique como regulador de crecidas sin descuidar la provisión diaria para agua que es derivada a la planta potabilizadora y que provee de agua potable a los departamentos Valle Viejo y Fray Mamerto Esquiú.

En el “Estudio de la línea de Riberas y Conexas en el río del Valle” presentado por el Ing. Roberto Gioria a la provincia en el año 2006 se determinan zonas susceptibles de ser inundadas por caudales pertenecientes a diferentes erogaciones del vertedero del dique las Pirquitas y sobre las cuales actualmente la Dirección de Hidrología se basa para la emisión de los certificados de no inundabilidad.

1.2.5 ULTIMOS EVENTOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA

En los últimos años, la provincia de Catamarca ha experimentado eventos hídricos de características extremas (déficit y exceso) pasando de una condición de sequía extrema como la sufrida en el año hidrológico (2012-2013) a una condición de emergencia hídrica por crecidas de características extraordinarias como la acontecida en enero del 2014 en la Villa turística de El Rodeo.

1.2.5.1 SEQUIAS

Entre el 2009 y el 2013 se produjo un cambio en el régimen de precipitaciones caracterizado principalmente por una disminución de la lámina total anual de lluvia, trayendo como consecuencia importantes bajas en los caudales de ríos y vertientes que derivaron en una disminución extrema del almacenamiento de agua de los embalses y el descenso de los niveles de agua subterránea.

Habiendo sido la cuenca del Este la más sensible a la condición de sequía, se caracterizó el evento extremo analizando los efectos derivados sobre ella.

En la figura 1.22 se observa que, a partir del año 2009 para la Localidad de El Talar, departamento Santa Rosa (cuenca del Este), se registra un descenso marcado de la precipitación total anual pasando de 1116 mm a 556 mm.

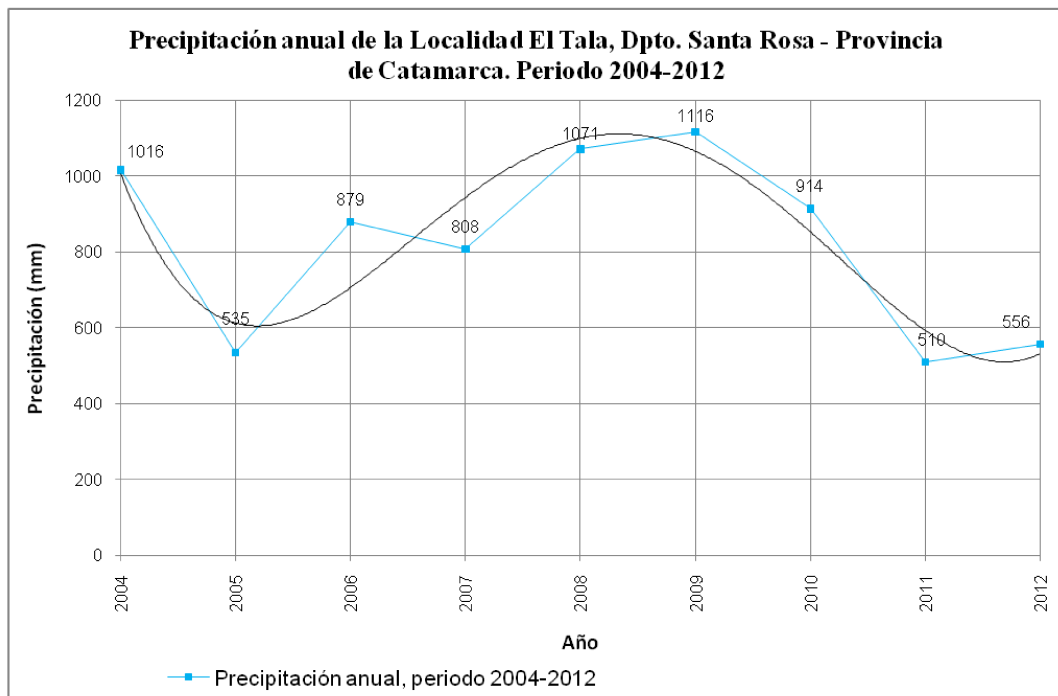


Figura 1. 22: Precipitaciones Totales Anuales El Talar (2004-2012). Fuente: DPHyERH (Catamarca)

En la localidad de Alijilán (misma cuenca y departamento), a pesar de que el descenso en las precipitaciones fue progresivo para un periodo de análisis de 13 años, en el 2012 se registró la menor lámina caída. (Figura 1.23)

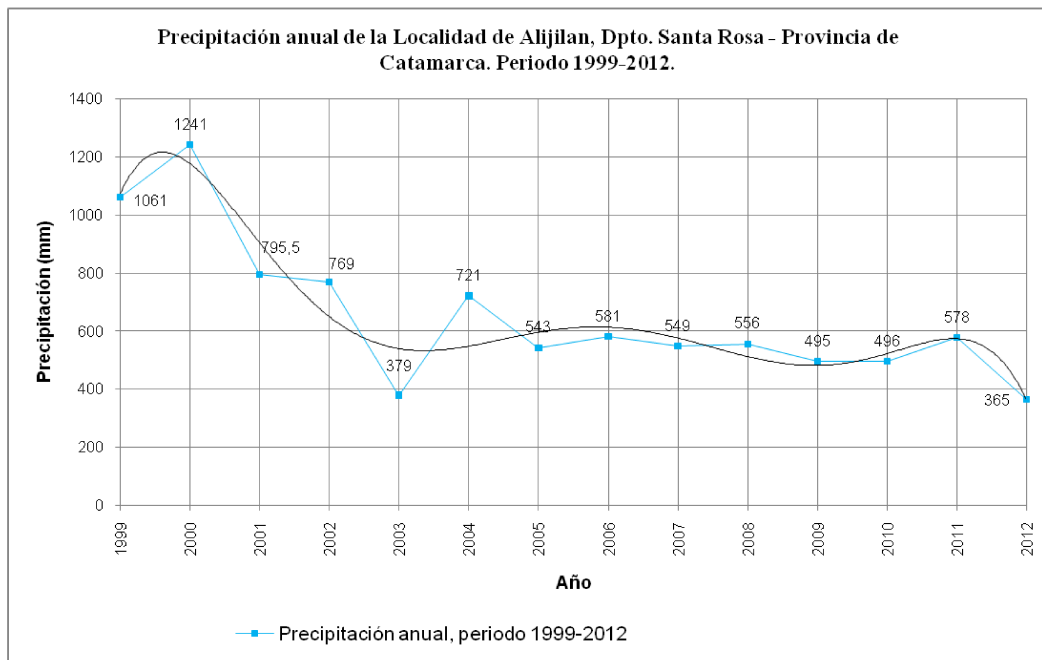


Figura 1. 23: Precipitaciones Totales Anuales Alijilán (1999–2012). Fuente: DPHyERH (Catamarca)

La Tabla 1.4 visualiza los valores máximos y mínimos aforados por el personal técnico de la Dirección de Hidrología de Catamarca en los ríos que constituyen el principal aporte a los embalses ubicados en el este provincial.

Conjuntamente a la magnitud del caudal se consignó la fecha de realización del aforo. Si bien los aforos no son sistemáticos, la base de datos proporcionada por el organismo gubernamental de incumbencia cuenta con 13 años de datos, de los cuales sólo se tomaron los valores máximos y mínimos observándose que, en el año 2013, se presentaron las condiciones más críticas, encontrándose los ríos analizados con caudales de estiajes muy pequeños y hasta nulos en algunos casos.

Río	Departamento	Dique al que Aporta	Caudales (litros/seg.)			
			Máximo	Fecha	Mínimo	Fecha
Yerba Buena	La Paz	Motegasta	573	Junio/2017	2	Febrero/2013
Las Bateas	Ancasti	Ipizca	354	Junio/2017	15	Febrero/2013
Guayamba	El Alto	Coyagasta	415	Abril/2008	5	Octubre/2013
Capellanía	Santa Rosa	La Cañada	1100	Marzo/2010	3	Octubre/2013
Sauce Mayo	Paclín	Sumampa	1018	Junio/2015	Sin Agua	Febrero/2013

Tabla 1.4: Comparación de caudales en los ríos de aporte a los embalses ubicados en el Este Catamarqueño. (Fuente DPHyERH)

La falta de precipitaciones afectó en forma directa a los ríos que aportan a los embalses, ocasionando el vaciamiento casi total de los mismos como se observa en la tabla 1.5

DIQUE	DEPARTAMENTO	CUENCA	ALTURA DE ESCALA (MTS)		VOLUMEN MÁXIMO HM ³	VOLUMEN AL 25/04/2013 (HM ³)	% DE DISPONIBILIDAD	USO ACTUAL
			FECHA					
			25/04/2012	25/04/2013				
MOTEGASTA	LA PAZ	ESTE	1.82	0.7	6.67	0.09	1.35	Agua Potable - Bebida para Animales
IPIZCA	ANCASTI	ESTE	19.36	11.3	7.9	1	12.66	Agua Potable - Bebida para Animales y Riego
COYAGASTA	EL ALTO	ESTE	SIN DATOS	18.4	8.04	0.33	4.1	Agua Potable - Bebida para Animales y Riego
LA CAÑADA	SANTA ROSA	ESTE	31.8	21.78	8.39	0.3	3.58	Agua Potable - Bebida para Animales y Riego
SUMAMPA	LIMITE DE LOS DEPARTAMENTOS SANTA ROSA Y PACLIN	ESTE	30.6	26.85	16.2	11	67.9	Agua Potable - Bebida para Animales y Riego

Tabla 1.5: Estado de los Embalses. (Fuente: DPHyERH).

La situación descrita en la tabla 1.5 se ve reflejada en las figuras 1.24, 1.25, 1.26 y 1.27 donde se evidencian el efecto de la sequía sobre los embalses, teniendo en cuenta las características constructivas de cada uno. Cabe aclarar que el análisis realizado toma en cuenta las batimetrías realizadas por Moza y Nuñez en el año 2005 para la provincia de Catamarca como el valor de la capacidad del vaso, no siendo ésta la situación original de los embalses por estar los mismos sometidos a procesos de sedimentación.

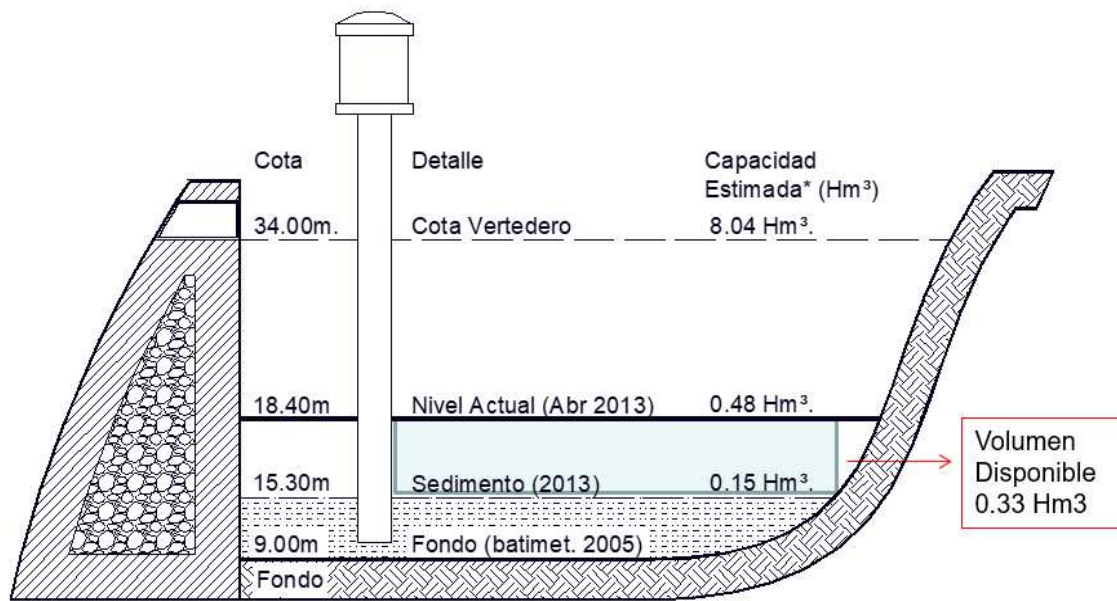


Figura 1. 24: Nivel del Dique Collagasta - Abril del 2013

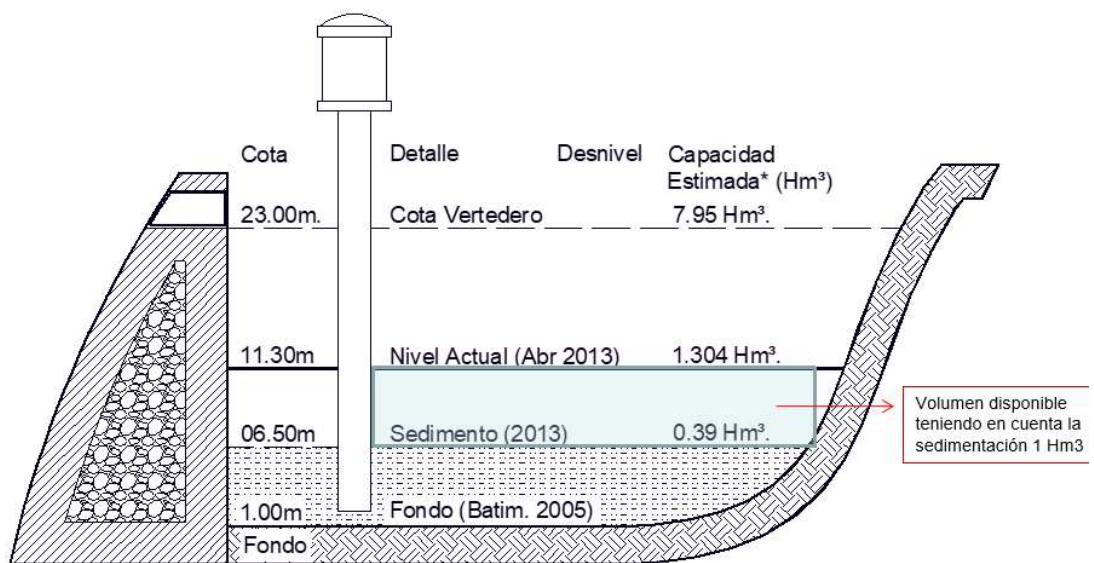


Figura 1. 25: Nivel del Dique de Ipizca - Abril del 2013

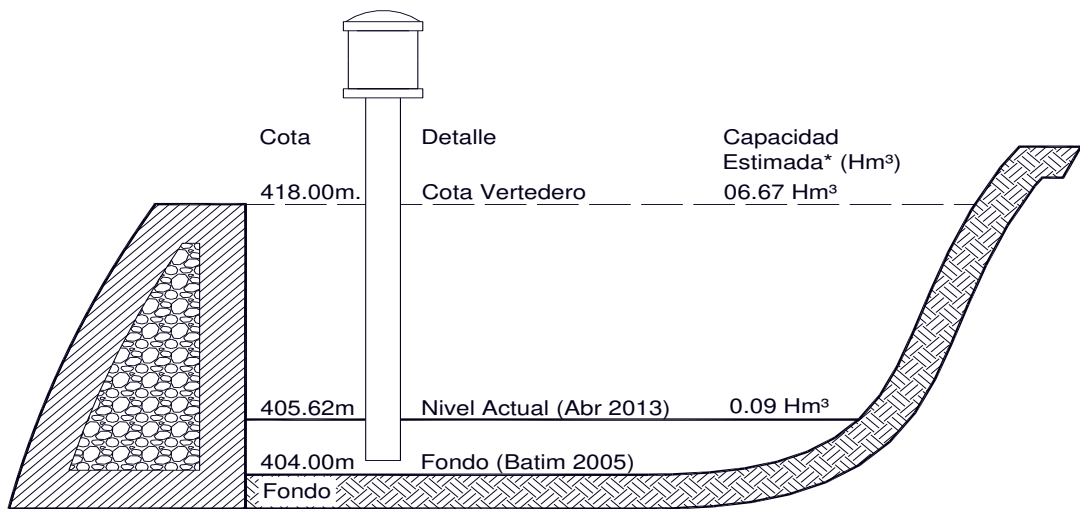


Figura 1. 26: Nivel del Dique Motegasta – Abril 2013

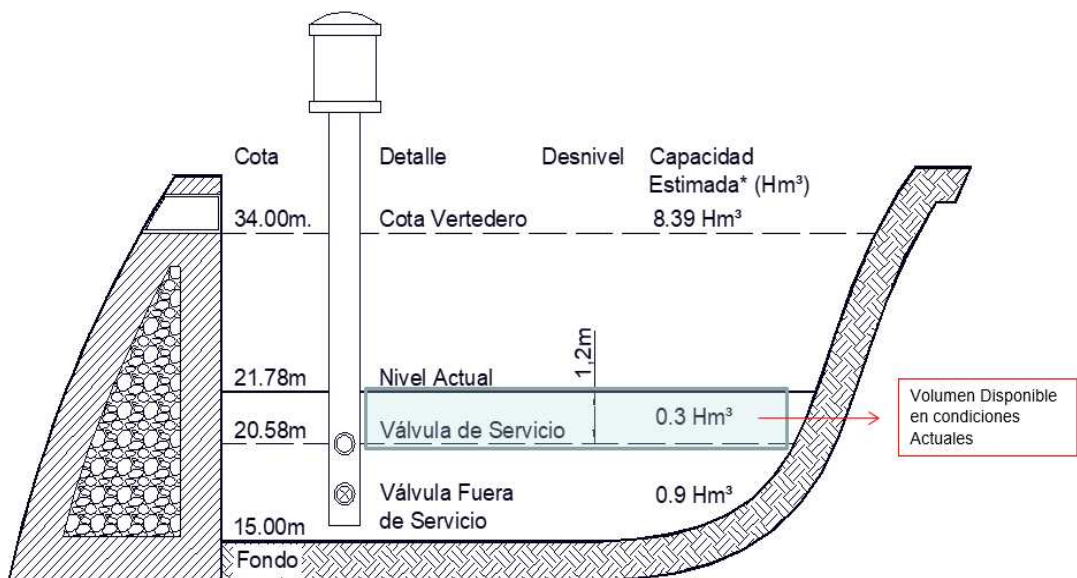


Figura 1. 27: Nivel del Dique La Cañada – Abril 2013

Además de provocar el vaciamiento casi total de los embalses, la caída en las precipitaciones tuvo como consecuencia una disminución significativa en los niveles de agua subterránea como se observa en la tabla 1.6

Punto de Agua	Dpto.	Localidad	Nivel Estático (m) Año 2012	Nivel Estático (m) Año 2013	Diferencia en metros	Nivel de Agua. Subt.
Agrocar -pozo cavado	Sta. Rosa	Bañado de Ovanta	4	5.3	1.3	Disminuye
Agrocar 1B	Sta. Rosa	Bañado de Ovanta	5	8.13	3.13	Disminuye
Agrocar Algibe	Sta. Rosa	Bañado de Ovanta	8.88	9.65	0.77	Disminuye
Pozo del Campo	Sta. Rosa	Bañado de Ovanta	56	64.83	8.83	Disminuye
Bañado de Ovanta N°2	Sta. Rosa	Bañado de Ovanta	7.3	8.15	0.85	Disminuye
Sucot N°1	Sta. Rosa	Dos pocitos	32	35	3	Disminuye
Quebracho Blanco- Molino	Sta. Rosa	Quebracho Blanco	67	68.5	1.5	Disminuye
Mistos Ancho A1	Sta. Rosa	El puesto	62.39	68.2	5.81	Disminuye

Tabla 1.6: Comparación de Niveles Estáticos - Año (2012-2013). Fuente: DPHyERH

1.2.5.2 CRECIDAS

Si bien entre los años 2009 y 2013 se presentó en la provincia de Catamarca un descenso en las precipitaciones caracterizado por un periodo de sequía que se intensificó entre los años 2012 y 2013 siendo éste último el más crítico, a partir del año 2014 y hasta el momento se observa un aumento significativo en el régimen de precipitaciones originando crecidas de carácter extraordinario. Las sucesiones de eventos de magnitudes significativas en los últimos 4 años han definido a éste período como el más crítico hasta el momento.

1.2.5.2.1 CRECIDAS SOBRE EL RÍO AMBATO (ENERO 2014)

Caracterización de la Cuenca

La cuenca hidrográfica del río Ambato, cubre un área total de 139.3 Km² hasta la localidad de la villa turística El Rodeo. Se ubica casi totalmente en el departamento Ambato, abarcando un 7.9% de su extensión y representa un 0.14% de la superficie de Catamarca.

Conforme a lo descrito en el informe final “Delimitación de áreas de Riesgo Hídricos en El Rodeo-departamento Ambato- Catamarca” (Maza *et al.* 2012), la cuenca del río Ambato limita al oeste con la Sierra de Ambato, con una cota máxima de 4575 msnm, sobre cerro El Manchao. Esta sierra que pertenece a las Sierras Pampeanas está orientada

con dirección noroeste. Al norte, el límite se ubica por la divisoria de aguas del Cerro El Alto, con alturas del orden de los 4160 msnm. Al sur la cuenca limita con la perteneciente al río El Tala y, el límite oriental es en la entrada a la localidad de El Rodeo, a cota 1394 msnm.

Su cauce principal lo conforma el Río Ambato que nace en el Cerro Manchao

La cuenca está compuesta por 4 subcuencas que desembocan en el río Ambato. En la figura 1.28 el número 301 consignado corresponde a la subcuenca del río El Alto, el 302 a la subcuenca del río Manchao, el 303 queda identificado como la subcuenca del río Pabellón y por último el 304 como la cuenca media y baja del río Ambato.

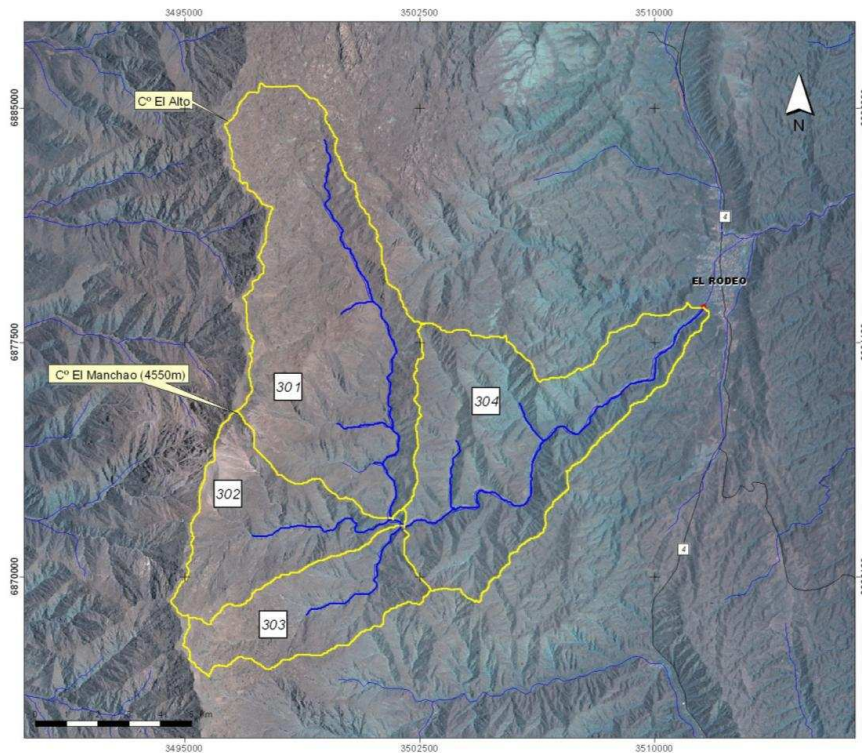


Figura 1. 28: Cuenca del río Ambato (tomada de Maza et al. 2012)

En el análisis de la distribución espacial de la pendiente, el 30% de la cuenca general posee pendientes fuertes (50 y 70 %). Esto indicaría la alta respuesta hidrológica debido a sus abruptas laderas. Sólo un 4% de la cuenca tiene pendientes menores al 10%, mientras que la mitad del área se encuentra con pendientes entre 10 y 50%. El resto supera taludes de 70% (Maza 2012) como se observa en la Tabla 1.7

Subcuenca	0-1%	1-2%	2-5%	5-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-70%	70-100%	>100%
301	0.03	0.09	0.59	2.22	7.21	8.36	8.27	7.76	13.12	7.43	0.73
302	0.00	0.01	0.07	0.24	1.07	1.85	2.96	3.43	7.14	4.03	0.53
303	0.01	0.03	0.22	0.69	2.38	2.13	2.13	2.42	5.04	2.44	0.21
304	0.01	0.02	0.21	0.83	2.70	4.11	5.28	6.83	15.19	8.83	0.46
Total:	0.06	0.14	1.09	3.98	13.36	16.45	18.63	20.43	40.49	22.73	1.93

Tabla 1.7: Área de pendientes por subcuencas (Maza et al. 2012)

Por su tamaño, corresponde a una cuenca mediana. Éste parámetro es muy importante debido a la escala determinante que tiene sobre varios fenómenos hidrológicos como ser el volumen de agua precipitada y el caudal generado.

La cuenca del Rodeo posee una baja densidad de drenaje de 0.67 km/km^2 lo que implica una baja dominancia del flujo del cauce frente al flujo en ladera y una elevada susceptibilidad a la erosión y alta torrencialidad dado por un coeficiente de torrencialidad o frecuencia de orden 1 de 0.23 (Maza et al 2012).

Caracterización del evento

El día 23 de enero de 2014 se produjo un evento de precipitación significativa en cantidad e intensidad en la cumbre del cerro Manchao, divisorias de aguas entre las laderas que enmarcan el piedemonte en el que se asienta la mayoría de las localidades del departamento Pomán y la cuenca alta del río Ambato afluente principal que abastece a la localidad turística de El Rodeo.

Se desconoce la cantidad de lluvia precipitada que dio origen al evento que desencadenó una crecida de magnitud extraordinaria sobre el río Ambato, asociada a la ocurrencia de flujos densos con importantes arrastres de detritos y clastos de tamaños de hasta 1,5 m³, ocasionando numerosas pérdidas de vidas humanas y graves daños al ambiente y a la infraestructura. Varias instituciones realizaron la caracterización del fenómeno, tratando de estimar el caudal de crecida aplicando diversas metodologías.

El colegio de geólogos de la provincia de Catamarca en el informe “*Causas del desastre (síntesis) El Rodeo, Departamento Ambato, Provincia de Catamarca*”, determina el caudal adoptando una dimensión del lecho ordinario del río de 96 m² y estimando una velocidad de flujo de aproximadamente 6 m³/seg según lo establecido por el mapa de velocidades otorgado por el Instituto Nacional del Agua a la provincia de Catamarca en el estudio “*Determinación de Áreas de Riesgo Hídrico en el Rodeo-Departamento Ambato-Catamarca*”. Con estos datos la crecida estimada para el río Ambato estuvo comprendida en un rango entre los 489 m³/seg y los 576 m³/seg valor que, según la modelación hidrológica realizada por el INA en el mismo estudio, tendría asociada una recurrencia entre 100 y 200 años. (Tabla 1.8)

		Precipitaciones con TR (años)						
		2	5	10	25	50	100	200
Precipitaciones con duración (hrs)		Caudales máximos de mrecidas (m ³ /s)						
		3	6	3	6	3	6	3
3	3	73.1	158.5	223.9	320.6	398.3	477.7	563.2
	6	71.1	153.1	224.8	319.7	398.1	480.7	566.1

Tabla 1.8: Caudales Máximos asociados a tiempos de recurrencia de entre 2 y 200 años para precipitaciones de 3 y 6 horas de duración (tomada de Maza et al.2012)

Según el informe realizado por el INCODEG (Instituto de Monitoreo y Control de la Degradación Geoambiental) en el estudio “Análisis de Base Geológico – Geomorfológico del Evento de Remoción en Maza en el río Ambato-El Rodeo-Dpto. Ambato.” (Niz, 2014), en sus conclusiones caracteriza al evento como una potenciación del fenómeno erosivo ocurrido en la cuenca alta dado por una actividad conjunta de tres subcuencas que la integran, produciendo una intensa remoción del material relleno del cauce, ayudado por un efecto cadena de lodo, clastos y bloques procedentes de la zona superior ex hondando el cauce a partir de allí en todo su recorrido. De observaciones directas en el terreno se deduce que la subcuenca del río Los Altos contribuyó con material fino y lodoso, mientras que la subcuenca del río Pabellón lo hizo con material rocoso de dimensiones de bloques y clastos, siendo la subcuenca del río Manchao la que aportó principalmente la velocidad del agua proporcionándole la capacidad necesaria para trasladar, desde la cuenca alta, un importante material de tipo rocoso y lodoso (Figura 1.29)



Figura 1. 29: Cuenca Alta del río Ambato (tomada de Niz 2014)

La crecida extraordinaria del río Ambato producida el 23 de enero del 2014 tuvo un efecto devastador en la sociedad con la pérdida de vidas humanas y cuantiosos daños a la infraestructura perdurando hasta el día de la fecha un daño psicológico en la sociedad que será muy difícil de superar.

La figura 1.30 muestra una recopilación de fotos que visualiza los daños ocasionados a la infraestructura pública y propiedades ocasionados en la villa turística producto de la crecida acontecida.



Figura 1. 30: Daños ocasionados en la localidad turística de El Rodeo por la crecida del Río Ambato

1.2.5.2.2 CRECIDAS SOBRE LOS RÍOS SAN FRANCISCO, EL ABRA Y BAÑADO DE OVANTA (AÑOS 2014 - 2015)

Durante los años 2014 y 2015, el territorio que ocupa el Departamento Santa Rosa, en el sector NE de la provincia de Catamarca, ha sido afectado por intensas y violentas precipitaciones, que provocaron importantes inundaciones, generando anegamiento de

viviendas y campos, cortes de rutas, caída de postes de tendido eléctrico y falta de suministro del servicio de agua potable, entre otros inconvenientes.

Con una superficie de 1605 km² el departamento Santa Rosa dista aproximadamente 117 km de la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca y limita al Norte con la provincia de Tucumán, al sur con el departamento El Alto, al este con la provincia de Santiago del Estero y al oeste con el departamento Paclín.

El departamento Santa Rosa pertenece a la región climática cálida tropical serrana caracterizada por la presencia de cordones montañosos de dirección Norte-Sur que interceptan las corrientes húmedas del Este, generando condensaciones y precipitaciones pluviales localizadas que llegan a superar la media anual de 900 mm (Eremchuk *et al.* 2016)

El colegio de geólogos de la provincia de Catamarca en el estudio “Delimitación de áreas inundables en la cuenca de los ríos El Abra y San Francisco”, (Eremchuk *et al.* 2016), observa que sobre el mapa de isoyetas elaborado por el Instituto Nacional del Agua en el año 2010 para el faldeo oriental de la Sierra de Ancasti, las lluvias en el Departamento Santa Rosa tienden a incrementarse desde el este hacia el oeste y de norte a sur, con valores comprendidos entre 600 a 800 mm anuales, siendo la variación de las precipitación mayor en el área serrana, con curvas que tienden a acercarse entre ellas. En tanto, hacia la zona pedemontana (Bañado de Ovanta, Lavalle, San Pedro de Guasayan) tienden a separarse evidenciando una menor variación. La zona de Bañado de Ovanta presenta un depocentro localizado de menor precipitación con valores de 550 mm

El departamento Santa Rosa posee una red hídrica con ríos que descienden por las laderas septentrionales del sistema serrano El Alto - Ancasti dirigiéndose hacia el Norte a la provincia de Tucumán.

El estudio “*Delimitación de áreas inundables en la cuenca de los ríos El Abra y San Francisco*”, realiza una descripción somera de los ríos más importantes que drenan el departamento de este a oeste la cual se transcribe a continuación:

“Río San Francisco (o río Huacra): *Nace en las Cumbres de Potrerillos (Dpto. Paclín) con una dirección de escurrimiento NNO-SSE hasta las cercanías de la localidad de La Viña, donde gira hacia el NE, hasta perderse en los llanos del S del Dpto. Graneros en la provincia de Tucumán, pasando previamente por el N de las localidades de El Tala, Los Talitas, Los Troncos y Puerta Grande (Dpto. Santa Rosa). En casi todo su curso medio e inferior es el límite entre Catamarca y Tucumán; y pertenece a la subcuenca Salí-Dulce. Antes de las inundaciones de 2014-2015, este curso de agua se infiltraba a la latitud del paraje Santa Teresa, observándose solamente una morfología fluvial relictos que ha sido desdibujada por la actividad agrícola-ganadera de la zona. Posterior a esas fechas, el río reactivó su paleocauce y se unió con el río El Abra en el sector NO del paraje La Zanja.*

Río El Abra: *Nace en Las Juntas, con el nombre de río Capellanía, en la unión de los cauces de la Quebradas de Los Rincones y la Quebrada de Los Ranchos (Dpto. El Alto), escurre en dirección aproximada S – N. Mediante un desvío de aproximadamente 3 Km, ingresa al embalse La Cañada, volviendo a su curso natural en la descarga de la presa. Drena la zona pedemontana con dirección SSO-NNE, controlado estructuralmente por el bloque de El Alto – Ancasti, tomando diversos nombres según las localidades que atraviesa*

y posteriormente se lo designa río El Abra, denominación que se ha adoptado en el presente trabajo. Hacia el N, se une con el río San Francisco, ingresando a la llanura tucumana.

El análisis foto interpretativo de fotos aéreas ha permitido identificar un antiguo cauce que nace de un brazo del río Capellanía en el punto $28^{\circ}12'56.68''S-65^{\circ}30'40.86''O$, al S de un sistema de sierras menores orientadas en dirección NNO-SSE, que se encuentran al S de la localidad de Alijilán. Drena con sentido hacia el N hasta salir del tronco montañoso, para tomar luego una dirección NE, pasando por el sector O de la localidad de Alijilán. Constituye una geoforma fluvial ocupada por vegetación abundante que ha sido desvinculada del actual sistema hidrográfico probablemente por levantamientos tectónicos. En épocas estivales suele llevar agua. Este paleocauce confluye hacia el N con el río Alijilán.

Río Alijilán o La Aguada: *Nace al SO del cuerpo granítico de Mudaderos, ubicado en la Sierra El Alto- Ancasti. Circula sobre el sistema serrano con una dirección de escurrimiento SSO-NNE. 5 Km antes de abandonar el tronco de montaña cambia su dirección hacia el NO, que mantiene hasta las proximidades del cementerio de la localidad de Alijilán donde adquiere un rumbo NNE hasta el empalme de las rutas provinciales N° 204 y 105, donde confluye con un paleocauce, que los lugareños denominan río Carpintería o río La Tusca. A partir de las inundaciones 2014-2015 se reactiva este paleocauce, hasta unirse con el río El Abra al NE del empalme de la ruta provincial N° 152 y ruta nacional N° 64. Una de las características notables del río Alijilán, es la granulometría predominantemente gruesa (bloques de más de 1 m) del material aluvional, poniendo en evidencia la gran energía de transporte de este río.*

***Río Las Tunas – Ovanta:** Nace en el Dpto. El Alto y sigue hacia el N en su recorrido por el sistema montañoso. Antes de salir al área pedemontana recibe desde el O los afluentes ríos Ojo de Agua, Culantrillo y Pacará. Luego, cambia su dirección de escurrimiento girando hacia el E en un tramo de 4 Km recibiendo las aguas de los ríos Achagaz, Piedra Pintada y Ampolla.*

En el punto 28° 9'6.08"S- 65°19'57.55"O cambia nuevamente su dirección hacia el N, pasando por el O de la localidad Bañado de Ovanta. A unos 6 Km al N de esta localidad se infiltraba en los terrenos pedemontanos, no detectándose en las fotografías aéreas del año 1968 ninguna morfología fluvial que indique dirección de escurrimiento. Luego de las inundaciones del año 2014, se esboza un cauce hacia el NO que termina de encauzarse en el año 2015, confluyendo con el río El Abra a la altura de la localidad de La Bajada.

***Río Las Cañas:** Nace al SO de la localidad homónima, sobre las estribaciones N del extremo septentrional de la sierra El Alto – Ancasti, con una dirección de escurrimiento SO-NE. Constituye una cuenca hídrica de pequeñas dimensiones. Pasando la localidad de Las Cañas, el cauce se desdibuja y se colmata con vegetación siendo difícil identificar su recorrido hacia el NE”.*

Caracterización del evento:

A partir del año 2014, el departamento Santa Rosa viene siendo afectado por las crecidas de características extraordinarias de los ríos San Francisco, El Abra y Bañado de Ovanta dejando como consecuencia desbordes, pérdidas de la producción agrícola debido a las inundaciones de cientos de hectáreas cultivadas, rutas, poblaciones, etc.

La magnitud de éste fenómeno ha excedido los límites provinciales provocando el incremento sustancial de caudal del río Marapa (provincia de Tucumán) por el aporte simultaneo de los ríos San Francisco, El Abra y Bañado de Ovanta situación que no se había presentado con anterioridad (Figura 1.31). Como consecuencia de lo expuesto, sumado a otros factores cuyo análisis excede el objetivo de éste capítulo, se produjeron graves inundaciones en la localidad de La Madrid provincia de Tucumán, por lo que se busca introducir la problemática del este de Catamarca y sur de Tucumán como tema a tratar en el comité de cuenca del Sali Dulce.

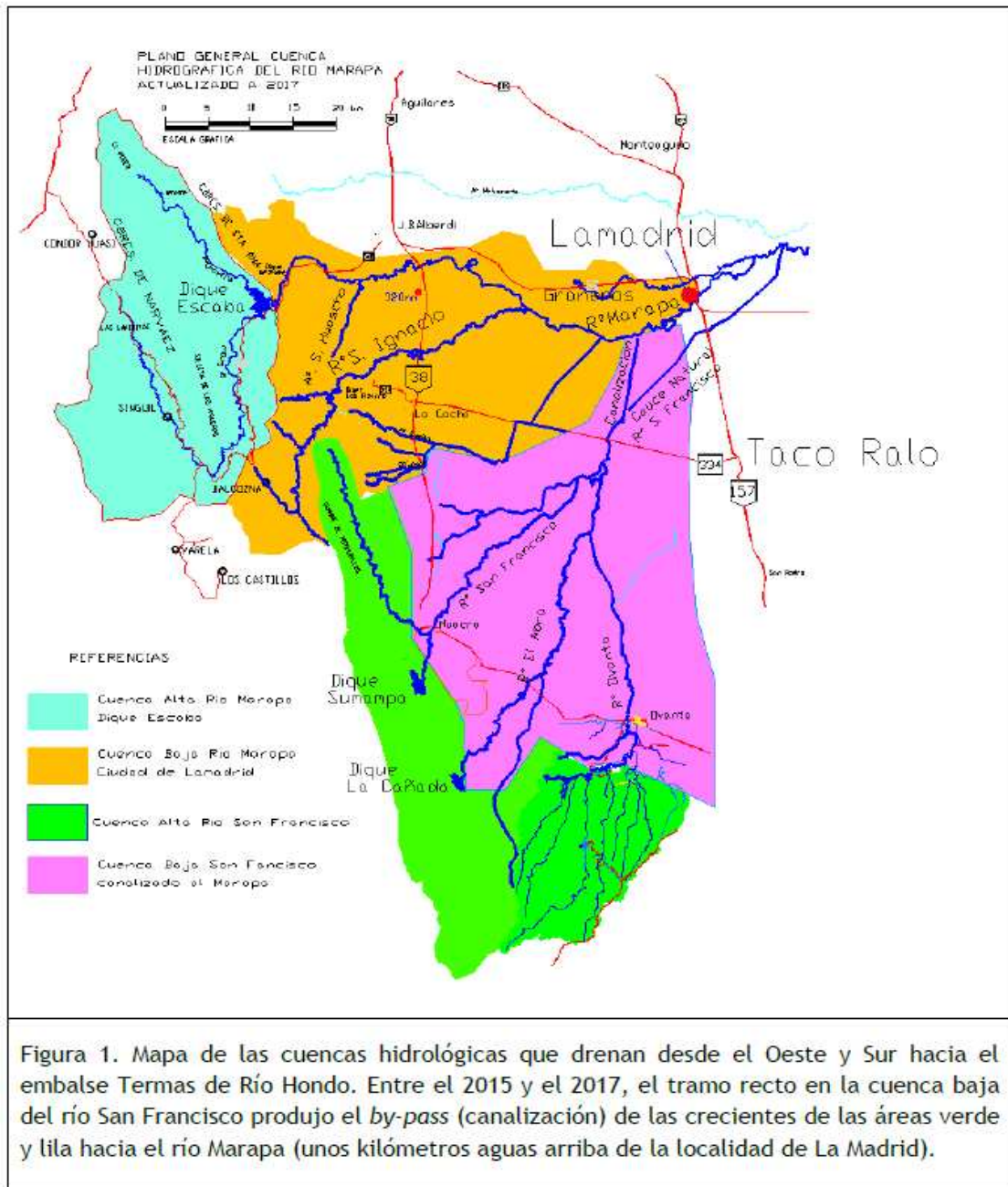


Figura 1. 31: Cuencas de Aportes al Río Marapa (tomada del documento síntesis de la Problemática del Área Sur de Tucumán, Este de Catamarca y Río Hondo)

El colegio de geólogos de la provincia de Catamarca en su informe “Delimitación de áreas inundables en la cuenca de los ríos El Abra y San Francisco”, realiza un análisis del comportamiento de las precipitaciones de los meses más lluviosos considerando los mismos en el rango de los meses comprendidos entre diciembre y abril.

La tabla 1.9 muestra la ubicación, el período y la cantidad de registros de lluvias que fueron proporcionados por la empresa privada Milkaut del Noa.

Estación	Coordenadas Gauss Krugger		Empresa	Periodo de registro	Cantidad total de registros	Cantidad de registros completos
	x	y				
San Luis	6893845	3550098	Milkaut del NOA	2002 a Mayo/2016	15	14
San Luis Sur	6892122	3550090		2002-2008	7	7
El Tala	6913926	3555145		2002 a Dic/2015	14	14
La Comarca	6896975	3552596		2002-2008	7	7

Tabla 1.9: Estaciones pluviométricas de la empresa Milkaut del Noa

En la figura 1.32 se observan las ubicaciones de las estaciones analizadas correspondientes a la tabla 1.9

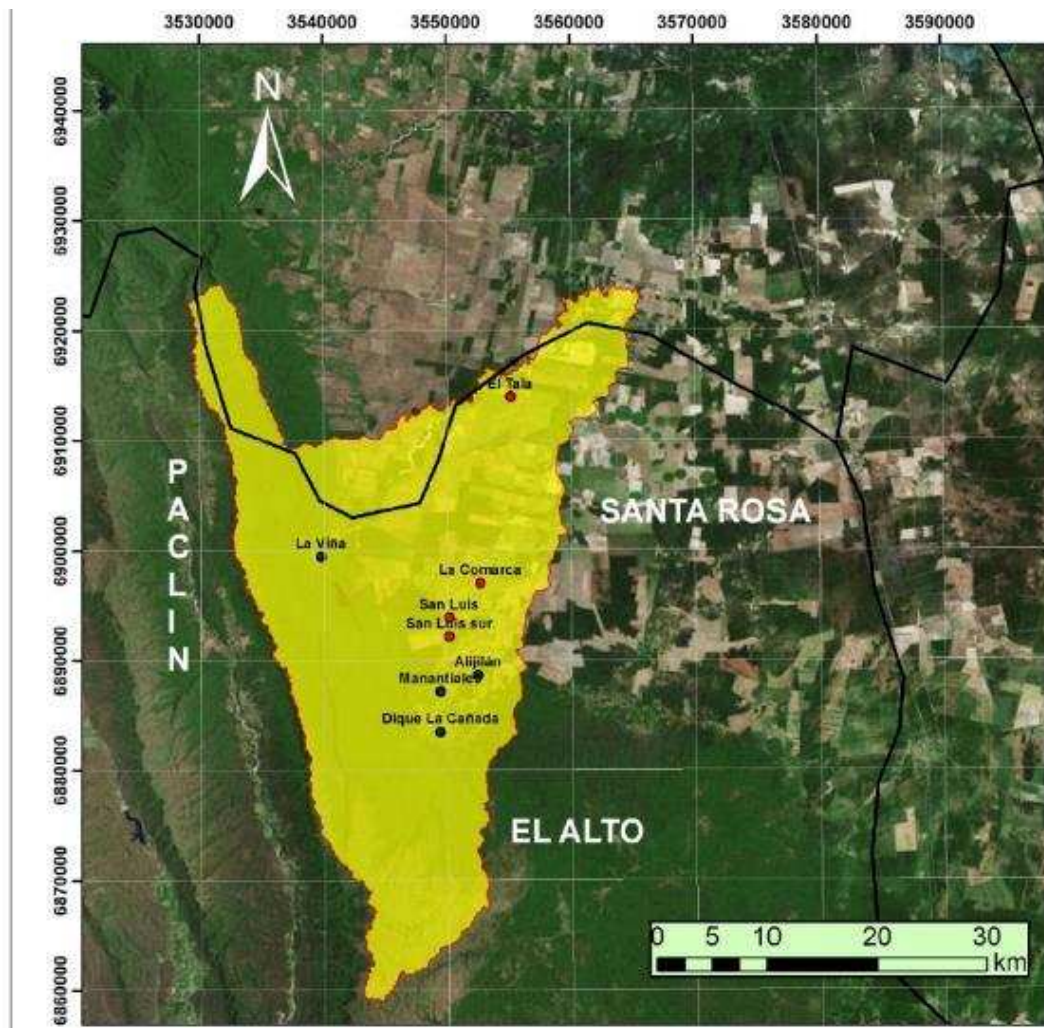


Figura 1. 32: Ubicación de estaciones pluviométricas Milkaut del Noa

En la tabla 1.10 se observa la precipitación media anual, la precipitación media mensual de las 4 estaciones consignadas en la tabla 1.8 y la cantidad de agua caída en un evento el 6 de abril del 2014 y el 2 de marzo del 2015 en la estación San Luis y El tala respectivamente.

Para la estación de San Luis la cantidad de agua precipitada en ambas fechas supera la precipitación media mensual del período más lluvioso del año, representando cada uno de los eventos ocurridos aproximadamente un 20% de la media de la precipitación total anual para un período de 13 años. Para la estación pluviométrica El Tala la cantidad de lluvia caída

el día 6 de abril del 2014 supera la precipitación media mensual registrada para el período de diciembre a abril, mientras que para la fecha 2 de marzo del 2015, el evento registrado para ese día corresponde a un 60 % de la precipitación media mensual (diciembre-abril), representando esos valores un 22% y un 10% respectivamente de la precipitación media anual registrada para un período de 13 años.

Estación	Período de Registro	Precipitación Media Anual (mm)	Precipitación Media Mensual (diciembre - abril)	Cantidad de agua caída (mm) 06/04/2014	Cantidad de agua caída (mm) 02/03/2015
San Luis	2002 - 2015	677.07	112.26	135	116
San Luis Sur	2002 - 2008	636.43	109.86	s/d	s/d
El Tala	2002 - 2015	815.32	133.53	180	80
La Comarca	2002 - 2008	615.14	104.06	s/d	s/d

Tabla 1.10: Análisis de precipitaciones estaciones Milkaut del Noa. (Fuente: Colegio de Geólogos de la provincia de Catamarca)

La tabla 1.11 muestra los resultados estadísticos realizados por el Instituto Nacional del Agua en el informe final presentado a la provincia de Catamarca “*Relevamiento de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Superficiales de la Cuenca Salar del Pipanaco-Cuenca Abaucán–Colorado–Salado y Cuencas del Faldeo Oriental del Ancasti*”, (Maza et al. 2010) para la estación pluviométrica perteneciente a la Secretaría de Recursos Hídricos ubicada en la localidad de Alijilán (ver figura 1.32). En base a la misma se calcula la precipitación media anual en 790.8 mm

ALIJILÁN												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
N° Años	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
N° Obs.	14	14	13	13	13	14	14	14	13	13	14	14
Valor Max. (mm)	296.5	233	280.5	159	57.5	42.8	27.5	16.5	78.7	92.1	181.5	340.4
Media (mm)	139.6	107.1	136.2	83.3	22.7	12.7	7.7	5.2	14.7	48	78.2	135.4
Valor Min. (mm)	65	15	62	20.5	0	0	0	0	0	3.5	2	49

Tabla 1.11: Precipitación Mensual Estación Pluviométrica Alijilán

La tabla 1.12 muestra los valores de precipitación mensual correspondiente a los meses de diciembre a abril del año 2017 (datos aportados por la Dirección de Hidrología de Catamarca).

ESTACION TERMO-PLUVIOMETRICA ALIJILÁN					
Mes	Dic. 2016	Ene. 2017	Feb. 2017	Marc. 2017	Abr. 2017
Valor (mm)	30.6	144.8	154.8	362.6	138.8

Tabla 1.12: Precipitación Mensual Estación Termo-pluviométrica Digital - Alijilán

De la comparación de ambas tablas surge que en marzo del 2017 se registró una precipitación acumulada mensual de 362.6 mm, valor que supera a la máxima precipitación mensual registrada de 340.4 mm en un período de 14 años.

Del análisis de la precipitación diaria del mes de marzo de 2017 se observa que entre los días 30 y 31 de marzo se produce una precipitación de 116.6 mm evento que comienza a las 20 hs del día 30 y se extiende hasta 22 hs del día 31 representando este valor aproximadamente el 15% de la precipitación media total anual para un período de 14 años.

El Departamento Santa Rosa demostró ser uno de los más sensibles a los eventos de características extremas ya que resultó afectado tanto en la sequía como en las inundaciones. En los años 2014, 2015 y 2017 el mismo fue protagonista de tres crecidas de magnitudes significativas. La corta sucesión entre eventos no ha permitido la recuperación de los daños, sino por el contrario, su continuidad ha favorecido el aumento del impacto negativo como ser el incremento de hectáreas inundadas, crecimiento de barrancas, etc.

El Colegio de geólogos de Catamarca en los estudios “Determinación de áreas inundables de las localidades ubicadas en la cuenca de los ríos El Abra y San Francisco del Este Catamarqueño, provincia de Catamarca” y “Determinación de áreas inundables de las

localidades ubicadas en las Cuencas de los ríos Las Cañas y las Tunas-Bañado de Ovanta del departamento Santa Rosa , provincia de Catamarca” entregado a la provincia en el 2016 realizó una cuantificación de los daños ocasionados por las crecidas de los diferentes ríos que drenan el departamento y que a continuación se describen:

Abril del 2014

Desde las 22 hs del día 6 de abril del 2014 y hasta las 7 de la mañana del siguiente día se registró en el departamento Santa Rosa un evento meteorológico de características extremas, caracterizado por intensas precipitaciones y fuertes vientos huracanados. Como consecuencia del fenómeno meteorológico, se produjo un evento extraordinario de crecidas de los ríos que drenan el territorio del departamento Santa Rosa, provocando desbordes y excedentes hídricos que provenían de los suelos cultivados, que a modo de manto invadieron caminos, rutas y poblaciones (Figuras 1.33 y 1.34). Cedieron las estructuras de algunas casas, se cayeron árboles y postes del tendido eléctrico afectando los servicios de luz y agua potable.

El río el Abra aumentó su caudal y desbordo cortando la ruta provincial N°21 e imposibilitando la comunicación entre las poblaciones de Manantiales y Los Altos.



Figura 1. 33: Excedentes hídricos de propiedades agrícolas ubicadas al Oeste de la RP N° 27 (Abril 2014)



Figura 1. 34: Rotura de la capa asfáltica producto del carcavamiento debido a la erosión retrocedente del Río El Abra (Abril 2014)

En el sector conocido como vado Los Pensamientos, la ruta provincial N° 27 cruza mediante un badén al río El Abra unos 5 Km antes de llegar a la localidad de La Bajada. La crecida del río El Abra generó la rotura de parte de la cinta asfáltica y cortó el acceso hacia las localidades ubicadas inmediatamente al norte de este cruce (Figura 1.35)



Figura 1. 35: Afectación del cruce por el vado Los Pensamientos –Río El Abra.
Abril 2014

Antes del año 2014, el río Ovanta se infiltraba a unos pocos Km al norte de la localidad de Bañado de Ovanta. En el año 2014, comienza a delinear un nuevo cauce con dirección NO, generando cárcavas que afectaron a los campos de cultivo perdiéndose gran cantidad de hectáreas productivas. En el año 2015, la acción erosiva es aún más intensa y se forma un cauce de gran amplitud y profundidad que llega a conectarse con el río El Abra, para luego hacerlo con el río San Francisco aumentando considerablemente el caudal del río Marapa en la vecina provincia de Tucumán.

Producto de la crecida del río Bañado de Ovanta, la localidad de Ovanta fue una de las más afectadas en ambas fechas. El río Ovanta, desbordó en varios puntos, a la altura de la localidad homónima (3 Km al sur del centro de Bañado de Ovanta) y se canalizó por la ruta provincial N° 30, ingresando al centro de la población e inundando el hospital, escuela y viviendas. En las figuras 1.36 y 1.37 se observa la magnitud de la crecida del río Ovanta a partir de los efectos generados.



Figura 1. 36: Cárcava generada por los desbordes del río Ovanta en La Bajada (afectación estancia La Tirolesa). Abril 2014



Figura 1. 37: Cárcava generada por el desborde del río Ovanta. Marzo 2015

Inundaciones Marzo del 2015

Un evento de similares características al ocurrido en el 2014, caracterizado como extremo, se desarrolla nuevamente en marzo del 2015, provocando nuevas inundaciones, agravando los daños anteriormente causados y produciendo nuevos en la infraestructura vial, servicios y poblaciones. (Figuras 1.38 y 1.39)



Figura 1. 38: Corte terraplén de aproximación margen izquierda río El Abra RN N° 64 Marzo 2015.



Figura 1. 39: Cárcava conformada en un camino rural (sector norte de Puerta Grande) de 500 m de longitud y 10 m de profundidad.

Inundaciones Marzo del 2017

El río Huacra o San Francisco nace en la provincia de Tucumán pasando por varios puestos tucumanos siendo Huacra el último hasta entrar a la provincia de Catamarca al Norte de la localidad de la Viña. Según los lugareños, cambia el nombre a río San Francisco agua abajo de recibir el afluente del dique Sumampa continuando con ese nombre hasta atravesar el límite provincial. En el evento extraordinario de Marzo del 2017 el Dique Sumampa ubicado a 10 km de la Viña erogó sobre cresta de vertedero 60 cm lo que implicaría un caudal aproximado de $130\text{m}^3/\text{s}$, desconociéndose el caudal transportado por el río Huacra aguas arriba de la unión. Esta crecida sobre el río San Francisco se vio potenciada por el aporte del dique la Cañada afluente del río El Abra ya que el agua no almacenada por el dique es erogada a través del vertedero y transportada por el cauce del río hasta su unión con el río San Francisco, casi en el límite provincial, el cual descargó sobre vertedero un caudal aproximado de $500\text{m}^3/\text{s}$ superando el nivel de cajero de vertedero y pasando sobre el coronamiento de la presa (Comisión de Emergencia para el tratamiento de la problemática de inundaciones en el sur de la provincia de Tucumán, Este de Catamarca y Río Hondo, 2017).

La gran cantidad de agua transportada por el río San Francisco ha provocado un aumento de la erosión originando el recrecimiento de cárcavas existentes y la formación de nuevas.

A modo de ejemplo, la tabla 1.13 muestra el recrecimiento de la cárcava activada sobre el río San Francisco en el cruce con la RP 334.

Año	ancho (m)	altura de las barrancas (m)
2005	13	1
2016	62	2.5
2017	180	6

Tabla 1.13: Recrecimientos de cárcavas activadas por la crecida del río San Francisco. Fuente: (Comisión de Emergencia para el tratamiento de la problemática de inundaciones en el sur de la provincia de Tucumán, Este de Catamarca y Río Hondo, 2017).

1.2.5.2.3 CRECIDAS SOBRE EL RÍO PACLÍN. (MARZO 2017)

Cuenca del Río Paclín:

Con una superficie de 870.4 km² (Burgos *et al*, 2015), la cuenca del río Paclín se ubica en la Provincia de Catamarca entre los 65° 35' y los 65° 45' de longitud Oeste y los 28° 10' y 28° 30' de latitud Sur, limitada al Norte por la Loma Atravesada, al Oeste por la Sierra Graciana y al Este por la Sierra de Guayamba y la Sierra del Alto o de Ancasti. (Gioria, 2006 tomada de Burgos *et al*, 2015).

El informe Estudio Hidrogeomorfológico-Cuenca del Río Paclín. (Barveito *et al*, 2017), expone que la naciente del río Paclín se conforma por dos subcuencas principales, la subcuenca del río San Antonio al oeste, que abarca una superficie de 53 km² y la subcuenca del río El Rosario de 49 km², al este. Los colectores principales de ambas corren por valles estructurales paralelos de orientación N-S por efecto de callamiento regional y confluyen en la zona de San Antonio de Paclín.

El colector principal de la primera, corre por el valle definido al oeste por la Sierra de Graciana y al este, por la Cumbrecita del Molle. El colector principal de la segunda, por el valle definido al oeste por la misma Cumbrecita del Molle y al este, por la Sa. de Guayamba prolongación norte de la sierra de Ancasti (*Figura 1.40*)

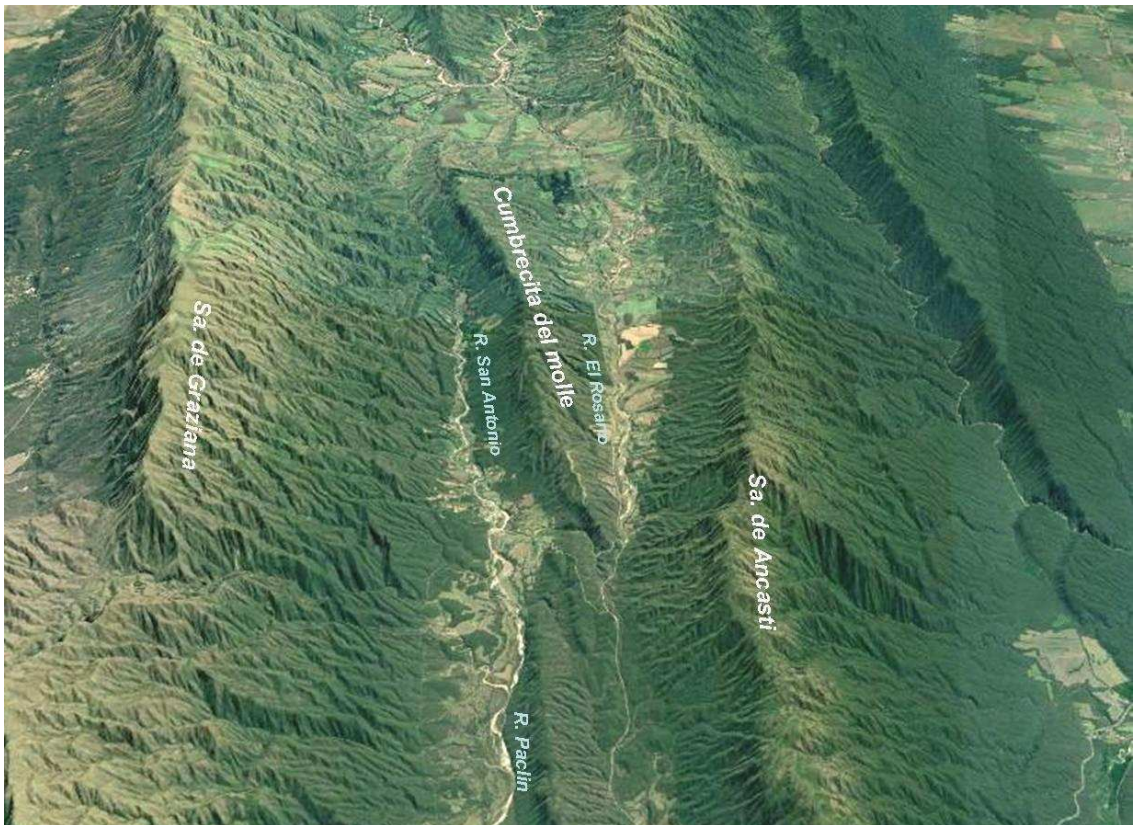


Figura 1. 40: Nacientes del sistema del río Paclín

Por su margen derecha, a la altura del pueblo de San Antonio, en Villa Collantes, le aportan con caudal permanente los arroyos Matos y Rivera nombre adquiridos por pasar por la finca de esta familia. A 200 metros al norte de la plaza de San Antonio recibe el afluente del arroyo Las Cruces que según los habitantes de la zona es peligroso por sus crecidas, pero de cauce seco durante todo el año. Ya próximo a la localidad de La Merced, por su derecha descendiendo de los cerros del Ambato, le aportan sus aguas el arroyo Lampazo y Arroyo Santa Ana siendo el mismo de régimen torrencial y por su izquierda es afluente el río Talahuada. El río corre de norte a sur franqueado por terreno montañoso hasta la localidad de Santa Cruz en el departamento Valle Viejo donde desvía su curso seco hacia el sudoeste para desembocar en el Río del Valle.

La cuenca del río Paclín (Figura 1.41) puede sub-dividirse en las siguientes cuencas menores

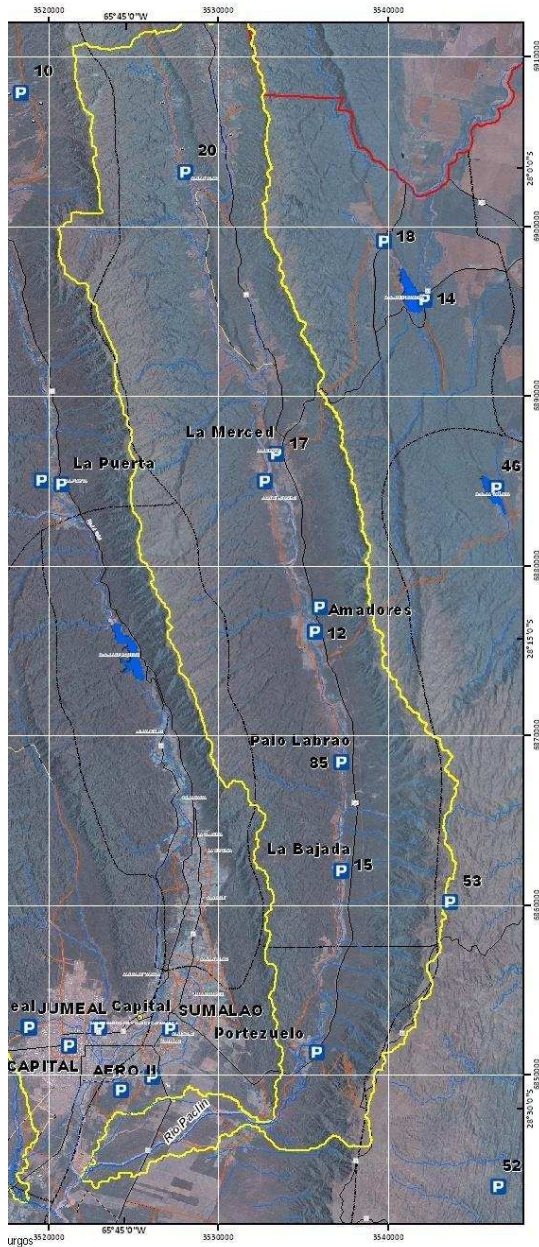


Figura 1. 41: Cuenca del río Paclín

Cuenca Alta del Paclín: Desde la

Loma Atravesada hasta San Antonio de Paclín, con unos 11 Km de longitud, se encuentra esta zona, que es más elevada y rica en lluvias.

Cuenca Media del Paclín: Se extiende

entre San Antonio y la naciente del río Santa Ana, en las cercanías de la población de La Merced y tiene unos 13 km de longitud. Aunque esta tiene menor pluviometría que la cuenca alta, por su amplitud y morfología se le atribuye los volúmenes más constantes del río Paclín. En esta zona El río Paclín, se caracteriza por las altas barrancas que bordean su lecho, cortando el mismo río los depósitos loéssicos terciarios que cubren el pie de las laderas de las sierras en ambas márgenes.

Cuenca Inferior del Paclín: Se extiende desde la confluencia del arroyo Santa Ana

con el río Paclín hasta la localidad de Santa Cruz (departamento Valle Viejo).

Zona de Bañados: Aguas abajo de la estrechura de Santa Cruz, el río bordea el extremo Sur de la Sierra Graciana y se extiende en bañados que llegan hasta Sumalao localidad cercana a la ciudad capital. De estos bañados nacen brazos de curso variable, que envían las crecientes al Río del Valle.

Evento Extremo sobre el río Paclín (marzo del 2017):

Entre la noche del 28 de marzo del 2017 y las primeras horas del día siguiente, se produjo una intensa precipitación originada al Norte de la Localidad de San Antonio de Paclín (Cuenca Alta del Río Paclín) en concordancia con un evento meteorológico de características extremas.

Con el objetivo de caracterizar la magnitud del evento extremo se realizó una comparación de 10 tormentas máximas. En la Tabla 1.14 se visualiza, para algunas estaciones ubicadas en la cuenca del Río Paclín (Las Lajas, La Higuera, San Antonio y Balcozna), la cantidad de lluvia precipitada en milímetros y la fecha de ocurrencia. En la misma se observa que para un registro de 26 años (período 1973-1999) el máximo evento se dio en la estación San Antonio donde precipitaron 215 mm el día 20 de febrero de 1977.

LAS LAJAS	LA HIGUERA	SAN ANTONIO	BALCOSNA
174	106	215	128
01/02/1973	27/01/1975	20/02/1977	20/01/1988
270.3	115		145
01/03/1973	16/11/1985		01/12/1999
162	176		
18/10/1987	21/02/1988		
143			
25/12/1996			

Tabla 1.14: : Precipitaciones Diarias Máximas –Cuenca del Río Paclín. (Gioria, 2006)

En la noche del 28 y la madrugada del día 29 de marzo del 2017 se registró una precipitación en la estación pluviométrica San Antonio de 300 (mm) superando ampliamente a la máxima precipitación diaria ocurrida y de la cual se tiene registro. Entre el año 1999 y el 2017 no se registraron tormentas superiores a 215 (mm). Del análisis de ambos eventos se concluye que la precipitación caída en marzo del 2017 supera un 40% al máximo evento registrado para un período de análisis de 45 años (1973-2017). (Tabla 1.15)

Año	Mes	Día	Precipitación Diaria (mm)	Diferencia Porcentual (%)
1977	Febr.	20	215	39.53
2017	Marz.	29	300	

Tabla 1.15: Diferencia porcentual entre eventos máximos registrados

La cantidad de agua precipitada en el evento del 28 y 29 de marzo que originó la peor crecida registrada en función de los daños ocasionados fue equivalente a un 40 % de la Precipitación Media Total Anual, estimada para el departamento Paclín en 767 mm (Lobo *et al*, 2007). Debido a la imposibilidad de poder medir el caudal de crecida originado por una precipitación de 300 mm en aproximadamente 6 horas de duración, se estimó el mismo usando como base el estudio “Delimitación de áreas de Riesgo Hídrico ocasionadas por crecidas de los ríos El Tala y Paclín- Catamarca” (Burgos *et al*, 2015) realizado por el INA (Instituto Nacional del Agua).

Para la modelación hidrológica se confeccionó la tormenta de proyecto utilizando el decaimiento espacial medio de las tormentas analizadas, se construyó una isohieta de patrón tipo elíptica donde la posición de la tormenta patrón se ubicó en 4 núcleos distribuidos uno en la parte superior, uno en la parte media y dos en la zona baja de la cuenca.

La tabla 1.16 muestra las láminas totales de precipitación por núcleo de tormentas para tiempo de recurrencias (TR) entre 2 y 200 años.

Posición Núcleo Tormenta de Proyecto	Láminas Totales de Precipitación en el núcleo (mm)						
	TR = 2 años	TR = 5 años	TR = 10 años	TR = 20 años	TR = 50 años	TR = 100 años	TR = 200 años
I	57.3	77.4	90.6	103.2	119.7	132.0	144.3
II	44.1	59.4	69.6	79.5	92.1	101.7	111.3
III	46.8	63.3	74.1	84.6	98.1	108.0	118.2
IV	44.4	60.0	70.2	80.1	92.7	102.3	111.9

Tabla 1.16: Láminas Totales de Precipitación para cada Núcleo – Cuenca del río Paclín

Como se puede observar la máxima lámina total calculada para una recurrencia de 200 años es de 144.3 mm (Núcleo I). La cantidad de lámina de agua caída en el evento caracterizado fue de 300 mm, valor significativamente mayor al calculado por técnicas estadísticas.

La tabla 1.17 contiene los resultados de la modelación hidrológica realizada tomando como base a los datos de la tabla 1.16 para el cálculo de la precipitación efectiva que es la que realmente tiene efecto directo en la magnitud del caudal. En la misma se observa que el caudal máximo asociado a una recurrencia de 200 años para la posición más crítica de la tormenta es de 790.1 m³/seg

Precipitaciones con TR (años)						
2	5	10	20	50	100	200
Caudales máximos de Crecidas (m ³ /s)						
99.3	214.8	307.7	409.1	552.8	666.4	790.1

Tabla 1.17: Caudales Máximos de Crecidas para la posición de tormenta más crítica – Cuenca del Río Paclín.

Ahora, es válido suponer que si la lámina de lluvia caída en el evento extremo de marzo del 2017 es significativamente superior a la lámina total de precipitación calculada para una recurrencia de 200 años y sobre la cual mediante modelación hidrológica se determinó el caudal asociado a esa recurrencia, el caudal de crecida del río Paclín para el evento analizado sería superior por lo que se estima que la crecida del 29 de Marzo del 2017 fue superior a $790 \text{ m}^3/\text{seg}$, el cual se encuentra asociado a una recurrencia superior a 200 años.

Daños Causados:

Producto del evento extremo la creciente extraordinaria sobre el río Paclín generó daños estructurales en badenes, puentes, pasarelas y vías de comunicación que dejaron a varias localidades aisladas (Figura 1.42).



Figura 1. 42: Rompimiento de los terraplenes de acceso - puente RN

La crecida extrema del Río Paclín provocó la ruptura en varios tramos del terraplén construido para desviar su traza original permitiendo al río retomar su antigua traza inundando diferentes barrios de los departamentos Valle Viejo y sur de Capital (Figuras 1.43 y 1.44).



Figura 1. 43: Ruptura por socavación del terraplén de desvío del cauce del río Paclín



Figura 1. 44: Escurrimiento superficial del río Paclín por camino vecinal (cauce activo del río antes de la construcción del terraplén)

1.3 MOTIVACION TECNOLOGICA

Hace un par de años la provincia viene siendo castigada por precipitaciones de magnitudes e intensidades atípicas generando crecidas de carácter extremos en los distintos cursos fluviales. Desafortunadamente, no se cuenta hasta el momento con metodologías no intrusivas para medición de caudales que puedan ser operadas en forma remota asegurando de ésta manera la seguridad del operador y del equipo. Los velocímetros mecánicos como los molinetes, son la instrumentación típica utilizada en condiciones de aguas medias y baja, estimando muchas veces el dato de los máximos hidrológicos (caudales de crecidas) mediante el uso de métodos empíricos y poco confiables.

Ante la ausencia de mediciones durante los eventos extremos máximos mencionados, los caudales picos escurridos durante estos eventos son estimados extrapolando las curvas H-Q (Altura – Caudal) calibradas para caudales significativamente menores, generando incertidumbres importantes en el rango no medido como se muestra en la figura 1.45

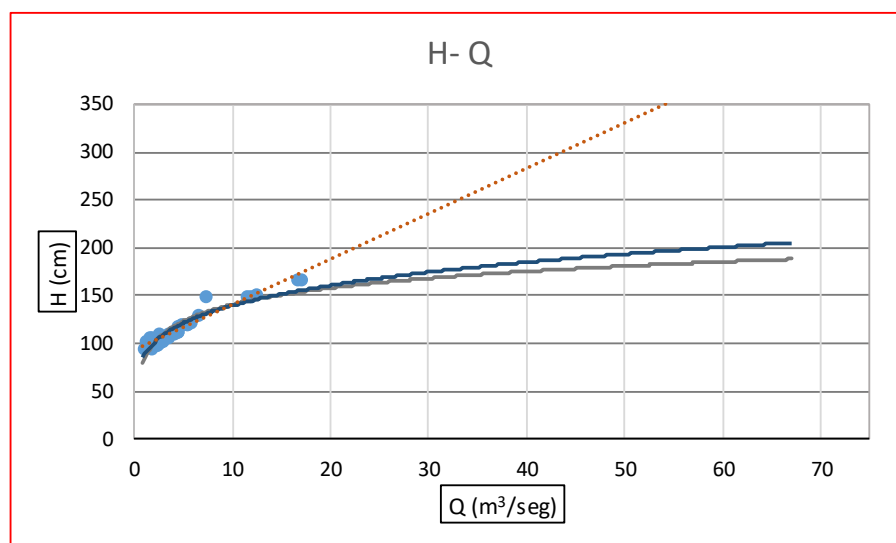


Figura 1. 45: Ejemplo de extrapolación curva H-Q medida por la empresa EVARSA sobre el Río del Valle en la localidad de Huaycama provincia de Catamarca

Al igual que las crecidas, los estiajes son eventos extremos y no menos importantes que los anteriores cuando se trata de realizar una gestión eficiente del recurso hídrico en caso de escasez. En éste sentido los instrumentos intrusivos como los molinetes no son óptimos para medir pequeñas láminas de agua y muy bajas velocidades de flujo, por lo que los extremos mínimos también se obtienen extrapolando hacia abajo las curvas H-Q (altura – caudal) calibradas con caudales mayores.

La falta de registros continuos de precipitaciones y la imposibilidad de cuantificar caudales de crecidas ha sido destacada por instituciones de alto prestigio en los informes presentados producto de los trabajos realizados para la provincia y que a continuación se citan:

Convenio Instituto Nacional del Agua (INA) – Provincia de Catamarca “Determinación de Áreas de Riesgo Hídrico en el Rodeo-Departamento Ambato-Catamarca”. Informe Final (pág. 70, justificación de caudales).

“Debido a la incertidumbre generada por la falta de información que permitiría calibrar el modelo hidrológico para obtener caudales por crecidas pluviales y, con el objetivo de validar el rango de tales caudales, se recurrió a determinar qué valores de caudales producirían el arrastre del material granular de importantes tamaños que se pueden observar en el cauce”

Convenio (INA) – Provincia de Catamarca “Delimitación de Áreas de Riesgo Hídrico Ocasionada por la Crecida de los ríos El Tala y Paclín”. Informe Final (pág. 182, Conclusiones y Recomendaciones).

“Se puede concluir que al modelo HEC-RAS, homologado en varios países y ampliamente utilizado, y a pesar de no haber sido calibrado debido a la falta de aforos o existencia de

marcas de agua de crecidas, se le pudieron acotar sus incertidumbres vinculadas al coeficiente de Manning y al modelo geométrico.”

En base a todo lo expuesto se destaca la necesidad, que se convierte en la motivación tecnológica de esta tesis, de contar con una técnica moderna, no intrusiva que permita la cuantificación del caudal en cursos fluviales durante eventos de características extremas (crecida, estiaje) reduciendo las incertidumbres derivadas de otros métodos y aumentando la precisión en las mediciones.

1.4 TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES

1.4.1 INTRODUCCIÓN

La técnica PIV (Particle Image Velocimetry en inglés o Velocimetría por Imágenes de Partículas en castellano), posee un principio simple de funcionamiento que consiste en reconocer y cuantificar el desplazamiento de un trazador en un flujo, siendo éste mismo principio, el que dio también origen a la técnica PTV Particle Tracking Velocimetry bien conocida en castellano como Velocimetría por Seguimiento de Partículas.

Ambas técnicas son no intrusivas, por lo que permiten realizar mediciones sin perturbar el flujo calculando en su concepción moderna la velocidad del flujo en forma simultánea en una gran cantidad de puntos. A pesar de compartir el mismo principio, las técnicas procesan las imágenes de formas distintas ya que en la técnica PIV la velocidad estimada en un punto no corresponde a la partícula dada como en la técnica PTV, sino que la misma es una medida estadística en esa región del fluido.

El material necesario para la implementación de ambas técnicas en laboratorio está dado por una cámara digital, un trazador, un dispositivo de emisión láser de alta potencia y una lente semi-cilíndrica.

El haz producido por el dispositivo laser pasa a través de la lente semicilíndrica que lo transforma en un plano que ilumina la zona de medición sirviendo de iluminación a la cámara digital que captura la reflexión del láser sobre los trazadores dentro del plano iluminado del flujo. (Figura 1.46). Esta configuración clásica no puede ser aplicada en campo para cuantificar caudales en sistemas fluviales durante condiciones hidrológicas extremas.

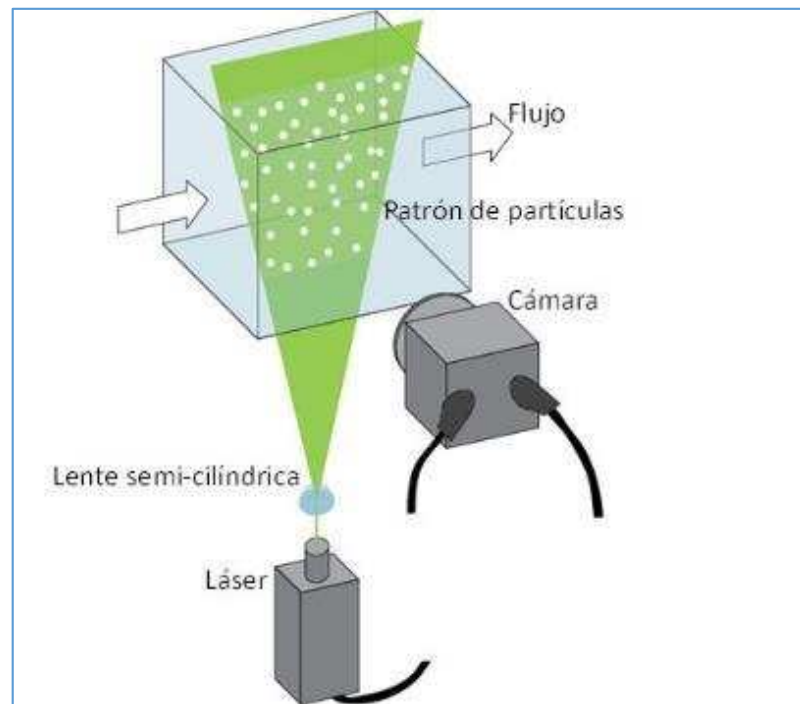


Figura 1. 46: Principio de funcionamiento de PIV en su forma clásica tomada de Patalano 2017

Los Factores condicionantes para la implementación de ambas técnicas son:

Densidad de las partículas y tamaño de las partículas: Si se quiere lograr una distribución uniforme de las partículas en profundidad para medir velocidades en un plano que abarque toda la columna de agua, las mismas deben tener una densidad similar a la del agua. Ahora si solo se quiere es medir velocidad superficial, la densidad de las partículas trazadoras deberá ser cercana pero menor a la del fluido. Para poder captar bien la partícula es recomendable que el tamaño de la misma sea entre tres y cuatro pixeles de la imagen

Resolución de las Imágenes: Si las partículas son demasiado pequeñas se requerirá de una cámara de alta resolución para poder captarlas lo que implicará una mayor capacidad de almacenamiento y un incremento en el tiempo de procesamiento.

Intervalo de tiempo entre cada par de imágenes: dependerá de la velocidad del flujo, ya que si la velocidad es alta y el intervalo entre imágenes es grande no será posible

determinar el campo de velocidad debido a que no habrá partículas en común entre dos imágenes consecutivas.

1.4.2 ESTADO DEL ARTE

1.4.2.1 VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS (PIV)

Con ésta técnica se obtiene una estimación de dos de las tres componentes del campo instantáneo de velocidades con alta resolución espacial en una región del fluido que debe presentar niveles de iluminación superiores al resto del fluido lo que se logra con la utilización del láser según lo descrito anteriormente y, contar con dos imágenes sucesivas de partículas trazadoras. Ahora, si se conoce el tiempo transcurrido entre imágenes y la medida de desplazamiento entre partículas por algún método de interrogación se puede calcular la velocidad instantánea. Si bien ésta técnica se basa en el procesamiento de las imágenes para obtener el campo de velocidades de un fluido es importante incluir dos etapas adicionales: el pre-procesamiento que mejora las imágenes de entrada y el post-procesamiento que corrige los vectores resultantes. (Figura 1.47)

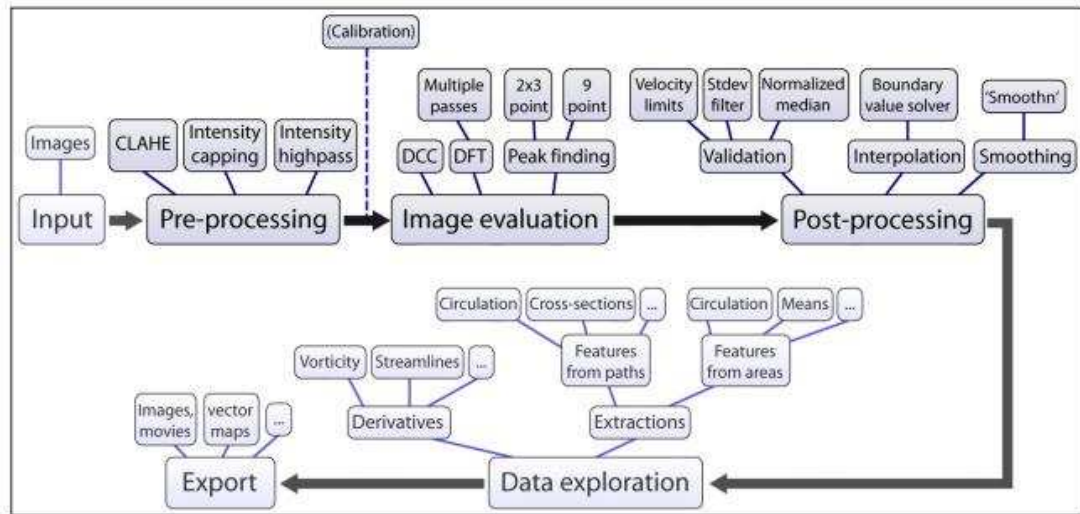


Figura 1. 47: Etapas de implementación de la técnica (tomada de Thielicke et al. 2014)

Debido a la forma irregular y a la intensidad de iluminación no uniforme de las partículas, entre otros factores que incorporan ruido al plano de correlación en el momento de determinar el desplazamiento de las partículas, es necesario introducir una etapa de pre-procesamiento cuyo objetivo es disminuir las estimaciones erróneas de velocidades aumentando la calidad de las medidas aplicando técnicas sobre la imágenes para lograr que el contraste y la intensidad del brillo de las partículas tengan un nivel similar a modo que cada una de ellas pueda contribuir en la misma proporción a la función de correlación.

Lo expuesto se obtiene mediante el uso de filtros como la técnica del CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) que opera en regiones pequeñas de una imagen, donde las intensidades más frecuentes del histograma se extienden a toda la gama de datos (de 0 a 255 en una imagen a escala de grises de 8-bit). (Pizer *et al.*, 1987), optimizando de esta manera las regiones de baja y alta exposición en forma independiente.

Otro de los filtros comúnmente utilizados en el caso de una iluminación no homogénea es el filtro de paso- alto de intensidades (High-Pass).

La iluminación no uniforme puede causar la refracción de la luz sobre el fondo generando información de baja frecuencia que puede ser eliminada mediante la utilización de este filtro ya que la misma conserva la mayor parte de la información de alta frecuencia correspondiente a la iluminación de las partículas trazadoras suprimiendo cualquier información de baja frecuencia en las mismas. (Figura 1.48)

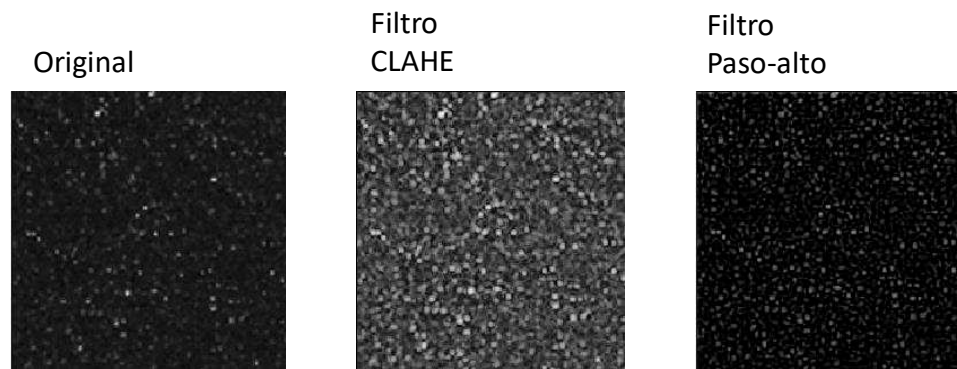


Figura 1. 48: efecto de diferentes filtros de pre-procesamiento sobre una imagen de trazadores utilizados en laboratorio (tomada de Patalano 2017)

La segunda etapa en el análisis de PIV es la evaluación de las imágenes mediante la implementación de un algún método de interrogación, siendo ésta la parte más sensible en la aplicación de la técnica. A diferencia de PTV esta técnica no busca la pareja de cada partícula individual, sino que determina el desplazamiento medio de grupos de partículas. El método consiste en extraer sub-regiones (ventanas de interrogación) de un par de imágenes y aplicar una correlación cruzada entre ellas para derivar el desplazamiento de partículas más probable en las ventanas de interrogación (Patalano 2017), encontrando un patrón de partículas que se encuentran dentro de una ventana A a dentro de una ventana B aplicando la técnica estadística de correlación cruzada como se observa en la figura 1.49

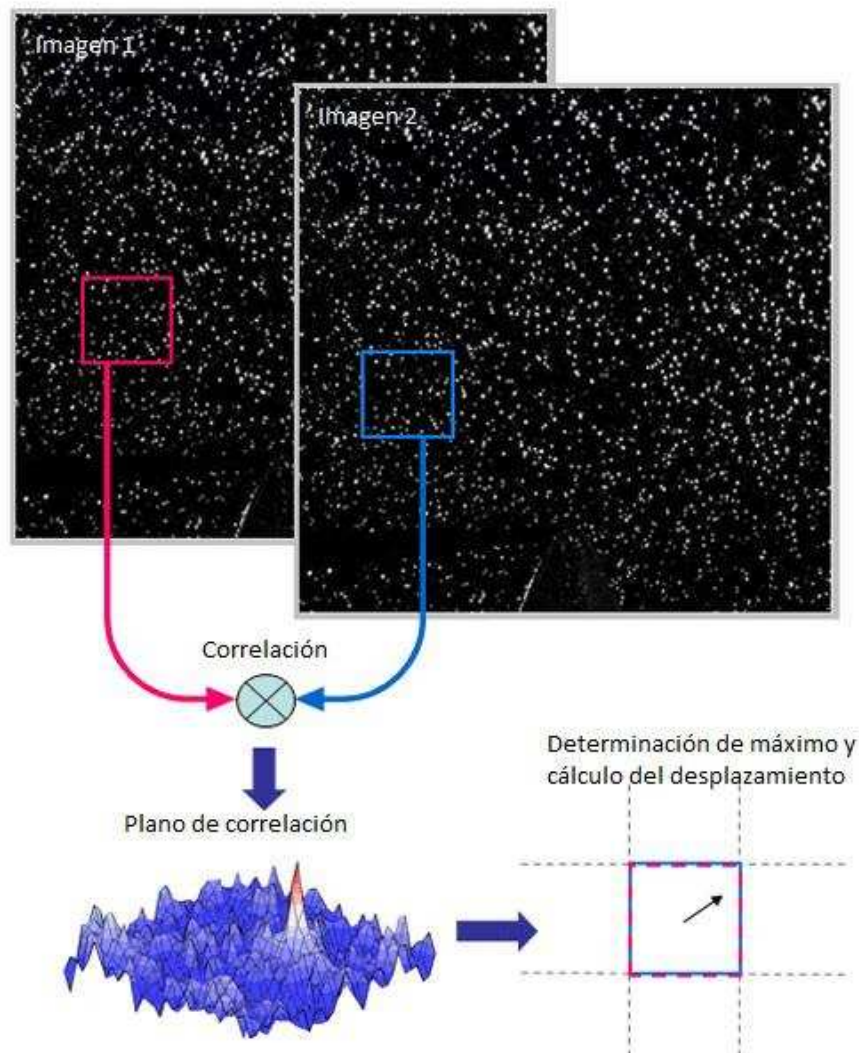


Figura 1. 49: Cálculo del desplazamiento a partir de la correlación de una ventana de interrogación (tomada de Barja 2015)

Esta técnica estadística se realiza con la función de correlación cruzada discreta (Huang et al., 1997):

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j A(i, j)B(i - m, j - n) \quad (1.1)$$

Donde: A y B son las ventanas de interrogación de la imagen A e imagen B respectivamente.

C es la matriz de correlación resultante.

La ubicación del pico de intensidad en la matriz de correlación resultante C dará el desplazamiento más probable de las partículas de A a B , calculándose el vector desplazamiento a partir de la distancia entre el centro de la función de correlación y el pico de intensidad (barja 2015)

La fórmula de correlación cruzada (1.1) puede resolverse calculando la matriz en el dominio espacial empleando el método de “Correlación Cruzada Directa” (DCC, p.ej. Okamoto et al. 2000)

El procedimiento consiste en desplazar la ventana de interrogación de una imagen para un tiempo $t = t_0$ sobre la ventana de interrogación de una imagen para un tiempo $t = t_0 + \Delta t$ y sumar la cantidad de pixeles solapados entre ventanas para ese desplazamiento.

En la figura 1.50 se observa un ejemplo del proceso de correlación cruzada para un tamaño de ventana de interrogación de 4×4 pixeles. En (a) se muestra el solapamiento de un solo pixel producto del desplazamiento en $(x,y) = (-3,3)$ de la ventana de interrogación. En (b) se pueda observar que el solapamiento es total como resultado de un desplazamiento nulo. Los resultados obtenidos a partir de la suma de los productos de los pixeles solapados se almacenan en una matriz de correlación en las coordenadas que están dadas por el desplazamiento de la segunda imagen sobre la primera.

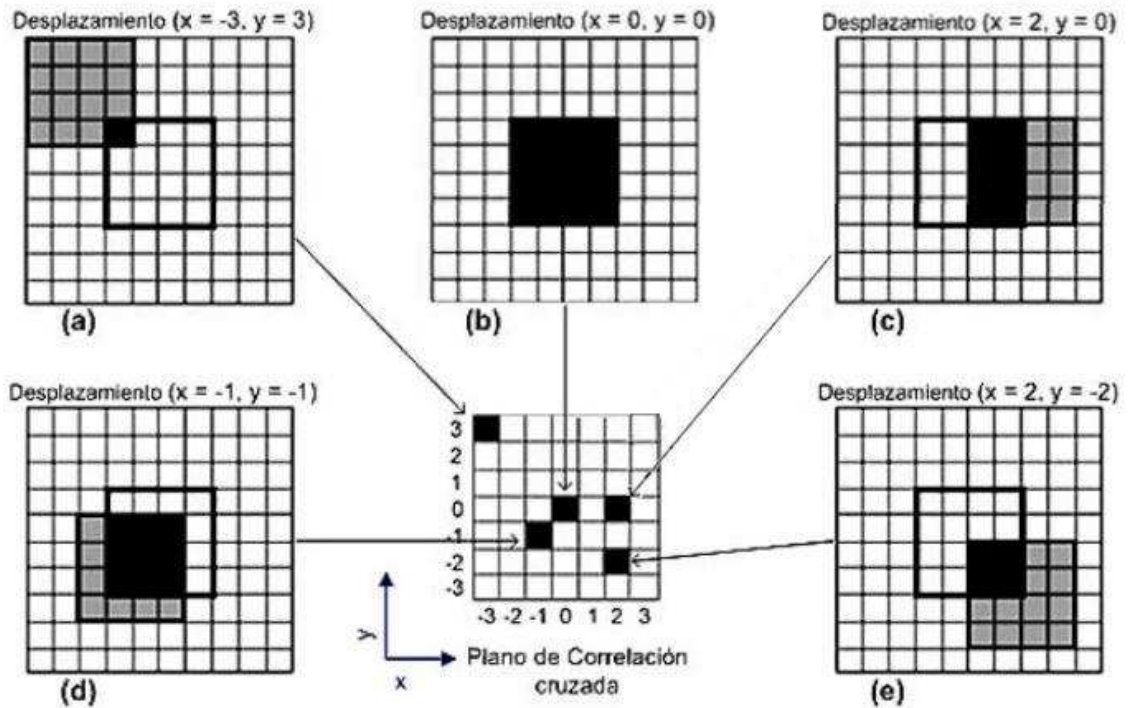


Figura 1. 50: Correlación Cruzada para un tamaño de ventana de 4X4 (tomada de Barja 2015)

Cada uno de esos máximos obtenidos en la matriz de correlación cruzada corresponden a los solapamientos de mayor similitud de una imagen a la otra donde el máximo absoluto responde al desplazamiento promedio de las partículas en esa ventana de interrogación.

La DCC calcula la matriz de correlación en el dominio espacial. Las ventanas de interrogación A y B pueden ser de dos tamaños diferentes. Cuando B se elige dos veces mayor que A, un desplazamiento de partícula de hasta la mitad del tamaño de A no dará lugar a ninguna pérdida de información y proporcionará una matriz de correlación confiable con bajo nivel de ruido de fondo (Patalano 2017). Debido a que las partículas se encuentran en imágenes separadas, con la correlación cruzada se obtiene un pico máximo, que duplica la señal respecto de los picos obtenidos a través de la autocorrelación por lo que el costo computacional que se requiere es muy elevado cuando se trata de imágenes de alta

resolución. Para reducir el mismo, en los últimos años se ha utilizado el concepto de correlación cruzada basada en la transformada rápida de Fourier (FFT). En la figura 1.51 se observa el diagrama de proceso de esta metodología que consiste en llevar las imágenes $I_1(x,y)$ e $I_2(x,y)$ al dominio de la frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT), posteriormente las representaciones en el dominio de la frecuencia de la imagen 1 ($I_1(p,q)$) y el complejo conjugado de la imagen 2 ($I_2(p,q)^*$), se multiplican para encontrar el plano de correlación de las distintas regiones de interrogación. Después se le aplica un ventaneo W , cuya finalidad es minimizar los efectos de la FFT en cuanto a las discontinuidades artificiales que se generan, para esto multiplica la señal por una ventana de longitud finita con una amplitud que varía poco a poco hacia cero en los extremos, tal que se obtenga una señal continua, sin transiciones bruscas. Finalmente se regresa al dominio del tiempo mediante la implementación de la transformada inversa de Fourier (FFT^{-1}) para extraer la ubicación del máximo pico de correlación detectado (Henaó 2017)

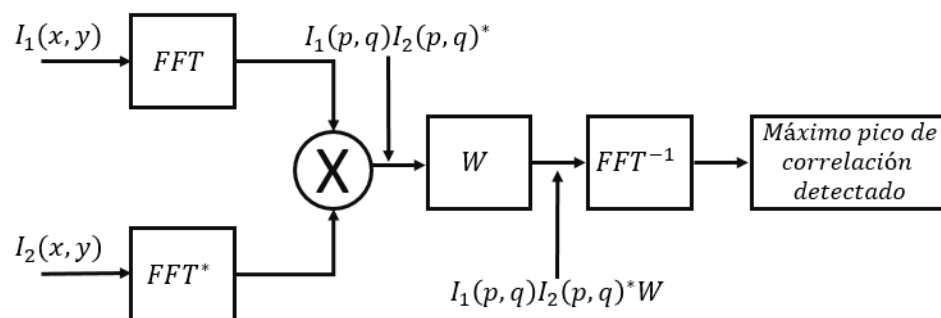


Figura 1. 51: Diagrama del proceso de obtención de la función de correlación mediante el algoritmo de FFT

Ésta metodología permite pasar de un número de iteraciones iguales a $O(N^4)$ (donde O significa del orden de) en el caso que se calcule la función de correlación cruzada, a un número de operaciones iguales a $O(N^2 \log_2 N)$ si se aplica el teorema de Wiener-Khitchine. (Sánchez 2015)

El empleo de la FFT para el cálculo de la función de correlación cruzada introduce un mayor ruido con respecto a lo que habría si se empleara la función de correlación directa. Tal comportamiento es debido a que la FFT trata la señal discreta como si fuese periódica, también cuando esta asunción no se corresponde con la realidad. Sin embargo tal reducción no es tan grande como para impedir la localización del pico de correlación (es por lo tanto posible identificar el vector de desplazamiento buscado) si se consideran las ventanas de interrogación de dimensiones suficientemente elevadas. Si las dimensiones son demasiado limitadas, el ruido introducido por la discontinuidad debida al FFT será elevado impidiendo la distinción entre los picos secundarios, debidos al ruido en el plano de correlación, y el pico principal, dado por la señal a medir. (Sánchez 2015)

Otra desventaja de la FFT, es que por definición, supone que los datos de entrada (ventana de interrogación) son periódicos, significa que se repiten en todas las direcciones (Raffel et al. 2007). Cuando el desplazamiento de las partículas es mayor a la mitad del tamaño de la ventana de interrogación, el pico de intensidad en la matriz de correlación se pliega hacia atrás en la matriz y aparecerá en el lado opuesto de la matriz (Raffel et al., 2007). Por lo que se recomienda reducir el desplazamiento hasta aproximadamente un cuarto de la ventana de interrogación, con el fin de mantener el ruido de fondo bajo en la matriz de correlación (Keane y Adrian 1990).

Conociendo el desplazamiento medio de las partículas para cada ventana de interrogación, el factor de escala y el intervalo de tiempo transcurrido entre imágenes se puede determinar la velocidad local del fluido en cada ventana conformando así el campo de velocidades del flujo.

1.4.2.2 VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS (PTV)

Mientras la técnica PIV utiliza un marco de referencia Euleriano, y permite la determinación del campo de velocidades basándose en la determinación del desplazamiento del promedio de un grupo de partículas, PTV lo hace en un marco de referencia Lagrangiano, es decir, la cuantificación del cambio temporal de la velocidad a lo largo de la trayectoria de cada partícula.

PTV se basa en determinar la velocidad de la partícula como el cociente entre el desplazamiento de la misma (posición final menos posición inicial) $(\vec{X}_B - \vec{X}_A)$ y el intervalo de tiempo Δt

$$\vec{u} = \frac{\vec{x}_B - \vec{x}_A}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Por lo que la determinación de la posición de las partículas es fundamental en el proceso.

Al igual que en PIV la implementación de la técnica PTV requiere de una etapa pre-procesamiento, detección de las partículas y la determinación del desplazamiento.

Pre-procesamiento

En el pre-procesamiento se realiza la substracción del fondo suponiendo que: si las condiciones experimentales se mantienen constantes durante la medición, entonces una imagen instantánea puede ser descompuesta en una imagen media que correspondería al fondo y una fluctuante que contendría las partículas trazadoras. La substracción del fondo de la imagen permite remover objetos sólidos como la muestra en la figura 1.52, y mejorar la relación ruido señal.

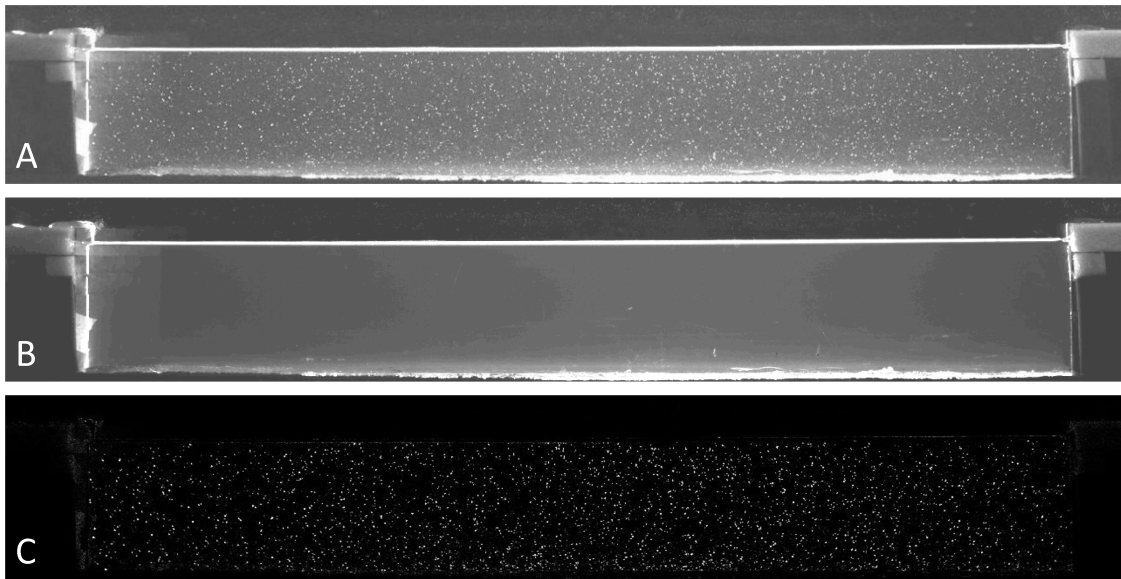


Figura 1. 52: Sustracción del fondo de imagen. A) Imagen Instantánea del flujo vertical en un campo de espigones fluviales. B) Imagen Media calculada usando 14400 cuadros. C) Imagen Instantánea mostrada en A), pero con la imagen media sustraída. (Tomada de Patalano)

Detección de las Partículas

La confiabilidad del método depende fundamentalmente de la precisión en la determinación de la posición de las partículas.

Existen varios métodos para obtener la ubicación de la partícula a un nivel de subpixel como ser el basado en la correlación con una máscara gaussiana, y el método del umbral de intensidad

Si el desplazamiento de la partícula es del orden del tamaño de la imagen de la partícula, el error inducido en la ubicación de su posición cobra importancia. Ahora, si el desplazamiento es lo suficientemente largo para evitar la influencia de ese error, se puede registrar una deformación no lineal de los patrones de partículas, especialmente en regiones de altos gradientes de velocidad. Lo expuesto hace dificultoso a los algoritmos encontrar una solución de correspondencia (Patalano 2017).

Método basado en la correlación con una máscara Gaussiana

Una máscara de partícula es el patrón de intensidad “ideal” de la imagen de una partícula. Generalmente, el patrón de intensidad de una partícula posee un pico cerca del centro de la imagen, y la intensidad decrece a medida que la distancia desde el centro crece (Takehara y Etoh 1999), asumiendo que la distribución de la intensidad de la partícula alrededor del centro se asemeja a una función Gaussiana, es posible detectar la posición de la partícula correlacionando la imagen en grises del flujo con una matriz con distribución gaussiana de sus componentes alrededor del elemento central (máscara Gaussiana), y Desviación Standart igual al diámetro medio de la partícula (Ishikawa *et al.*,2000). Si la correlación entre la matriz y la imagen en grises es mayor a un cierto nivel, definido previamente, se está en presencia de una partícula (Takehara y Etoh, 1999)

- Método basado en el umbral de intensidad

Se convierte la imagen original en grises, a una imagen binaria (imagen blanco y negro), y se elige un umbral en la matriz de intensidad de la imagen como valor límite, de tal forma que todos los niveles por arriba o por abajo de ese valor corresponderán a las partículas o al fondo de la imagen. Como las partículas generalmente son más brillantes que el fondo, todos los pixeles con un valor de intensidad superior al valor establecido formarán parte de las partículas que se detectan sumando pixeles de un mismo valor y calculando luego su centro.

Procedimiento:

Como las imágenes son binarias (blanco y negro) el pixel negro se considera fondo mientras que pixel blanco partícula. Cada vez que se encuentra un pixel blanco se designa un número de partícula a ese sitio a los fines de identificar la partícula a la cual pertenece.

El número apropiado de partículas se determina chequeando los pixeles vecinos que ya han sido escaneados de la siguiente manera:

- A) Existe un número de partícula ya designado a un pixel inmediato: en ese caso se le asigna el mismo número y se lo coloca en la matriz de la imagen en la ubicación correspondiente a ese nuevo pixel considerando el pixel actual como parte de la partícula que fue identificada previamente.
- B) No hay identificado en los pixeles vecinos ningún número de partícula: en ese caso se crea un nuevo número de partícula y se inserta en la matriz en la ubicación del pixel considerado.
- C) Más de un pixel vecino tiene número de partícula pero son diferentes: se les asigna a todos los pixeles conectados el número de partícula más chico y se consideran parte de la misma partícula.

Algoritmo de Correlación Cruzada:

Una vez identificadas las partículas y determinados los centroides de todas ellas, se ejecuta el algoritmo de correlación cruzada para el seguimiento de cada partícula a los fines de identificar su desplazamiento.

El método de correlación cruzada utiliza una ventana de correlación centrada en una partícula, a los fines de identificar a la misma y a sus vecinas en un tiempo después. Partiendo de la suposición que la posición de las partículas trazadoras no cambia demasiado en un tiempo Δt entre dos tomas consecutivas, si el cambio fuera significativo se podría pensar que el paso de tiempo Δt es muy grande o la velocidad muy alta.

La técnica de correlación puede ser explicada mediante la representación de los siguientes esquemas (Savid y Wierzbicki 2008):

El programa de seguimiento de partículas intenta seguir a la misma de un tiempo $T1$ a otro $T2$ dibujando una ventana de correlación alrededor de la partícula n (W_{t1n}) en $T1$, y que sirve como ventana de búsqueda para las partículas candidatas en $T2$. La ventana de correlación debe ser lo suficientemente grande para asegurar que la partículas trazadoras queden dentro de ella para el intervalo de tiempo Δt para el cual se calculan los desplazamientos como se muestra en la figura 1.53

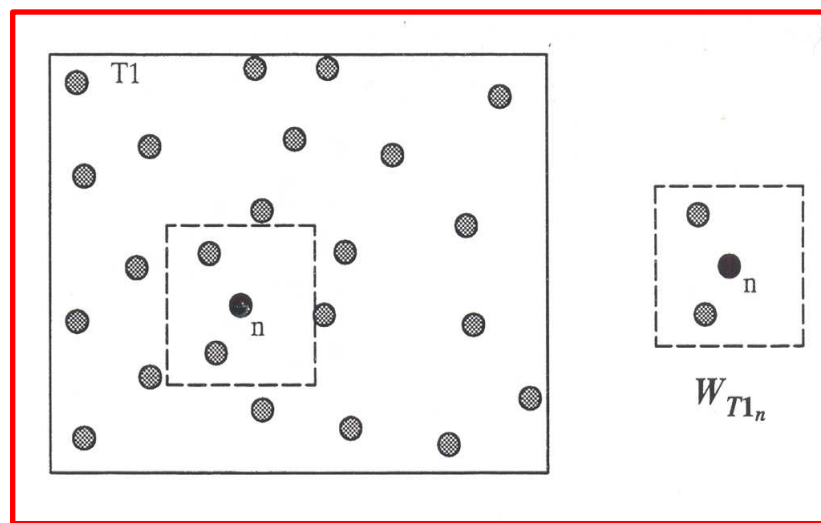


Figura 1. 53: Campo de Flujo muestreado para un tiempo $T1$ y la ventana de correlación W_{t1n}

La figura 1.54 muestra el mismo campo de flujo desplazado en un tiempo $T2$ y con la ventana de correlación $WT2$ ubicada en la misma posición que la figura anterior. El asterisco señala la ubicación de la partícula n , y se busca la nueva ubicación de n entre I , J , y K .

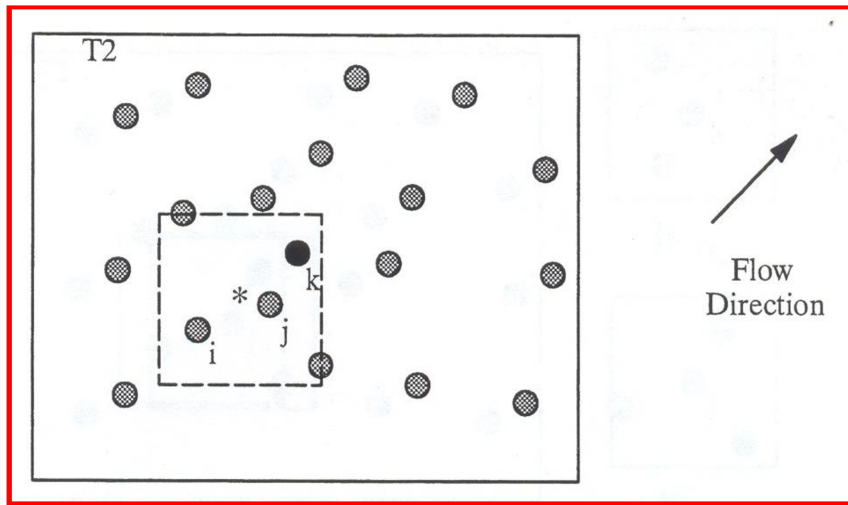


Figura 1. 54: Campo de flujo desplazado para un tiempo T2

Para determinar la correlación de la partícula i y n se dibuja una ventana de correlación centrada en i (W_{T2i}) y se la compara con la ventana de correlación (W_{T1n}) alrededor de n en T1. Las dos ventanas de correlación deben ser del mismo tamaño para garantizar una correlación adecuada. Al analizar (W_{T1n}) y (W_{T2i}) en la figura 1.55 se observa que ambas ventanas no son similares por lo que la correspondencia entre imágenes dará una correlación muy baja.

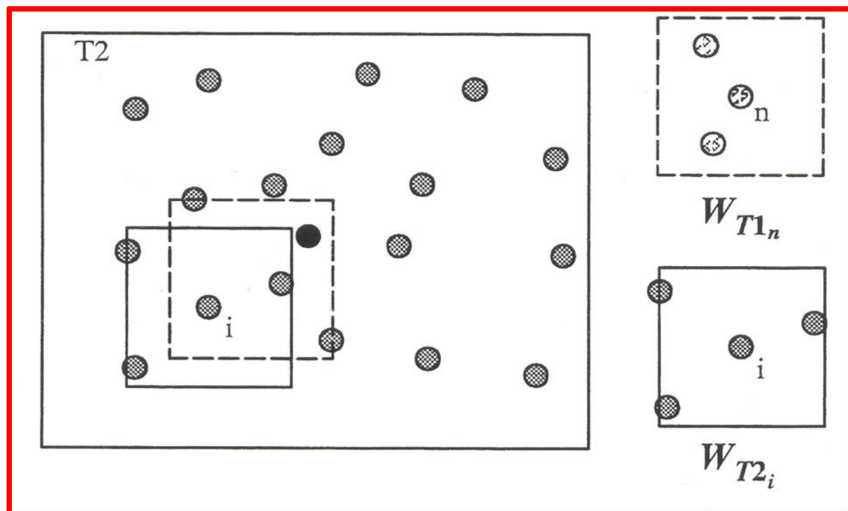


Figura 1. 55: Ventana de correlación para la partícula i en el tiempo T2

Luego se realiza el mismo análisis para las otras partículas candidatas tomando como correcta la ubicación de n en $T2$, a la mas alta correlación como se observa en la figura 1.56 donde es evidente la similitud entre ambas ventanas de correlación.

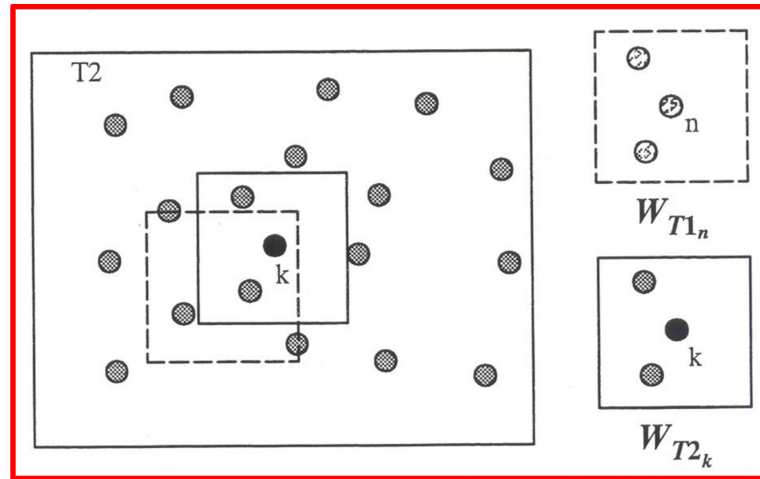


Figura 1. 56: Similitud entre ventanas de correlación

La figura 1.57 visualiza la superposición de imágenes de un tiempo $T1$ a un tiempo $T2$ donde la ubicación de la partícula k (mejor correlación) se usa para determinar el desplazamiento de la partícula n y su correspondiente vector velocidad.

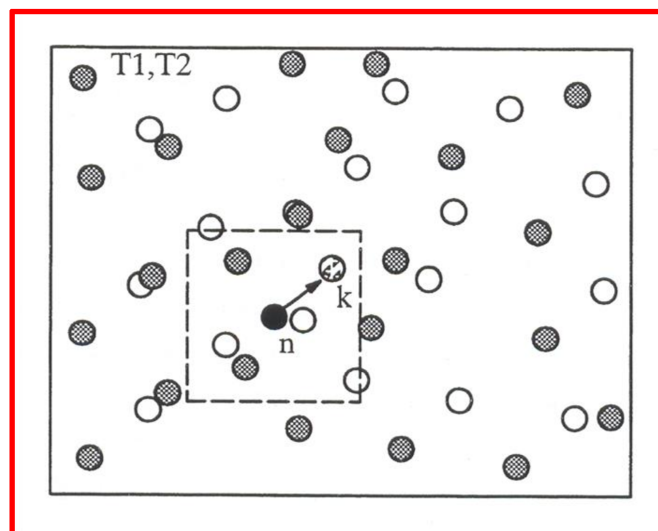


Figura 1. 57: Desplazamiento de la partícula n y su vector

Realizando el análisis para cada una de las partículas trazadoras se pueden encontrar los vectores de velocidad para todo el campo de visualización. (Figura 1.58)

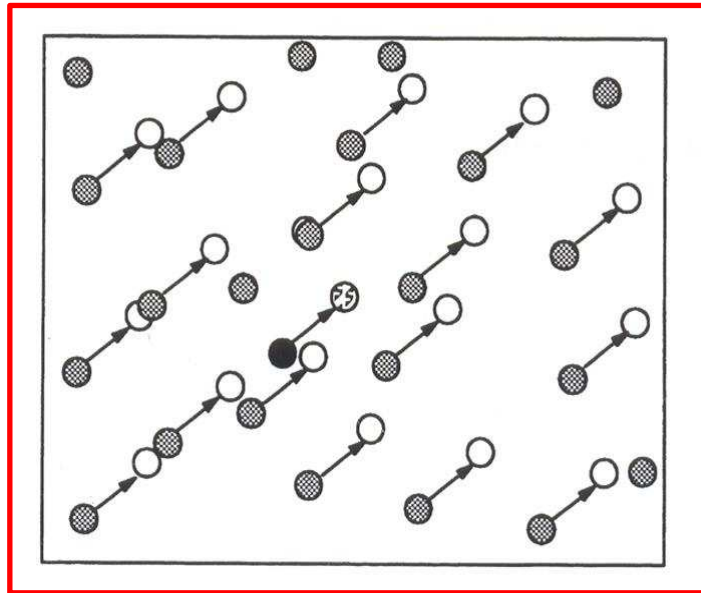


Figura 1. 58: vectores de velocidad para todas las partículas en el campo visual

El grado de coincidencia entre partículas estará dado por el coeficiente de correlación para cada combinación:

$$C(T1_n, T2_i) = \frac{\sum_{x=0}^{n_x} \sum_{y=0}^{n_y} WT1_n(x,y) WT2_i(x,y)}{\sqrt{BT1_n BT2_i}} \quad (1.3)$$

Donde:

$C(T1_n, T2_i)$ = Coeficiente de correlación para la combinación entre n en T1 en T2

$(WT1_n$ y $WT2_i)$ = Ventanas de correlación

$(BT1_n$ y $BT2_i)$ = Número de pixeles blancos (o partículas) en las ventanas seleccionadas

(x, y) = Coordenadas del pixel en las ventanas de correlación.

Los valores ($WT1_n$ y $WT2_i$) tomarán un valor de 1 cuando el pixel en x - y sea blanco es decir parte de la partícula, y tomarán un valor de 0 cuando el pixel sea negro (el fondo).

Las ventanas de correlación se compararán pixel por pixel sumando las coincidencias entre pixeles blancos superpuestos. Para que ocurra una correlación perfecta, cada ventana de correlación debe tener la misma cantidad de pixeles blancos y todos estos pixeles se deben superponer entre ellos cuando las dos ventanas de correlación son comparadas.

1.4.2.3 IMPLEMENTACIÓN A GRAN ESCALA DE AMBAS TÉCNICAS (LSPIV Y LSPTV)

Las técnicas PIV y PTV presentadas anteriormente han sido desarrolladas para un uso óptimo en laboratorio cuya escala de medición es de algunos centímetros (2-20 cm). Al buscar determinar el campo medio de velocidad del flujo la caracterización se hace sobre los vórtices tridimensionales más grandes por lo que PTV y PIV pasan a denominarse LSPTV (Velocimetría por Seguimiento de Partículas a Gran Escala) y LSPIV (Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala). En el caso de su implementación en cursos fluviales, la escala de medición supera ampliamente los valores expuestos existiendo ciertas diferencias con su implementación en laboratorio que deben ser tenidas en cuenta al momento de efectuar las mediciones y que se detallan a continuación:

- **Fuente de iluminación para LSPIV y LSPTV:** a gran escala, lo más probable es que la fuente de iluminación sea difusa en lugar de coherente (luz del láser). En el caso de un río, la fuente de iluminación es natural por lo que se recomienda buscar el ángulo de medición más conveniente para lograr una iluminación de la superficie de agua lo más homogénea posible tratando de evitar en lo posible el reflejo del sol sobre la misma.

Partículas Trazadoras (LSPTV): Una suposición básica del método es que las partículas son capaces de seguir al flujo por lo que se considera que la misma debe tener una densidad similar a la del fluido, lo que en la práctica no siempre es fácil de conseguir por lo que se acostumbra a elegir partículas que sigan al flujo sin perturbarlo demasiado. Es recomendable también que el tamaño de las partículas presenta en un diámetro de entre 3 y 4 píxeles para que el la posición de la misma pueda ser registrada con precisión.

Es conveniente que la partícula presente una forma uniforme como circular o esférica para evitar errores en el cálculo de velocidad inducidos por la rotación de las mismas y con un buen contraste en la imagen a modo de ser fácilmente diferenciada.

- **Partículas Trazadoras (LSPIV):** Esta técnica se implementa a gran escala sobre la hipótesis que, si visualmente se puede distinguir patrones en la superficie durante las crecidas se pueden utilizar las ondulaciones visibles (debidas a la eclosión de las estructuras coherentes), que se desplazan a la misma velocidad que la superficie como partículas trazadoras y encontrar a través de ellas el campo superficial de velocidad.

- **Posición de la Cámara Digital (LSPTV y LSPIV):** a pequeña escala, en laboratorio, es relativamente simple ubicar la cámara digital perpendicular al plano medido. A gran escala, es más complicado visualizar completamente la región de interés con una cámara ubicada perpendicular a la superficie del agua ya que requiere tomar una posición cenital, lo cual implica tomar altitud. Lo más común es de realizar un video de un punto de vista oblicuo (p. ej. desde una orilla, un puente, un edificio, etc...) que luego requerirán de una rectificación para lograr obtener resultados coherentes (Patalano, 2017).

1.4.2.4 RECTIFICACIÓN DE RESULTADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN A GRAN ESCALA DE AMBAS TÉCNICAS (LSPIV Y LSPTV)

Los resultados obtenidos con la técnica PIV (Velocimetría por Imágenes de Partículas) y PTV (Velocimetría por Seguimiento de Partículas) dan como resultados los campos de vectores de velocidad instantánea con ubicación aleatoria. Para representar los campos medios del flujo se debe hacer un promedio aritmético de las componentes de todos los vectores de velocidad para un período de tiempo. Para ello, mediante un método de interpolación se determina el campo de velocidades sobre una malla regular a partir de la distribución aleatoria de los vectores de velocidad. Una vez obtenido el campo de velocidad completo interpolado sobre la grilla (utilizando el método de Triangulación con interpolación lineal) se realiza el promedio de todos los vectores que se obtuvieron durante el tiempo de medición (Herrero 2014).

Rectificación de Resultados:

A pequeña escala la ubicación de la cámara digital en forma perpendicular al plano de medición es simple, haciéndose más dificultosa a medida que aumenta la escala de medición. A gran escala el problema surge al tratar de visualizar completamente la región de interés con una cámara ubicada de forma perpendicular a la superficie de agua, siendo lo más común realizar la captura de las imágenes grabando el video desde una posición oblicua, por ejemplo, desde uno de los márgenes de un río requiriendo cierta rectificación para obtener resultados coherentes.

Las imágenes oblicuas son una proyección perspectiva de la realidad a una imagen (Patalano, 2017).

Un punto P en un espacio cartesiano queda definido por sus coordenadas cartesianas (x,y). En coordenadas homogéneas todo punto bidimensional está definido por tres

coordenadas de modo tal que un punto de dimensiones (x,y) en el espacio cartesiano se lo representa como $\tilde{P} = (x, y, 1)$. Las coordenadas homogéneas son usadas para describir un punto en el espacio proyectivo. Ahora, es posible establecer una relación entre las coordenadas cartesianas de un punto en el espacio con sus coordenadas homogéneas resolviendo la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Siendo X, Y y Z las coordenadas de un punto en el espacio y \tilde{x}, \tilde{y} , y \tilde{z} las coordenadas homogéneas de la proyección de ese punto según la longitud focal (distancia entre el centro óptico de la lente y el foco). Ahora; teniendo en cuenta los parámetros de diseño e intrínsecos de la cámara (posición central del sensor de la cámara y la característica del lente), y los parámetros extrínsecos de la cámara como la posición del centro de la cámara en el mundo (rotación de la lente y ubicación del origen del sistema de la realidad) la ecuación 1.4, se reescribe como sigue.

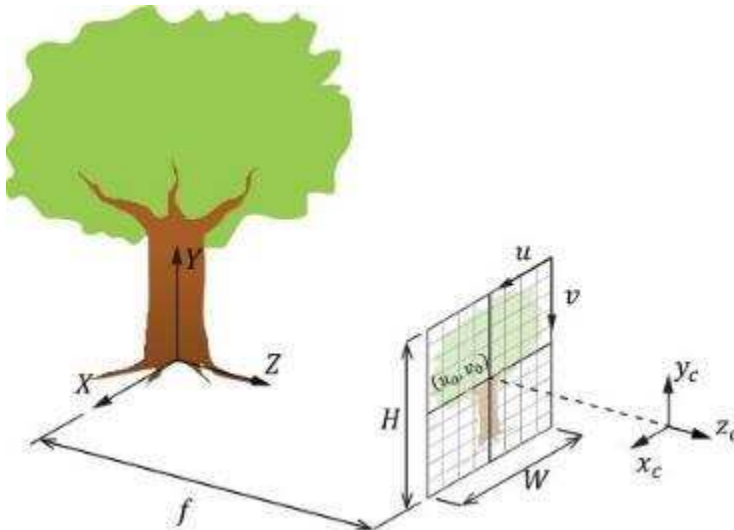
$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

La ecuación 1.5 representa la relación entre las coordenadas homogéneas del mundo real y las coordenadas homogéneas proyectadas sobre el sensor de la cámara, siendo C la Matriz de cámara.

Las Coordenadas cartesianas proyectadas en un pixel se puede obtener con la siguientes ecuaciones $u = \frac{\tilde{u}}{\tilde{w}}$ y $v = \frac{\tilde{v}}{\tilde{w}}$

Considerando que la relación establecida en la ecuación 1.5 es invariante y, que todos los puntos en el mundo real se encuentran en el mismo plano $Z = 0$ entonces la misma se puede simplificar de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{23} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$



La Matriz Homografía (H) relaciona las coordenadas de los puntos de un mismo plano en el mundo real con sus proyecciones en pixeles permitiendo transformar coordenadas de la realidad a sus proyecciones en pixeles o viceversa. . Eliminando la dimensión de profundidad se puede resolver la matriz H con 4 puntos cuyas coordenadas son conocidas tanto en el mundo real como en la proyección (Patalano, 2017).

Al aplicar las técnicas de PIV o PTV, los resultados (campos de desplazamiento, o centroides) son expresados en pixeles.

En PTV la rectificación de los centroides de partículas se efectúa utilizando la inversa de la matriz Homografía aplicando la ecuación 1.7

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Como en PIV los resultados son vectores de desplazamiento cuyos orígenes se encuentran sobre una grilla regular y, la ecuación 1.7 solo permite la transformación de coordenadas y no de desplazamientos, es necesario descomponer los vectores de desplazamiento como se muestra en la ecuación 1.8

$$\vec{x}_i^F = \vec{x}_i^O + \vec{d}_i \quad (1.8)$$

Donde: \vec{d}_i = Vector desplazamiento en pixel número i de grilla,

\vec{x}_i^O = Coordenada de origen del vector respectivo

\vec{x}_i^F = Coordenada de extremo final del vector respectivo.

Las coordenadas \vec{x}_i^O y \vec{x}_i^F son rectificadas según las ecuaciones 1.9 para obtener las coordenadas que definen el desplazamiento real en metro:

$$\begin{pmatrix} X_i^O \\ Y_i^O \\ 1 \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} x_i^O \\ y_i^O \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \begin{pmatrix} X_i^F \\ Y_i^F \\ 1 \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} x_i^F \\ y_i^F \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Una vez rectificadas las coordenadas \vec{x}_i^O y \vec{x}_i^F , el desplazamiento real \vec{D}_i se calcula mediante la ecuación (1.10)

$$\vec{D}_i = \vec{x}_i^F - \vec{x}_i^O \quad (1.10)$$

1.5 MOTIVACIÓN CIENTÍFICA

Para dar respuestas a la motivación tecnológica citadas anteriormente basadas en que las técnicas existentes para la estimación de caudales en ríos son limitadas, especialmente en condiciones extremas (estiaje y crecidas), y sobre la hipótesis de que la implementación en gran escala de las técnicas de velocimetría por imágenes para uso en laboratorio permitirá caracterizar flujos de agua con superficie libre en estas condiciones extremas, el estudio de antecedentes detallado muestra la necesidad que se transforma en motivación científica de:

- 1) Avanzar en la caracterización de flujos de crecidas en zonas de montaña en la provincia de Catamarca mediante la implementación de las técnicas de velocimetría por imágenes.
- 2) Contribuir al desarrollo de las actualizaciones de los paquetes computacionales específicos de las técnicas nombradas mediante la visualización de falencias y necesidades derivadas de la implementación de las metodologías LSPIV y LSPTV en cursos fluviales con distintas características.
- 3) Aportar a la detección y cuantificación de fuentes de incertidumbre.
- 4) Implementar metodologías y paquetes computacionales específicos para la sistematización de los aforos mediante la instalación de estaciones fijas LSPIV.

1.6 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Implementar a gran escala (LS) las técnicas experimentales de velocimetría por seguimiento de partículas (PTV) y velocimetría por imágenes de partículas (PIV) para cuantificar el Recurso Hídrico Superficial en cursos fluviales de la Provincia de Catamarca durante eventos extremos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Aportar al desarrollo de técnicas de medición de caudales de crecida en ríos de montaña.
- Definir metodologías de medición óptimas para implementar en gran escala las técnicas experimentales de velocimetría por seguimiento de partículas (LSPTV) y velocimetría por imágenes de partículas (LSPIV) considerando las condiciones naturales del lugar.
- Evaluar la factibilidad de la técnica LSPTV y LSPIV para la determinación de caudales de estiajes y crecidas (mínimos y máximos hidrológicos).
- Proporcionar a la Provincia de Catamarca una alternativa para medir caudales en forma económica y sin la utilización de equipos específicos.
- Desarrollar un proyecto de implementación de la técnica LSPIV para la cuantificación de caudales a nivel provincial generando la participación activa de la sociedad en la captura de los eventos.

CAPITULO 2: METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES DE ESTIAJES Y CRECIDAS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS LSPTV Y LSPIV EN CURSOS DE AGUAS SUPERFICIALES

2.1 INTRODUCCION

Los velocímetros mecánicos y los sensores acústicos, como los perfiladores de corriente acústicos doppler (ADCP) y los molinetes, son la instrumentación típica utilizada para cuantificar caudales escurridos en sistemas fluviales. Estas técnicas son intrusivas y no pueden ser operadas de forma remota, motivo por el cual no se utilizan en caso de caudales máximos, situación típica durante eventos extremos de inundación

Los cursos fluviales de la provincia de Catamarca escurren en zonas áridas y semiáridas presentando ciertas características como ser: a) marcada variabilidad de volúmenes escurridos y profundidades de flujo en las épocas de aguas altas (crecidas) y aguas bajas (estiaje) que impide la adopción de una única tecnología experimental de cuantificación óptima del recurso para ambos periodos; b) características torrenciales en sus hidrogramas de crecidas (crecidas repentinas) con tiempos al pico pequeños y grandes volúmenes escurridos en cortos intervalos de tiempo; c) importante tasa de transporte de sedimentos, que van desde cantos rodados superiores al metro cúbico, como también troncos y todo tipo de material de arrastre, hasta el transporte de una gran cantidad de sólidos finos (arena, arcilla, etc.) que, durante las crecidas, impiden el uso de técnicas de medición intrusivas y; d) elevados niveles de turbulencia con fluctuaciones importantes de la superficie libre y velocidades de flujo.

CAPITULO 2

Las técnicas de velocimetría por imágenes son técnicas no intrusivas, que permiten realizar mediciones sin perturbar el flujo calculando velocidad del mismo en forma simultánea en una gran cantidad de puntos.

En éste capítulo, se presentan las metodologías recomendadas en la implementación de la técnica PTV a gran escala (LSPTV) para la estimación de caudales de estiajes y, la implementación de la técnica PIV a gran escala (LSPIV) para obtención de caudales de crecidas. En la detección de las partículas y la solución del problema de correspondencia temporal en la determinación de la velocidad del flujo correspondiente a caudales de estiajes se utilizó el paquete PTVlab de código abierto que proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI) y fue introducido por Patalano y Brevis. Para la determinación de la velocidad del flujo correspondientes a caudales de crecidas el paquete computacional de código abierto PIVlab, desarrollado en Matlab por Thielicke y Stamhuis 2014, corrigiendo luego para ambas técnicas los errores en la determinación del campo de velocidad de flujo causado por distorsiones de la lente o por el registro no ortogonal del movimiento del trazador mediante rectificación con el software River (aplicación gratuita desarrollada en Matlab por el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba a partir del 2013).

2.2 ACTIVIDADES REQUERIDAS PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES USANDO LSPIV Y LSPTV

A continuación, se describe paso a paso la metodología experimental desarrollada e implementada para realizar mediciones de velocidad de flujo en un curso de agua superficial mediante las técnicas LSPTV y LSPIV empleadas en la determinación de caudales de estiajes y crecidas.

2.2.1 ETAPA DE MEDICIÓN

- *Definición de los objetivos del estudio.*

Es necesario definir a priori los objetivos de la medición para garantizar que los parámetros sean representativos del proceso en estudio.

- *Definición de la zona del flujo a caracterizar.*

Una vez fijados el objetivo de la medición se debe determinar la zona a caracterizar

- *Posicionamiento de la cámara (lugar de filmación):*

El lugar de filmación se elegirá en función de:

- ✓ Poder visualizar toda la sección transversal del cauce.
- ✓ Poder diferenciar con claridad en el video 4 puntos fijos en contacto con el agua, a modo de realizar luego el proceso de orto rectificación.
- ✓ Minimizar lo máximo posible el reflejo en la superficie del agua inducido por la luz natural del sol.

CAPITULO 2

- *Preparación y sembrado de partículas :*

Para la determinación de los caudales de estiajes mediante el uso de LSPTV, las partículas a sembrar deben estar disponibles en el dispositivo de siembra en una ubicación aguas arriba del flujo y encontrarse secas para evitar aglomeraciones. La cantidad de partículas a sembrar depende del tiempo necesario de registro de imágenes a procesar para obtener el campo de velocidades y, de la velocidad del flujo (a mayor velocidad mayor cantidad de partículas necesarias). Es recomendable que el sembrado de la partícula se realice de la forma más homogénea posible, tarea que se ejecutará en forma simultánea a la filmación del video. Ahora, si el objetivo de la medición es la determinación de caudales de crecidas mediante la utilización de LSPIV, no es necesario el sembrado de partículas, ya que la técnica utiliza las ondulaciones visibles producto de la turbulencia del mismo flujo como partículas trazadoras.

- *Determinación de la longitud y frecuencia del registro*

El tiempo de registro debe ser el necesario para obtener un número de tomas suficientes para lograr la convergencia de la velocidad media. Lo expuesto se consigue eligiendo un tiempo de registro $T_m > 20 T_1$ siendo (T_1) la escala de tiempo representativa de la turbulencia, y se puede estimar como $T_1 = L/U_{conv}$ siendo (L), la escala de longitud de los vórtices tridimensionales más grandes (del orden de la profundidad del flujo) y U_{conv} la velocidad convectiva, del orden de la velocidad media en la dirección longitudinal del flujo (Herrero, 2011). La frecuencia del registro está dada por la frecuencia de captura de imágenes para el video que poseen las cámaras digitales convencionales. Por lo general esta frecuencia es de 30 fps y no puede ser modificada por el usuario.

- *Recolección de las partículas (solo para LSPTV)*

Las partículas pueden ser recogidas para ser usadas nuevamente usando alguna malla o red dispuesta adecuadamente verificando que la misma no perturbe el flujo durante la medición.

- *Selección de Puntos de Control*

Se seleccionarán 4 puntos de control (rocas, troncos, estructuras, etc.) para el proceso de orto-rectificación y post-procesamiento de resultados, cuya distancia entre ellos y sus diagonales sean conocidas. Para la elección de los puntos de control se tendrá en cuenta que los mismos se visualicen fácilmente, se identifiquen con claridad en el video y no se encuentren alineados en un mismo plano.

- *Relevamiento Batimétrico de la Sección Transversal del Cauce.*

El lugar del relevamiento debe encontrarse en el área de análisis (lugar de filmación del video). Esta tarea puede ser realizada utilizando una estación total en el caso de cauces anchos y algo profundos, o bien con algún bastón graduado y cinta métrica en el caso de cauces angostos y de poca profundidad.

En caso de crecidas y, debido a que la provincia no cuenta con equipamiento específico que no requiera de la introducción de personas para ejecutar esta tarea, la misma se llevara a cabo en un tiempo posterior a la medición y cuando las condiciones del cauce así lo permitan por lo que es necesario determinar la variación de la sección transversal, producto del transporte de material sólido (efecto de la erosión y/o sedimentación sobre la sección analizada) que puedan influir sobre el cálculo del caudal.

2.2.2 ETAPA DE PRE PROCESAMIENTO

2.2.2.1 ACTIVIDADES COMUNES A AMBAS TÉCNICAS

- *Extracción de las imágenes del video.*

Una vez concluida la filmación, es necesario extraer del video las imágenes. Para ello se utiliza el paquete computacional River, que permite elegir la cantidad de imágenes por segundo a extraer. Por lo general la frecuencia de captura de imágenes para un video es de 30 fps (imágenes por segundo) por lo que un video de 30 segundos tendrá 900 imágenes.

El intervalo de tiempo que debe existir entre cada para de imágenes consecutivas, está dado por la velocidad del fluido. Si la velocidad es muy alta y el intervalo entre las imágenes es muy grande, no será posible determinar el campo de velocidad del flujo, ya que no habrá partículas en común entre las dos imágenes tomadas consecutivamente. Sin embargo, un intervalo muy pequeño podrá dar lugar a que las partículas no presenten un desplazamiento significativo (Barja, 2015). En este aspecto sería interesante estudiar la relación entre la velocidad estimada del flujo y el desplazamiento de la partícula en dos imágenes sucesivas, con el objetivo de desarrollar un algoritmo que permita establecer el intervalo de tiempo óptimo.

La figura 2.1 muestra la interface del usuario de River donde se aprecia la opción de elegir la cantidad de imágenes por segundos a extraer del video, la cantidad de tiempo en segundos del video en que se extraerán las imágenes, la resolución de las mismas y la opción de extracción en escalas de grises para disminuir el costo computacional en el proceso obteniendo como resultado una secuencia de imágenes consecutivas. (Figura 2.2)

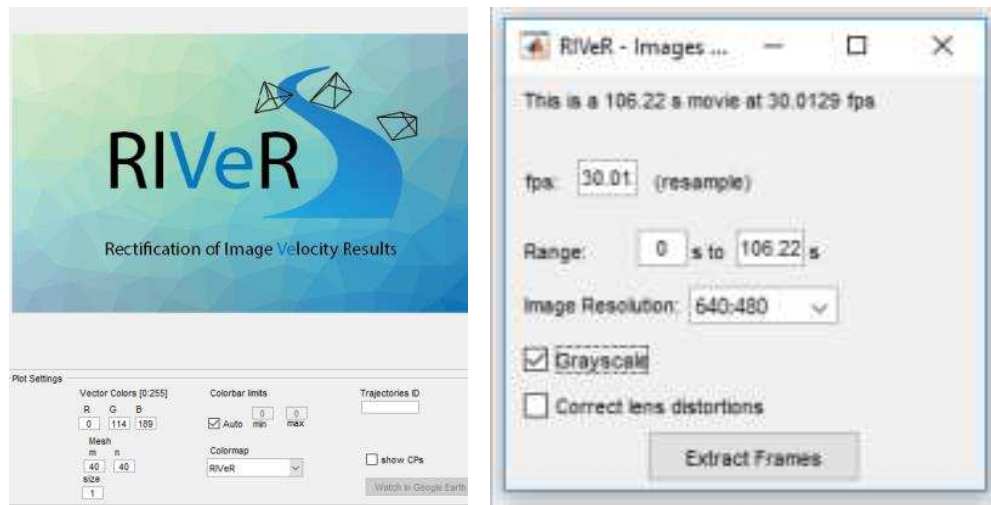


Figura 2. 1: Opciones del paquete computacional River en la extracción de imágenes del video

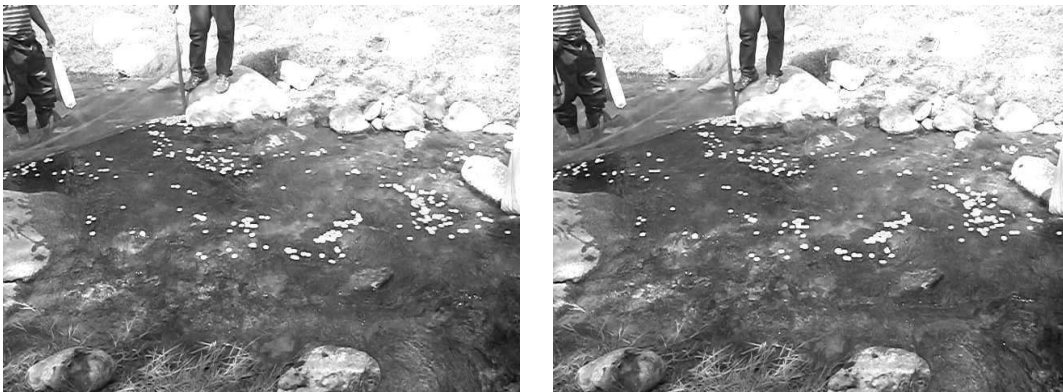


Figura 2. 2: Secuencia de imágenes consecutivas extraídas de un video

Definición de la región de interés.

La Región de Interés (ROI) es una sub área de la total registrada por la cámara. El ROI puede reducirse al mínimo para disminuir el costo computacional de procesamiento y debe definirse para todos los cuadros que se van a analizar. En la interface del usuario (Figura 2.3) se observa en forma de rectángulo el área de interés definida sobre la que se

realizará el análisis, mientras que las sombras rojizas representan la máscara cuya función es la de quitar del área de interés definida para el procesamiento lo sombreado.



Figura 2. 3: Definición del área de interés (ROI)

2.2.2.2 PREPROCESAMIENTO LSPTV

- *Pre-procesamiento de la imagen.*

Se acondicionan las imágenes extraídas de forma adecuada para lograr una buena detección de las partículas sembradas en el flujo, eliminando de la imagen todo lo que permanece estancado o quieto. Esto se logra sustrayendo de cada imagen capturada el promedio de todas las imágenes de la serie (Figura 2.4)

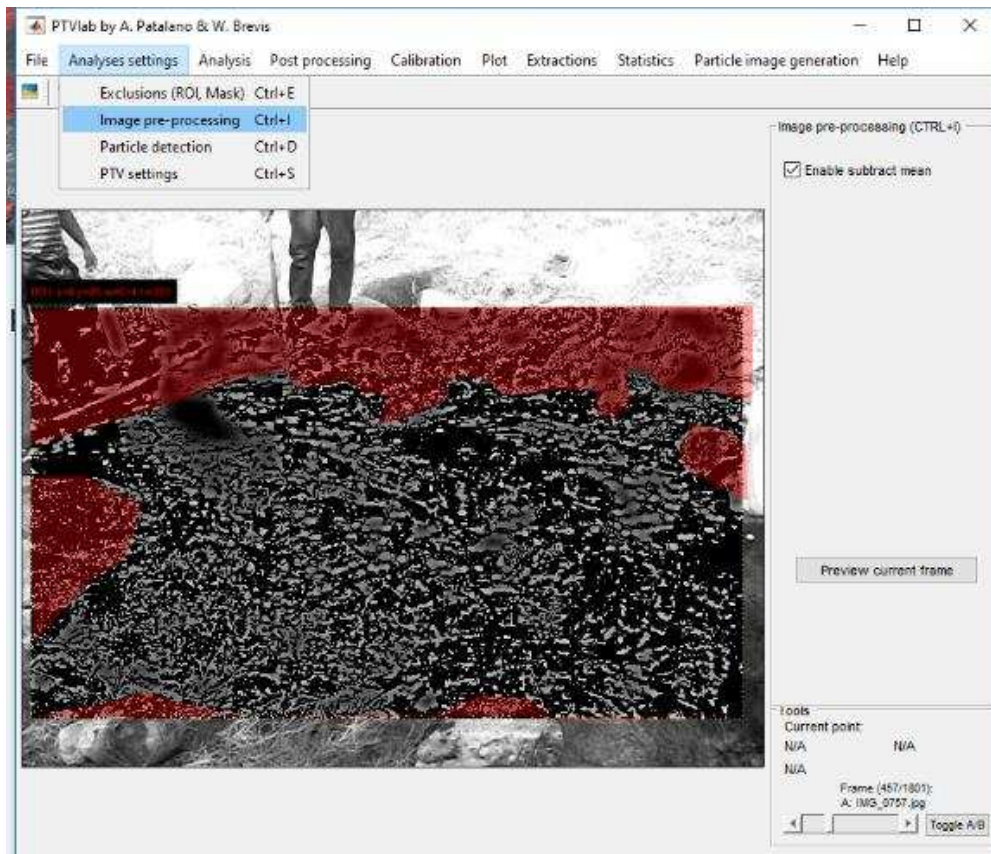


Figura 2. 4: Sustracción del fondo de la imagen

- *Detección de partículas.*

La confiabilidad de la técnica LSPTV depende principalmente de la exactitud en la detección de la posición de la partícula. Tres parámetros deben ser establecidos en éste paso. Se supone que el brillo de la imagen de una partícula presenta una distribución gaussiana en dos dimensiones. El método de correlación de la máscara de partículas (Takehara y Etoh 1998) se utiliza para detectar centroides de partículas; una imagen de partículas de referencia "ideal" es definida por el usuario a través de los parámetros σ y a , que definen la forma de la máscara de partículas, donde σ es el radio representativo de una partícula, y a es un umbral de brillo del pico. Cada imagen se escanea y se detecta una partícula cuando la correlación entre la imagen de partícula de referencia y un área de la imagen actual es mayor que un valor también definido por el usuario (Patalano, 2017) (Figura 2.5).

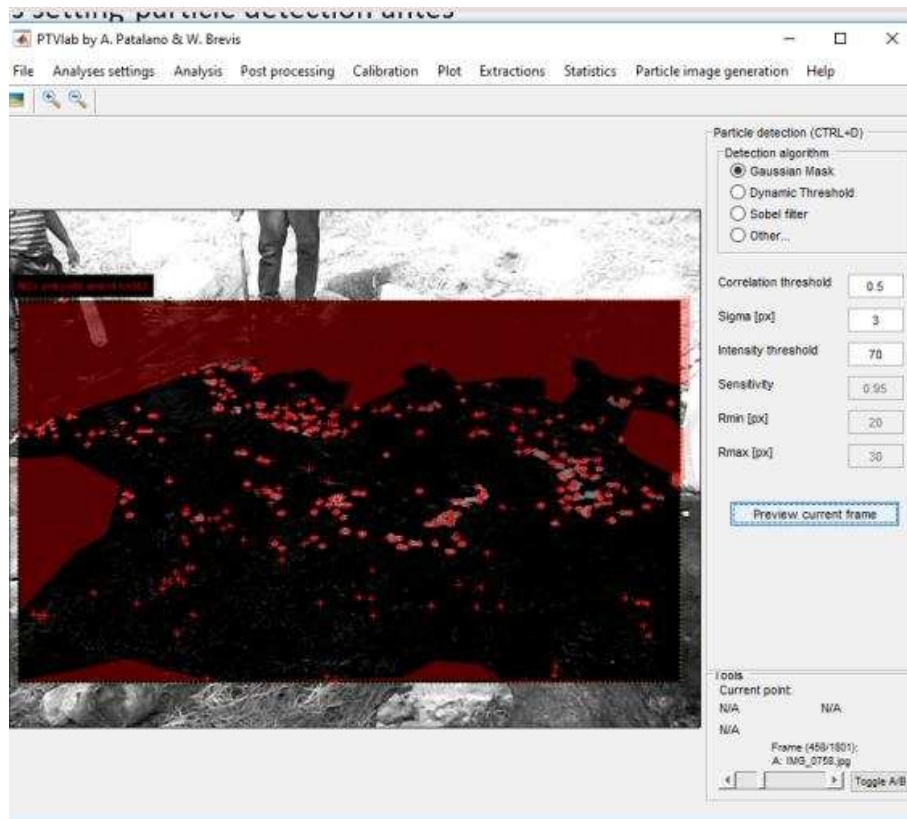


Figura 2. 5: Detección de Partículas

2.2.2.3 PREPROCESAMIENTO LSPIV

- *Pre-procesamiento de la imagen.*

Para reducir la cantidad de estimaciones erróneas de velocidad y garantizar una medición de calidad en el pre-procesamiento de la imagen se utilizan filtros. Dentro de los más usados se encuentran el *CLAHE* (Constrast Limited Adaptive Histogram Equalization) donde las intensidades más frecuentes del histograma de la imagen son repartidas sobre todo el rango de datos y el *highpass* (filtro de paso alto de intensidad), que se calcula aplicando un filtro paso-bajo a la imagen (desenfocando la imagen) y restando el resultado a la imagen original (Patalano, 2017) (Figura 2.6).



Figura 2. 6: Pre-procesamiento de la imagen – Aplicación de filtros

2.2.3 ETAPA DE PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN

Al igual que el pre-procesamiento ésta es una etapa importante en el análisis de LSPTV y LSPIV teniendo una fuerte influencia en la calidad y cantidad de la información espacio-temporal recuperada. La metodología de correlación cruzada es la clave para llevar una serie de matrices de imágenes binarias a un campo de velocidad. (Patalano, 2017).

- *Procesamiento (correspondencia temporal de partículas)*

PTVlab permite la selección de 3 algoritmos descriptos e introducidos por Brevis *et al.* (2011): a) correlación cruzada estándar (CC); b) algoritmos de métodos de relajación (RM) y; c) el algoritmo ICCRM híbrido integrado. En la mayoría de los casos a gran escala, el método de correlación cruzada (CC) es el más eficiente

Con respecto a LSPIV El algoritmo para la correlación cruzada elegido en el procesamiento de las imágenes es el de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Las figuras 2.7 y 2.8 muestran los resultados de la correspondencia de pares usando (CC) entre dos imágenes sucesivas mediante el uso de LSPTV y LSPIV respectivamente. Los vectores indican la magnitud y la dirección de cada desplazamiento instantáneo de partículas en píxel/fotograma. Una vez que el análisis se ha efectuado para todas las imágenes se realiza para ambas técnicas el promedio de todos los vectores obtenidos durante el tiempo de medición (Figura 2.9 y 2.10)

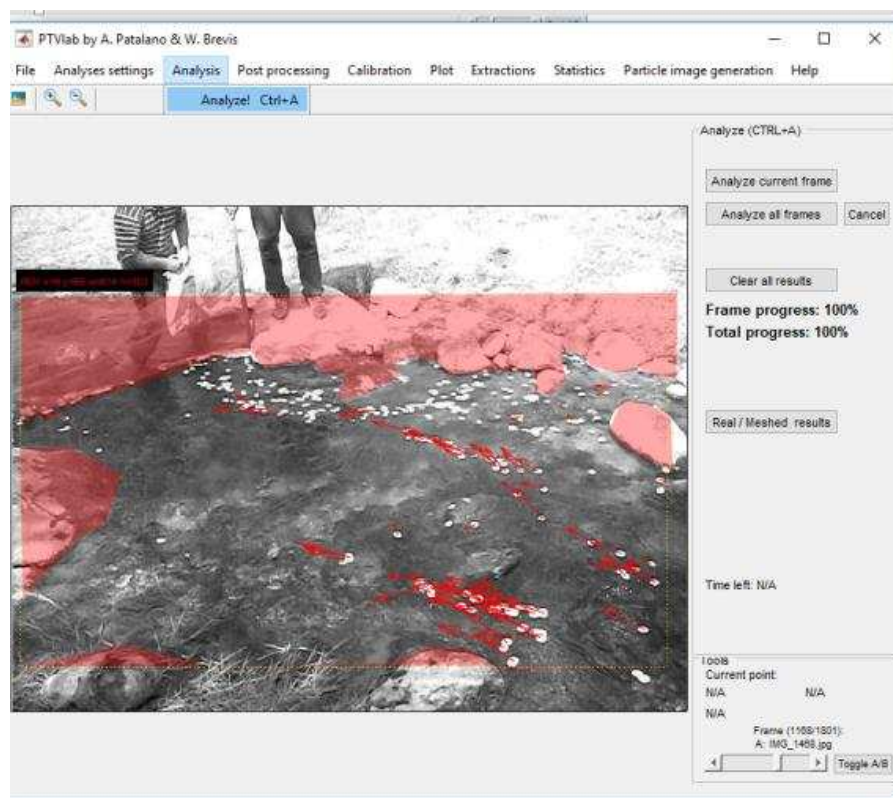


Figura 2. 7: Resultado de correspondencia de pares entre dos imágenes resultantes LSPTV



Figura 2. 8: Resultado de correspondencia de pares entre dos imágenes consecutivas mediante LSPIV.

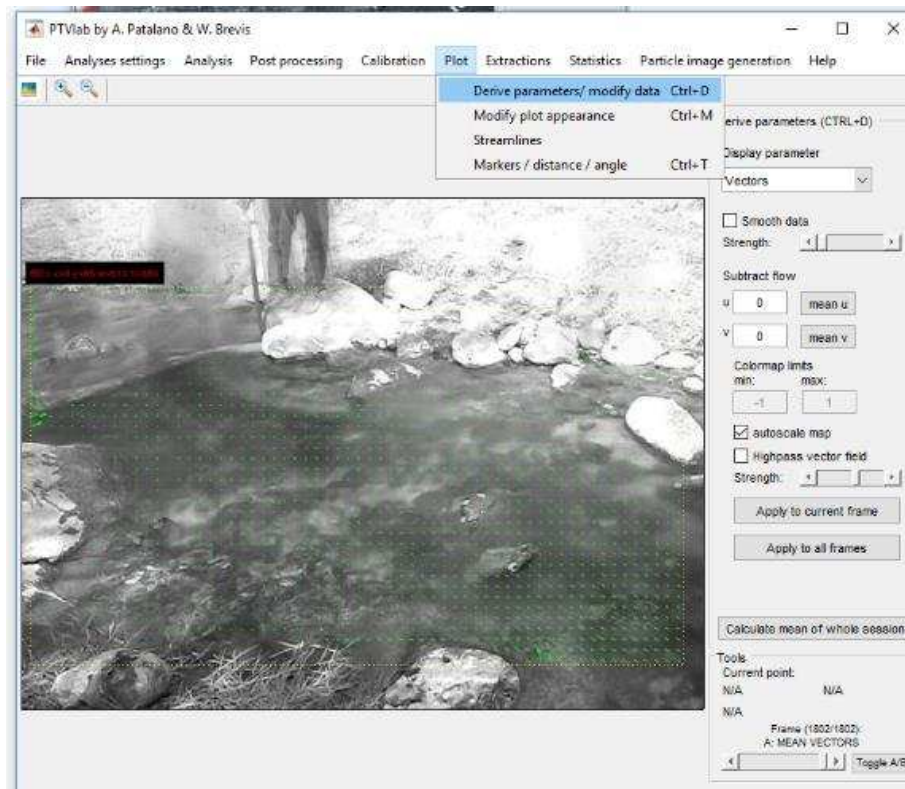


Figura 2. 9: Vectores de desplazamientos promediados

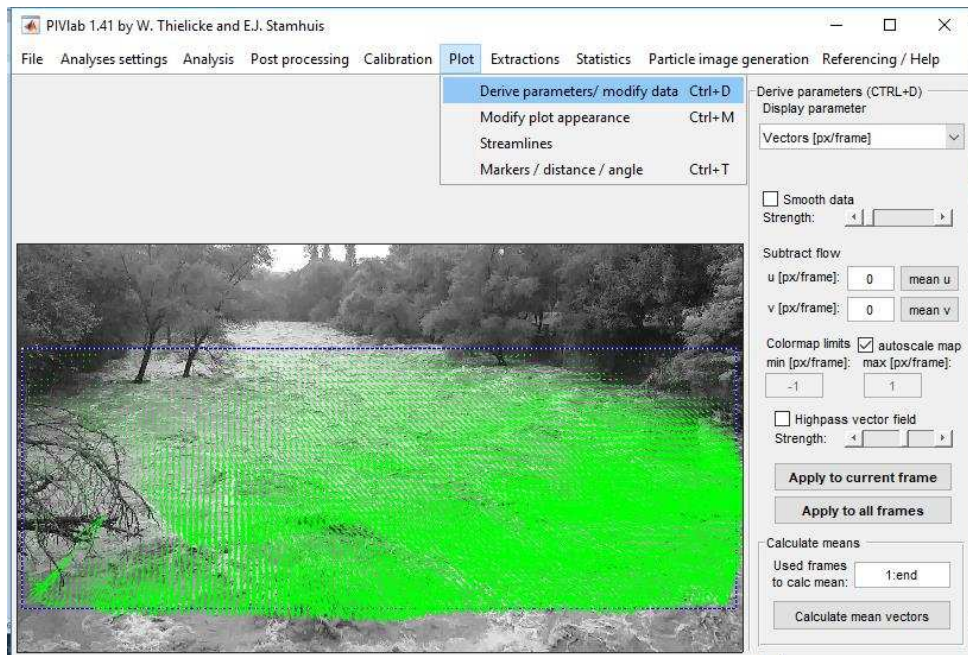


Figura 2. 10: Vectores de desplazamientos promediados.

2.2.4 ETAPA DE ORTO RECTIFICACIÓN Y POST-PROCESAMIENTO DE RESULTADOS DE LSPTV Y LSPIV USANDO PAQUETE COMPUTACIONAL RIVER.

- *Orto-rectificación y Post-Procesamiento de Resultados.*

La conversión de pixel/fotograma a m/s requiere que los resultados sean previamente rectificadas, por lo que una vez realizado el análisis para todas las imágenes, las secciones PTVlab y PIVlab se exportan a River

Para el post procesamiento de las imágenes se utiliza el paquete computacional River, cuyo objetivo es vincular el sistema de coordenadas del mundo real con su proyección 2D en el plano de la imagen. Para rectificar los resultados se deben definir y medir las distancias entre 4 puntos de control y sus diagonales. La selección de los puntos de control (PC) se realiza en función que se visualicen con claridad en las imágenes como, por ejemplo, rocas,

CAPITULO 2

troncos, palos, etc. y que no se encuentren alineados en el mismo plano. La medición de la distancia entre los PC, se puede realizar con cualquier instrumento utilizado para tal fin (cinta métrica, estación total, etc.). La figura 2.11 visualiza la interfaz del usuario con los 4 PC elegidos y la distancia entre ellos.

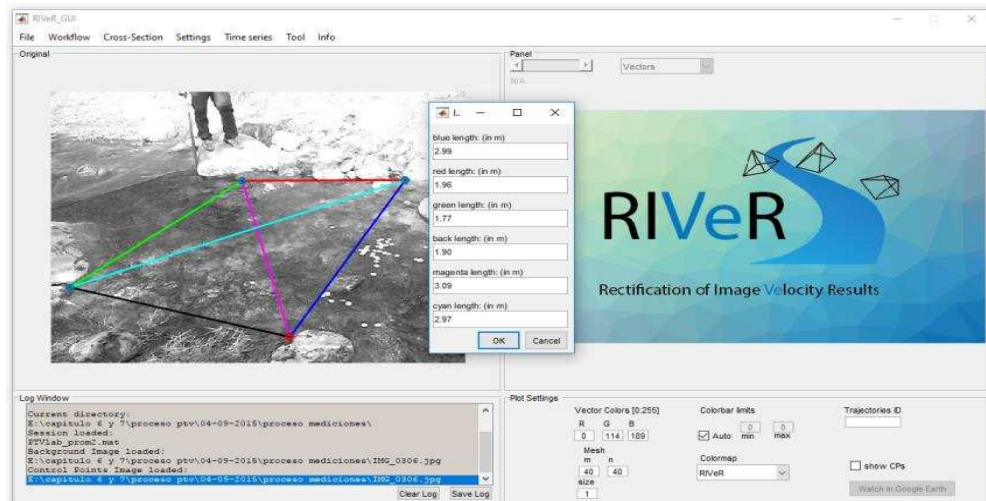


Figura 2. 11: Distancias entre Puntos de Control seleccionados

Una vez cargados los puntos de control y sus respectivas distancias es preciso definir la región de interés donde se realizará la rectificación.

Es necesario introducir el tiempo entre imágenes extraídas Δt en milisegundos, elegido en el módulo de extracción de imágenes. El intervalo de tiempo Δt es designado en River como sampling time.

Ejemplo: si se extrajeron del video 15 imágenes por segundo (fps), entonces:

$$\Delta t = (1/15)*1000= 66.66$$

En la figura 2.12 se observa sobre la margen izquierda, el área seleccionada y los puntos de control CP usados en el proceso de rectificación, mientras que en la margen derecha, se muestra el resultado de la rectificación.

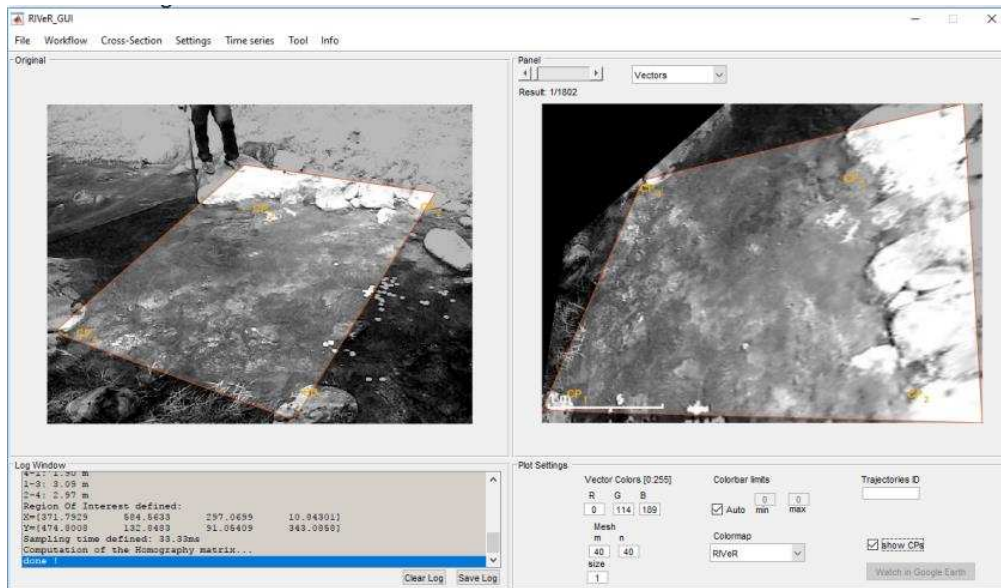


Figura 2.12: Rectificación del área de interés de la imagen usando como referencia 4 puntos de control (PC) establecidos

Los vectores obtenidos mediante correlación se rectifican y se muestran sobre la imagen de fondo rectificada (Figura 2.13). A su vez, todos los resultados se interpolan sobre una malla regular, por lo que se pueden calcular los valores medios de la componente de velocidad.

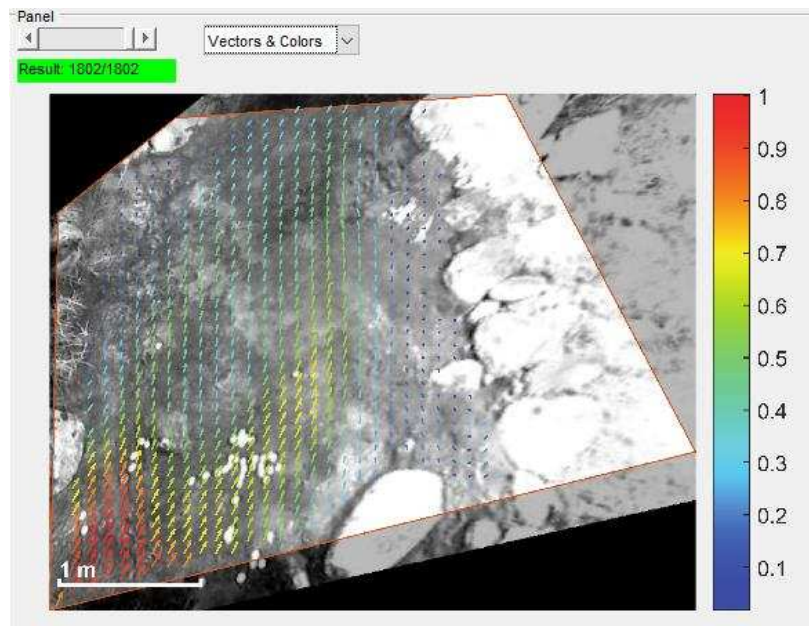


Figura 2. 13: Vectores promedios de velocidad e imagen de fondo rectificadas.

Para la obtención del cálculo de caudales es necesario seleccionar el perfil de la sección transversal en el área de interés, y realizar posteriormente el relevamiento batimétrico de la sección.

La selección del perfil transversal puede ser realizada tanto en la imagen original como en la rectificada. Una vez seleccionada la sección transversal, el módulo de cálculo de caudales de River mostrará los resultados de la velocidad superficial para esa sección. (Figura 2.14)

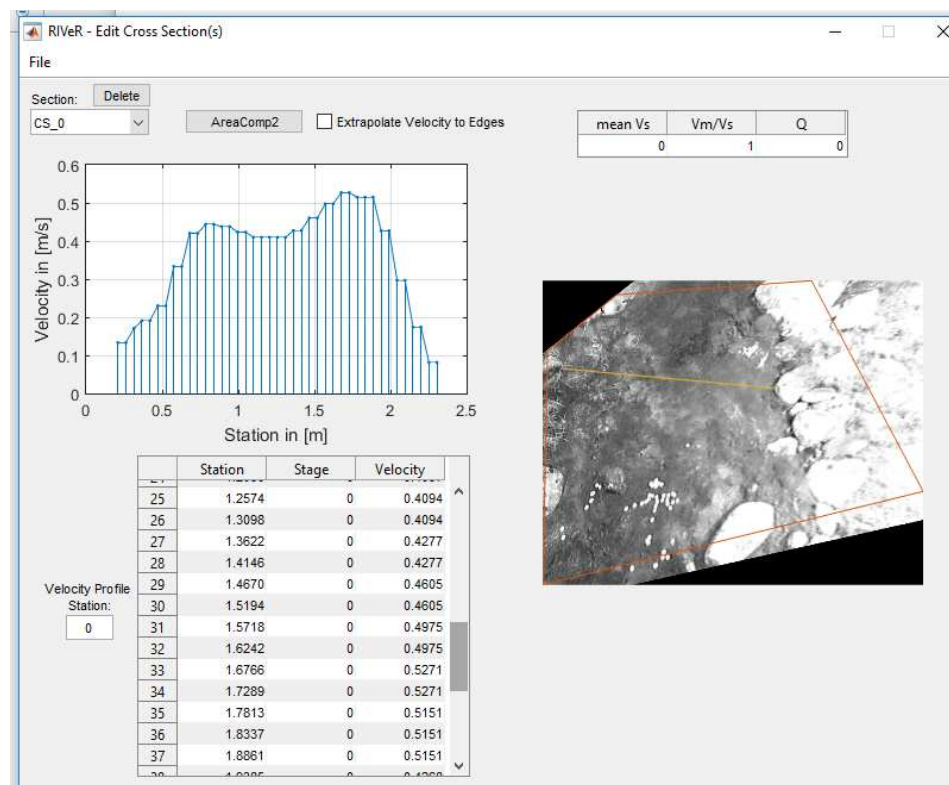


Figura 2. 14: Valores de velocidad superficial para la sección transversal definida.

- *Cálculo de Caudal:*

El cálculo del caudal en una sección transversal de un río está dado por el producto entre la velocidad perpendicular a la sección y el área de la misma.

Una vez obtenidos los vectores de velocidad, los resultados se exportan a una tabla de Excel (Tabla 2.1) siendo (x) la progresiva de la sección transversal del cauce medida en metros, (v) la componente transversal de velocidad en la sección y (u) la componente longitudinal de velocidad en la sección, ambas en m/s.

x	v	u
0.2096	0.1333	0.0317
0.262	0.1333	0.0317
0.3144	0.1709	0.0467
0.3667	0.1908	0.0448
0.4191	0.1908	0.0448
0.4715	0.2299	0.0439

Tabla 2.1: Componente transversal y longitudinal de velocidad

Para poder determinar la profundidad del cauce en las progresivas donde se calculó la velocidad, es necesario interpolar los valores de profundidad obtenidos mediante el relevamiento batimétrico de la sección transversal. Con las profundidades interpoladas, se calcula el caudal en forma parcial y para cada tramo (Tabla 2.2). Finalmente con la suma de cada caudal parcial se calcula el Caudal Total Superficial Q_s

distancia al origen (m)	prof. (m)	Ancho	area rect. (m)	area triang. (m ²)	Area Total	velocidad seccion	velocidad media (m/s)	caudal parcial (m ³ /s)
0	0.000					0.000		
0.2096	0.061	0.210	0.000	0.006	0.006	0.137	0.069	0.000437675
0.262	0.066	0.052	0.003	0.000	0.003	0.137	0.137	0.000456486
0.3144	0.071	0.052	0.003	0.000	0.004	0.177	0.157	0.000566499
		0.052	0.004	0.000	0.004		0.187	0.000722628

Tabla 2.2: Cálculo de los caudales superficiales de cada tramo

CAPITULO 2

El caudal calculado Q_s no es exactamente el caudal real ya que el mismo fue determinado utilizando el campo de velocidad de superficie. Así la descarga real será $Q = \alpha Q_s$.

La relación α obedece a parámetros, tales como la geometría de la sección, y la rugosidad del lecho. Depende del usuario elegir el valor más confiable ya que el mismo puede variar ampliamente de acuerdo a las condiciones del flujo. La elección de éste parámetro será motivo de análisis en capítulos posteriores de este trabajo.

CAPÍTULO 3: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CAUDALES DE ESTIAJES (MÍNIMOS HIDROLÓGICOS) MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPTV EN EL RÍO LOS NOGALES, DPTO AMBATO, PROVINCIA DE CATAMARCA.

3.1 INTRODUCCION

En este capítulo se describe la implementación a gran escala de la técnica no intrusiva de Velocimetría por Seguimiento de Partículas (LSPTV) para cuantificar el escurrimiento de aguas superficiales durante el periodo de estiaje en el río Los Nogales, que se encuentra ubicado en el departamento Ambato, provincia de Catamarca.

3.2 SITIOS DE MEDICIÓN

El río Los Nogales nace en las inmediaciones del Cerro Manchao, y escurre atravesando la zona norte de la villa veraniega El Rodeo, donde recibe el afluente de pequeños arroyos de bajo caudal y por lo general temporarios como: el arroyo Seco, el arroyo los Sauces que nace en el paraje el Portezuelo camino a la localidad veraniega de Las Juntas al que se le une el arroyo Los Pinos de corto trayecto y el río La Cascadita también llamado Las Esquinas o Los Pinos Este, cuya naciente es en Las Ciénagas al noroeste de la Villa El Rodeo. El río Los Nogales continúa hasta unirse con el río Ambato aguas debajo de El

Rodeo, lugar denominado la unión de los ríos y de allí continúa su trayecto hasta su confluencia con el río del Valle en la localidad de La Puerta Sur (Varela, 2011). (Figura 3.1).

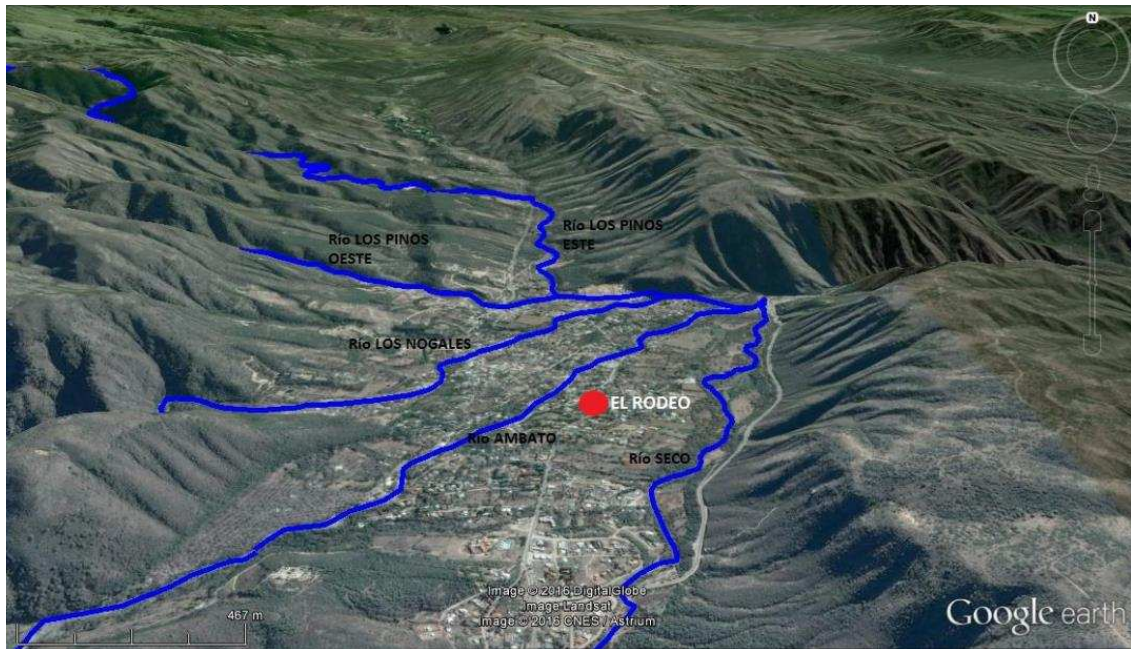


Figura 3. 1: Ríos que escurren en la localidad de El Rodeo (imagen tomada de Google Earth)

El lugar de medición seleccionado está localizado en el camino viejo a Las Juntas en las inmediaciones del puente peatonal sobre el río Los Nogales en la localidad de El Rodeo, aproximadamente a 40 km de la ciudad Capital. Fueron tres las secciones seleccionadas para lograr la mayor precisión de la técnica. La primera (sección 1) se ubicó justo debajo del puente peatonal, la segunda (sección 2) se emplazó a 50 metros aguas arriba del puente peatonal y, por último, la tercera (sección 3) se definió a unos 100 metros agua abajo del mismo. El sitio de medición se eligió en función de la proximidad a la ciudad Capital y la existencia de una estructura hidráulica (alcantarilla) con sección fija, independizándose así de la variación de la sección transversal del cauce. Allí se colocó una escala hidrométrica para poder construir a futuro una curva H-Q (Altura-Caudal) (Figura 3.2).



Figura 3. 2: Lugar de mediciones LSPTV

3.3 METODOS EXPERIMENTALES

En total se realizaron cinco campañas en diferentes fechas. En cada una, se realizaron mediciones mediante la implementación de LSPTV, y aforos con molinete hidrométrico a los fines de validar los resultados obtenidos. Se evaluaron distintos tipos de trazadores como naranjas, discos de 20 mm de etivinilacetato (goma eva) y bolas de poliestireno expandido (telgopor) de diámetro 15 mm lastradas con un tornillo (Figura 3.3).



Figura 3. 3: Tipo de trazadores empleados

La tabla 3.1 visualiza para cada campaña el tipo de trazador empleado

Fecha de Medición	Sección de Medición	Tipo de Trazador			
		Naranja	Poliestireno Expandido Telgopor	Etivinilacetato (goma eva)	Aserrin
28/04/2014	En el puente peatonal		X	X	
15/04/2015	Aguas arriba del puente peatonal			X	
10/07/2015	En el puente peatonal	X			
04/09/2015	Aguas abajo del puente peatonal			X	
17/08/2017	Aguas abajo del puente peatonal			X	X

Tabla 3.1: Fecha, sección y tipo de trazador empleado en las mediciones con LSPTV

Si bien, en la tabla se consigna que se utilizó aserrín en la medición del 17 de agosto del 2017, este trazador fue usado en la implementación de LSPIV que será presentada en capítulos posteriores, a los fines de comparar resultados.

En todas las mediciones el trazador fue recogido posteriormente a la filmación, usando una red de aproximadamente 5 metros de largo confeccionada con tela de media sombra.

La figura 3.4 muestra el funcionamiento de la red colectora de trazadores *in situ*. La foto fue tomada desde arriba del puente peatonal en un instante posterior a la filmación del video. Los pequeños círculos amarillos que se visualizan sobre la superficie de agua corresponden a las partículas sembradas de goma eva.



Figura 3. 4: Recolección de Partículas

La posición de la cámara en cada una de las mediciones se definió en función de: minimizar los efectos del brillo proveniente del sol, visualizar la sección completa del cauce,

definir con claridad 4 puntos fijos que puedan ser usados en el proceso de rectificación y que la velocidad del flujo en la sección sea la suficiente para permitir el desplazamiento de las partículas sembradas. Lo último expuesto responde a que en la sección 1 (debajo del puente peatonal) existe una profundización del cauce (olla natural), que disminuye significativamente la velocidad del flujo. Cuando el caudal de estiaje es muy pequeño, en esa zona la velocidad del flujo es tan baja que las partículas sembradas presentan un desplazamiento casi nulo haciendo muy dificultosa la implementación de LSPTV en el lugar.

Para la filmación de los videos se adoptaron dos posiciones según las condiciones imperantes en el momento de la medición. La primera quedó definida por la ubicación de la cámara arriba del puente peatonal y, por más que la misma se emplazó apuntando hacia abajo, se observa en la imagen una leve oblicuidad con respecto al plano de la superficie del agua quedando la zona de medición algo distorsionada. (Figura 3.5)

En la segunda posición, se colocó la cámara en forma lateral al plano de la superficie del agua (margen derecha o izquierda del río). En ambos casos los resultados obtenidos con LSPTV fueron corregidos para rectificar las coordenadas de la imagen a una proyección ortogonal. (Figura 3.6).



Figura 3. 5: Imagen extraída del video tomado arriba del puente peatonal (fecha de medición 15-04-2014)



Figura 3. 6: Imagen extraída del video tomado sobre margen derecha del río en el puente peatonal (fecha de medición 10-07-2015)

La tabla 3.2 visualiza para las mediciones realizadas, la sección y ubicación de la cámara, la resolución, duración y fps (imágenes por segundo) del video filmado, la cantidad de imágenes extraídas por segundos y el ancho del cauce analizado.

Fecha de Medición	Sección de medición	Resolución de fotogramas de video	Duración del Video	Duración extraída para análisis	Frames por segundos del video (fps)	Frame por segundos extraídos	Ubicación de la Cámara	Ancho del cauce (m)
28-04-14	sección 1	1920*1080 (pixeles)	00:01:00	-	30	-	Arriba del puente peatonal	5
15-04-15	sección2	640*480 (pixeles)	00:02:30	00:01:10	30	15	Arriba del puente peatonal	5
10-07-15	sección 1	640*480 (pixeles)	00:03:06	00:01:20	30	15	Margen derecha del río	3.7
04-09-15	sección 3	640*480 (pixeles)	00:01:46	00:01:09	30	30	Margen izquierda del río	2.9
17-08-17	sección 3	1280*720 (pixeles)	00:55:00	00:55:00	15	15	Margen izquierda del río	1.8

Tabla 3.2: Características del video e imágenes extraídas para las distintas mediciones

Una vez extraídas las imágenes se implementó para cada una de las mediciones, la secuencia metodológica detallada en el capítulo 2.

3.4 RESULTADOS

En cada una de las mediciones se comprobó el caudal medio obtenido mediante LSPTV con los caudales calculados mediante el empleo de la técnica de aforo con molinete.

La estimación de los caudales a partir del campo superficial de velocidad de flujo, requirió definir la relación α entre los valores de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores de velocidades superficiales. Para ello se realizó una comparación entre los caudales obtenidos mediante el uso de un molinete hidrométrico y los resultantes de la implementación de LSPTV con valores de $\alpha = 0.75, 0.80, 0.85, 0.9$. (Tabla 3.3).

Fecha de Medición	Trazador	Q aforo (l/seg)	Q (LSPTV) (l/seg)			
			$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.80$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.90$
28/04/2014	Goma Eva	253	241	257	273	289
28/04/2014	Telgopor	253	236	251	267	283
15/04/2015	Goma Eva	307	264	281	299	317
10/07/2015	Naranja	93	71	76	81	86
04/09/2015	Goma Eva	93	80	86	91	96
17/08/2017	Goma Eva	74	72	77	82	87

Tabla 3.3: Valores de Caudales obtenidos mediante LSPTV para diferentes valores de α

En general los valores de caudales obtenidos utilizando una relación entre la velocidad superficial y la velocidad media del flujo $\alpha = 0.85$ arrojan una menor diferencia porcentual. (Tabla 3.4)

Fecha de Medición	Trazador	Diferencia (%) entre ambas técnicas			
		α			
		0.75	0.8	0.85	0.9
28/04/2014	Goma Eva	-4.79	1.56	7.91	14.25
28/04/2014	Telgopor	-6.88	-0.67	5.53	11.74
15/04/2015	Goma Eva	-14.06	-8.33	-2.61	3.12
10/07/2015	Naranja	-23.15	-18.03	-12.90	-7.78
04/09/2015	Goma Eva	-13.66	-7.91	-2.15	3.61
17/08/2017	Goma Eva	-2.23	4.29	10.81	17.33

Tabla 3.4: Diferencia % entre las técnicas de LSPTV y aforo con molinete

Del análisis de la bibliografía específica el valor $\alpha = 0.85$ es típicamente propuesto para canales naturales y se ha convertido en una práctica estándar dentro de la comunidad hidráulica, siendo el mismo estrictamente válido cuando los perfiles de velocidad media del flujo longitudinal en cualquier sección siguen la distribución estándar de la ley logarítmica (Johnson et al. 2017). Por lo expuesto anteriormente el valor α adoptado en la cuantificación de los caudales mediante LSPTV fué de 0.85.

3.4.1 MEDICIÓN 28-04-2014

En la figura 3.7 se visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas para ambos tipos de trazadores, donde el rango de velocidades superficiales para toda el área de estudio en ambos casos se encuentra en el orden de 0.1 y 0.45 m/s

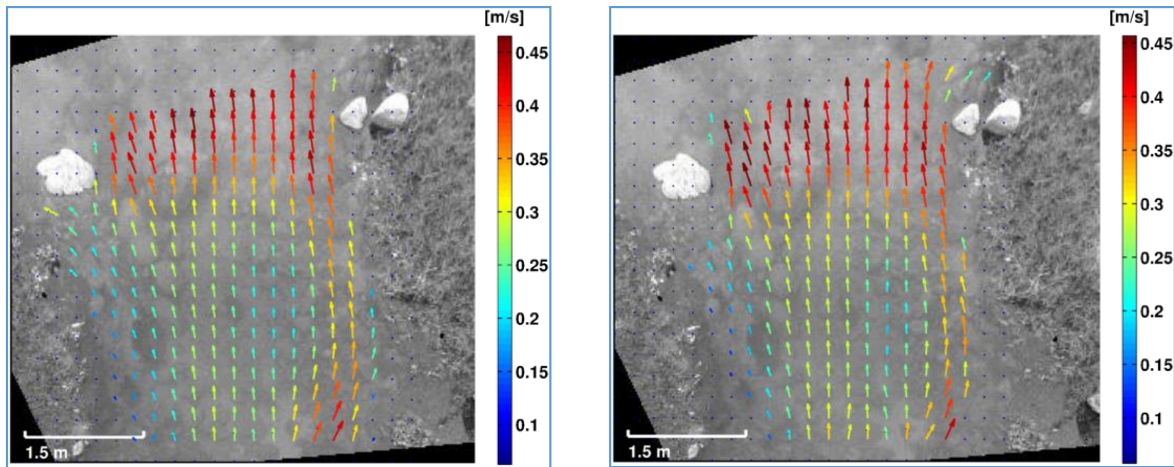


Figura 3. 7: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s). Tipo de trazador empleado: goma eva (izquierda), telgopor (derecha).

La sección transversal relevada posee un ancho de 5 m con profundidades de entre 0 y 60 cm. (Figura 3.8)

Progresiva	Profundidad [m]
0.00	0.00
1.00	0.26
2.00	0.54
3.00	0.60
4.00	0.27
5.00	0.00

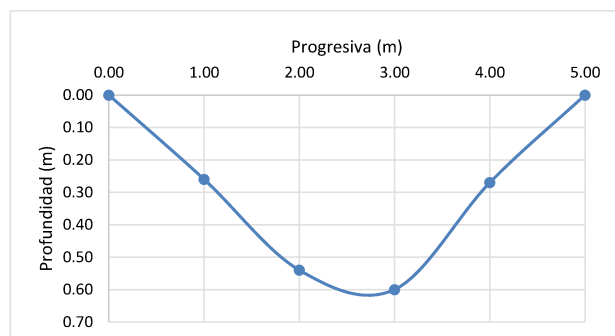


Figura 3. 8: Batimetría de la Sección Relevada para el cálculo de caudales con LSPTV y molinete

El rango de velocidades medias obtenidas mediante el aforo por molinete para la sección transversal relevada, oscila entre 0.09 y 0.19 m/s. mientras que para LSPTV el mismo se encuentra entre 0.11 y 0.22 m/s.

El caudal obtenido mediante la técnica de aforo con molinete es de 253 lts/seg, mientras que los caudales obtenidos utilizando LSPTV con partículas sembradas de Goma Eva y Telgopor son de 273 lts/seg y 267 lts/seg respectivamente. (Tabla 3.3)

La diferencia % entre los caudales medidos mediante la técnica LSPTV con partículas de goma eva y el aforo con molinete es del 7.91 % mientras que con las partículas de telgopor es del 5.53 %. (Tabla 3.4)

3.4.2 MEDICIÓN 15-04-2015

En la figura 3.9 se observa el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas, donde el rango de velocidades superficiales para toda el área oscila entre 0.05 a 0.55 m/s.

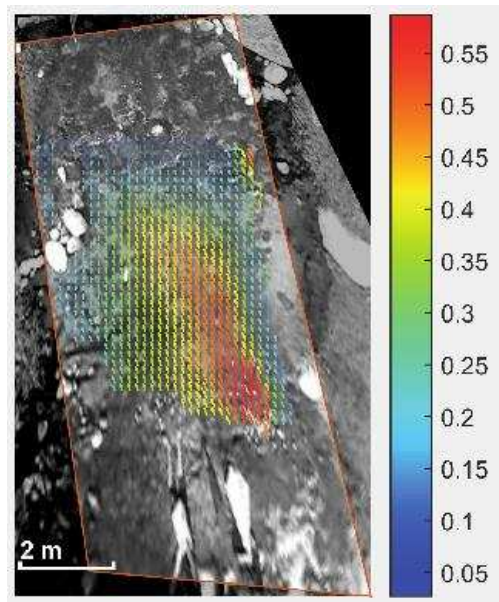


Figura 3. 9: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).

La sección transversal relevada posee un ancho de 5 m con profundidades de entre 7 y 35 cm. (Figura 3.10)

Progresiva (m)	Profundidad (m)
0.00	0.07
0.50	0.08
1.00	0.15
1.50	0.27
2.00	0.32
2.50	0.35
3.00	0.26
3.50	0.28
4.00	0.26
4.50	0.28
5.00	0.25

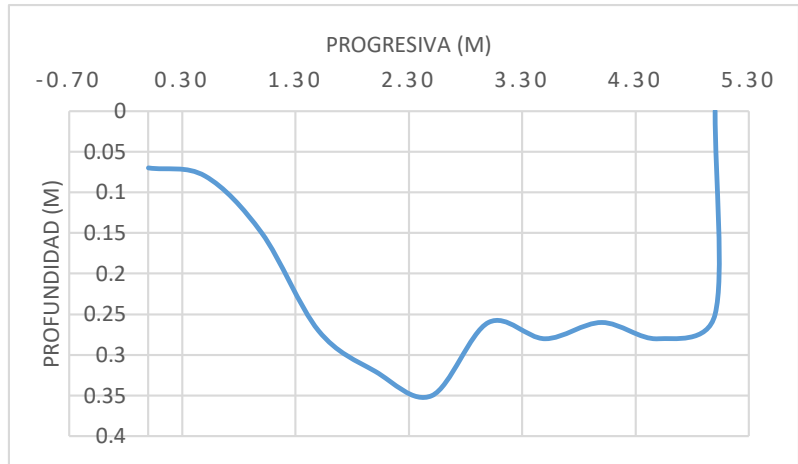


Figura 3. 10: Batimetría de la Sección Relevada para el cálculo de caudales con LSPTV y Molinete

El rango de velocidades medias obtenidas mediante el aforo por molinete para la sección transversal relevada, oscila entre 0.02 y 0.38 m/s mientras que el rango de velocidades medias obtenidas mediante el uso de la técnica LSPTV para la misma sección transversal oscila entre 0.24 y 0.33 m/s

El caudal resultante mediante la técnica de aforo con molinete es de 307 lts/seg, mientras que el caudal obtenido utilizando LSPTV es de 299 lts/seg respectivamente con una diferencia porcentual del 2.6%.

3.4.3 MEDICIÓN 10-07-2015

En la figura 3.11 se visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas donde el rango de velocidades superficiales para toda el área oscila entre 0.02 a 0.22 m/s.

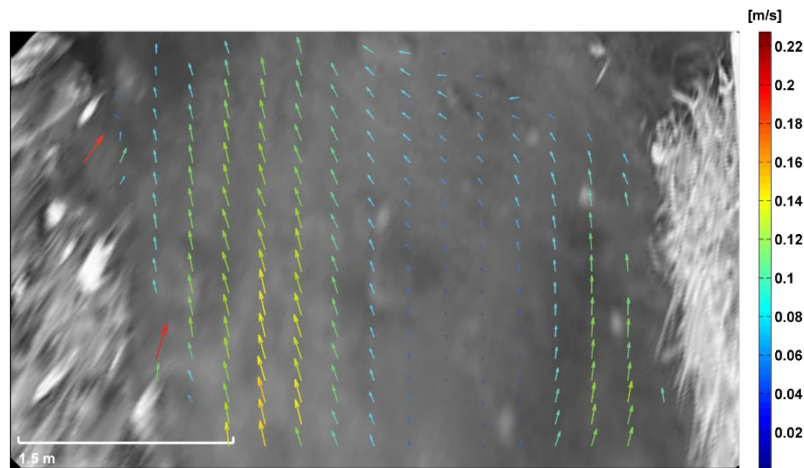


Figura 3. 11: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).

La sección transversal relevada en la tecnica LSPTV posee un ancho de 3.66 m con profundidades de entre 4 y 42 cm. (Figura 3.12)

La sección transversal relevada en la tecnica de aforo por molinete posee un ancho de 3.70 m con profundidades de entre 8 cm y 20 cm. (Figura 3.13)

Para el aforo del caudal se eligió una sección transversal fuera del area de utilización de LSPTV, debido a la imposibilidad de utilización del molinete por tener el área analizada velocidades por debajo del límite de aplicación del equipo.

Progesiva (m)	Profundidad (m)
0	0.08
0.8	0.12
1.3	0.14
1.8	0.13
2.3	0.1
2.8	0.2
3.3	0.11
3.7	0

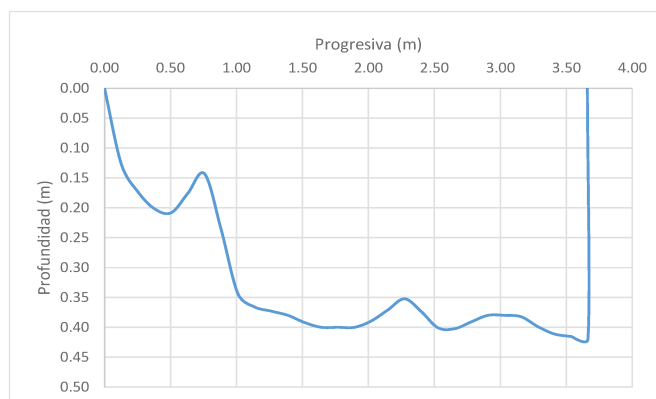


Figura 3. 12: Batimetría de la sección relevada para el cálculo de caudales con LSPTV

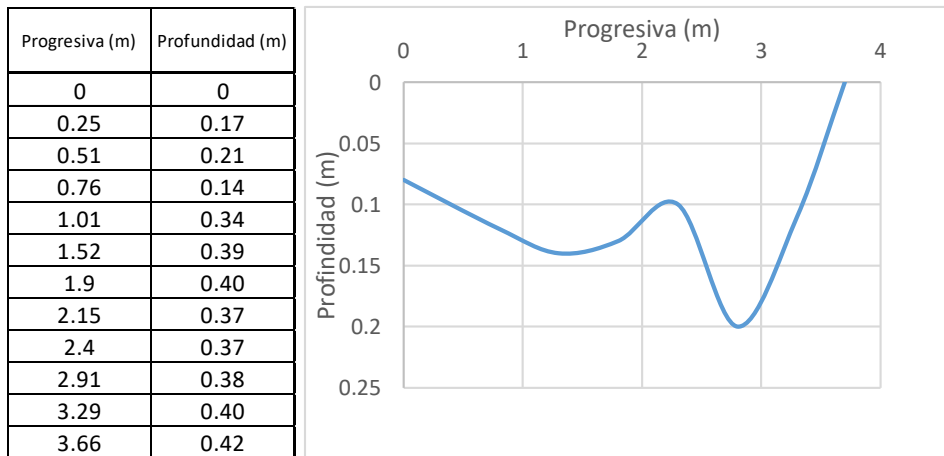


Figura 3. 13: Batimetría de la sección relevada para el cálculo de caudales con molinete hidrométrico

El caudal obtenido mediante la técnica de aforo con molinete es de 93 lts/seg, mientras que los caudales logrados utilizando LSPTV es de 81 lts/seg con una diferencia porcentual entre ambas técnicas de -12.9%.

3.4.4 MEDICIÓN 04-09-2015

En la figura 3.14 se visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas donde el rango de velocidades superficiales para toda el área analizada oscila entre 0.1 y 1 m/s.

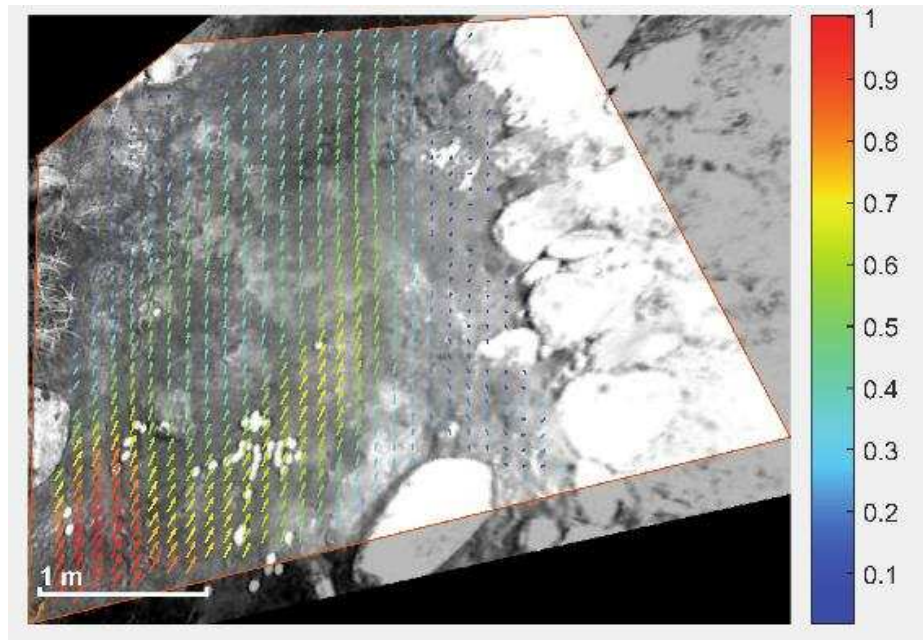


Figura 3. 14: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).

La sección transversal relevada es coincidente en ambas técnicas. La misma posee un ancho de 2.60 m y profundidades entre 0 y 22 cm. (Figura 3.15)

Progresiva (m)	Profundidad (m)
0	0
0.2	0.06
0.4	0.08
0.6	0.08
0.8	0.6
1	0.1
1.2	0.15
1.4	0.2
1.6	0.18
1.8	0.16
2	0.22
2.2	0.12
2.4	0.05
2.6	0.03

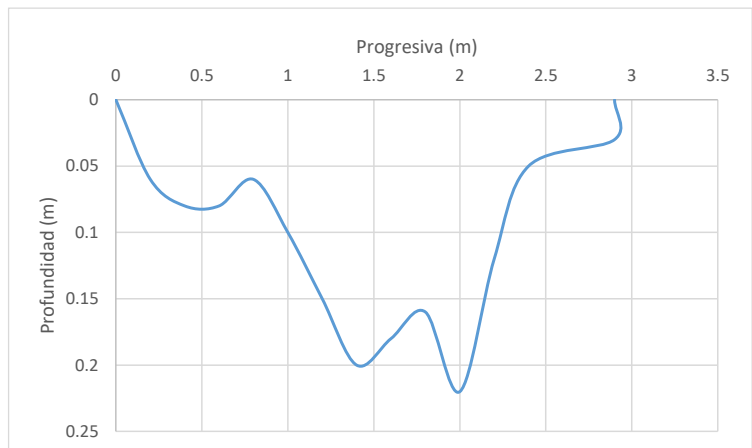


Figura 3. 15: Batimetría de la Sección Relevada para el Cálculo de caudales con LSPTV

El rango de velocidades medias obtenidas mediante el aforo por molinete para la sección transversal relevada, varían entre 0.07 y 0.58 m/s. mientras que para LSPTV el mismo varía entre 0.11 y 0.45 m/s

El caudal obtenido es de 93 lts/seg y 91 lts/seg mediante las técnica de aforo y LSPTV respectivamente, presentado una diferencia % entre ambas de -2.15 % .

3.4.4 MEDICIÓN 17-08-2017

En la figura 3.16 se visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas, donde el rango de velocidades superficiales para toda el área analizada oscila entre 0.05 a 0.5 m/s.

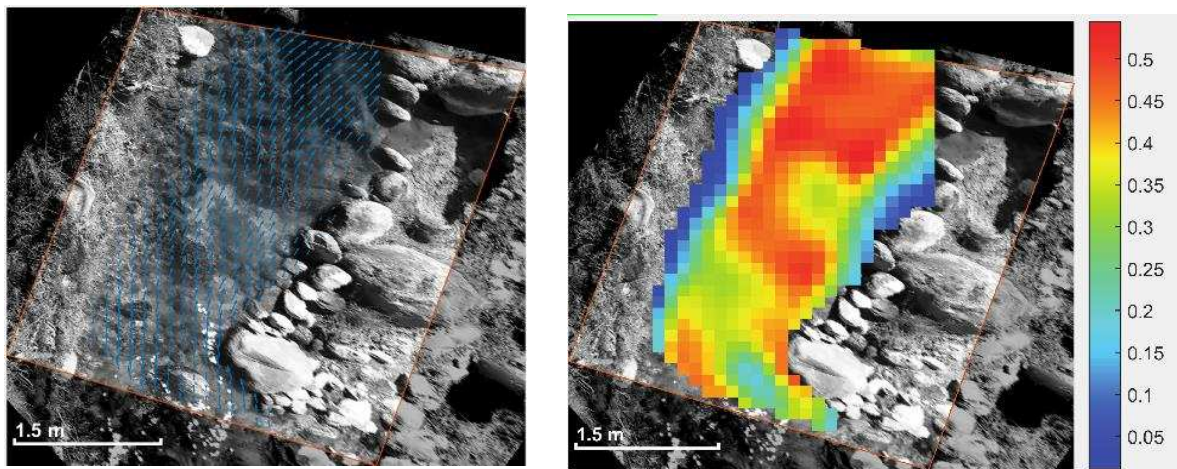


Figura 3. 16: Campos de velocidades medias de flujo interpolados (izquierda) y rango de velocidad adquirida (m/s) (derecha).

La sección transversal relevada es coincidente en ambas técnicas. La misma posee un ancho de 1.65 m y profundidades que varían entre 11 y 20 cm. (Figura 3.17)

Progresiva (m)	Profundidad (m)
0	0.13
0.15	0.15
0.3	0.2
0.45	0.17
0.6	0.14
0.75	0.16
0.9	0.14
1.05	0.15
1.2	0.14
1.35	0.15
1.5	0.13
1.65	0.11

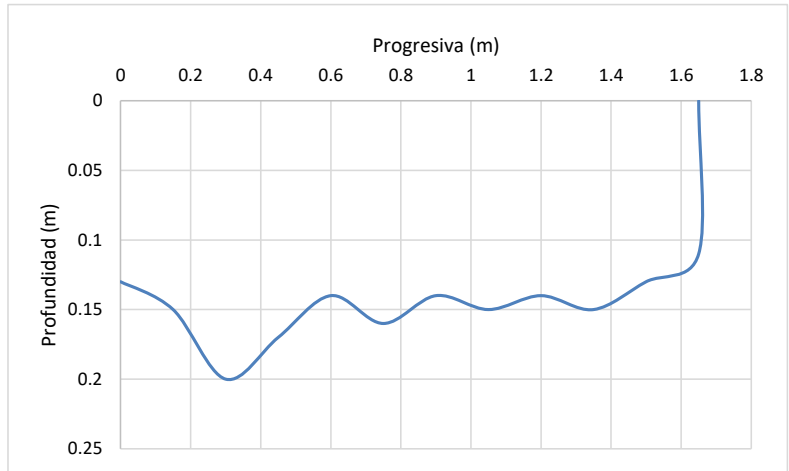


Figura 3. 17: Batimetría de la Sección Relevada para el cálculo de caudales con LSPTV

El rango de velocidades medias obtenidas mediante el aforo por molinete para la sección transversal relevada, varía entre 0.02 y 0.57 m/s.

El rango de velocidades medias obtenidas mediante el uso de la técnica LSPTV para la sección transversal relevada oscila entre 0.04 y 0.41 m/s

El caudal obtenido mediante la técnica de aforo con molinete es de 74 lts/seg, mientras que el caudal logrado utilizando LSPTV es de 82 lts/seg alcanzando entre ambas técnicas una diferencia porcentual de 10.81%.

3.4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para poder comparar las diferencias porcentuales obtenidas entre los valores de caudales estimados mediante LSPTV y la técnica de aforo con molinete es necesario considerar las incertidumbres asociadas a la implementación de ambas metodologías.

En primera instancia la determinación precisa del factor α es uno de los principales factores de incertidumbre al evaluar velocidad media desde las mediciones de la velocidad superficial, ya que causa un error multiplicativo y sistemático. Se ha mencionado

anteriormente que el factor $\alpha = 0.85$ propuesto para cuantificar el caudal mediante LSPTV es típicamente propuesto para canales naturales y presenta un error del orden del $\pm 5\%$ en la determinación del caudal erogado (Johnson et al. 2017).

Existen también incertidumbres en la cuantificación del caudal mediante el uso de molinete hidrométrico que radican principalmente en la calibración adecuada del equipo y la forma de realización de la técnica in situ (medición de la profundidad del cauce en la progresiva, colocación del velocímetro en forma perpendicular a la corriente, cantidad de puntos de medición, etc.)

La implementación de LSPTV para la determinación del campo de velocidad superficial del flujo está afectada por diferentes fuentes de incertidumbres que están siendo objeto de estudio de varias investigaciones entre las cuales podemos citar: la iluminación y posición de la cámara en el momento de la medición, la cantidad de imágenes extraídas del video, la orto rectificación de los resultados, etc.

En relación a lo expuesto, las diferencias porcentuales del orden del 13 % conseguida entre ambas técnicas validan los resultados obtenidos para la cuantificación del caudal mediante el uso de LSPTV.

3.5 FUENTES DE ERRORES DETECTADAS

Las principales fuentes de errores detectadas en la implementación de la técnica LSPTV para estimar caudales de agua superficiales en cursos fluviales fueron:

-La iluminación: se observaron efectos negativos de la reflexión de la luz del Sol sobre la superficie del agua que pudo perturbar los algoritmos de detección de partículas. Para disminuir los efectos de esta fuente de error se buscó la mejor posición de la cámara.

- La siembra de las partículas: Las partículas sembradas aguas arriba del tramo de medición, tendían a entrar en las zonas de mayores velocidades por lo que muchas veces quedaban tramos de la sección transversal sin ser caracterizados, tal fue el caso de las orillas.

- La técnica de procesamiento de las coordenadas de las partículas detectadas y extracción de la velocidad del flujo en tiempo y espacio.

- El valor del factor α adoptado. Éste coeficiente relacionó la velocidad superficial y la velocidad media del flujo en función de la geometría de la sección, la pendiente del tramo, la rugosidad del fondo, y la configuración aguas arriba y aguas abajo del tramo, en este aspecto existen varias investigaciones que estiman este factor en función de las características del flujo y que pueden ser usadas como referencia.

CAPÍTULO 4: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CAUDALES DE CRECIDAS (MÁXIMOS HIDROLÓGICOS) MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPIV EN EL RÍO DEL VALLE, DPTO AMBATO, PROVINCIA DE CATAMARCA.

4.1 INTRODUCCION

En el desarrollo de éste capítulo se describe la implementación a gran escala de la técnica no intrusiva de Velocimetría por Imágenes de Partículas (LSPIV) para cuantificar el escurrimiento de aguas superficiales durante el periodo de crecidas en el río Del Valle, ubicado en el departamento Ambato, provincia de Catamarca.

4.2 SITIOS DE MEDICIÓN

El Río del Valle nace en el Norte de la Sierra del Ambato. Sus aguas se embalsan en el Dique Las Pirquitas distribuyéndose desde allí por una inmensa red de canales. Hacia el Sur el agua reaparece en algunos tramos de su curso por afloramiento de napas subterráneas hasta recibir, por su margen derecha, el aporte del arroyo Fariñango, que nace de la confluencia del Choya y el San Lorenzo (arroyos de caudales temporarios) y por la misma margen le entrega sus aguas (temporariamente) el arroyo La Florida, que es el que alimenta al dique El Jumeal. Al Sur de la Ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca recibe al

río Ongolí (siempre por la margen derecha). Por la margen opuesta le entrega sus aguas el Río Paclín que sigue aproximadamente la dirección de la Sierra de Ancasti. (Gioria, 2006).

El lugar elegido para la aplicación de LSPIV que se reporta en este trabajo, se seleccionó en función de lograr la mayor precisión de la técnica. Este sitio, es una sección del río del Valle caracterizado en el párrafo anterior, que se encuentra ubicado en la localidad de Huaycama, departamento Ambato, aproximadamente a 40 km de la ciudad Capital. En las inmediaciones de la sección adoptada, se emplaza una escala limnimétrica perteneciente a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de Nación, quien proporciona a la provincia los datos de caudales escurridos.

En el tramo seleccionado existe un puente colgante de aproximadamente 5 metros de altura (Figura 4.1). Las filmaciones requeridas para implementar LSPIV se realizaron desde la parte superior del puente y sobre el margen lateral izquierdo del cauce.



Figura 4. 1: Lugar de las mediciones con LSPIV

Los caudales obtenidos mediante LSPIV se determinaron bajo la hipótesis de que la sección transversal del área de estudio se mantenía fija en el tiempo o con variaciones del fondo del cauce despreciables. Para ello se realizó un levantamiento topográfico del perfil transversal el 4 de septiembre del 2015, donde el área inundada para una altura de escala de 1.80 metros fue de 22.849 m², repitiéndose ésta tarea el 28 de diciembre del 2016 arrojando un área inundada 22.294 m² para la misma altura de escala. Con una diferencia entre ambos relevamientos de 0.555 m² la hipótesis de la invarianza del fondo del cauce puede considerarse válida. (Figura 4.2)

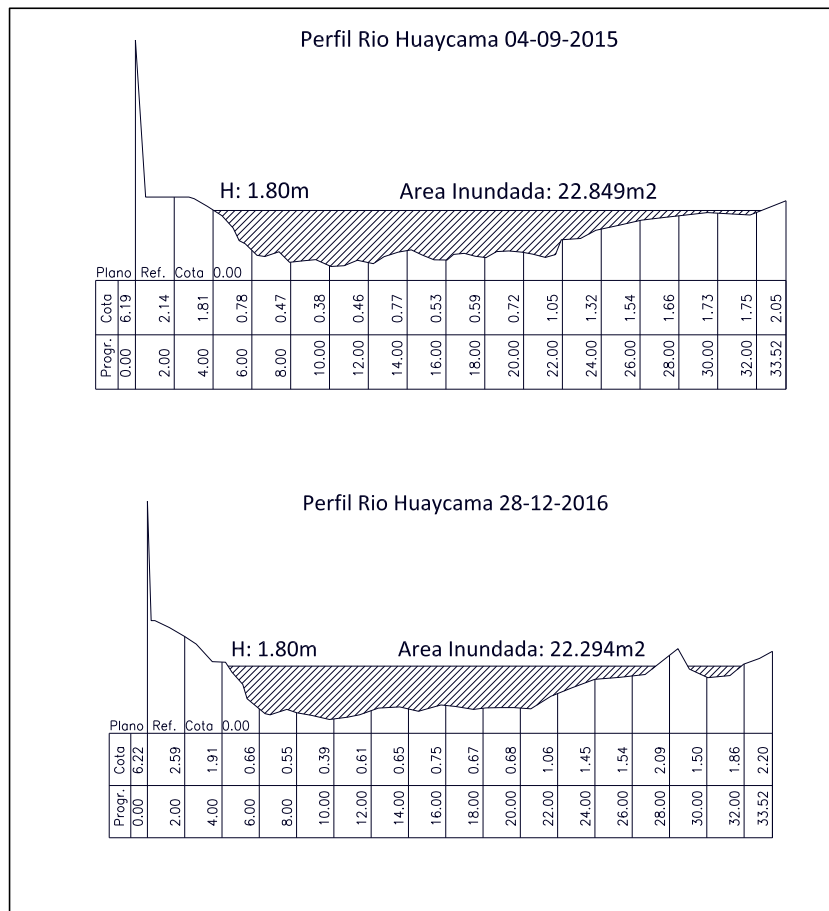


Figura 4. 2: Comparación de áreas inundadas entre perfiles transversales.

4.3 METODOS EXPERIMENTALES

En total se realizaron 7 campañas en diferentes fechas. En todas se utilizaron como trazadores, las ondulaciones visibles del flujo producto de la turbulencia bajo la suposición que, si visualmente se puede distinguir un patrón en el flujo, ese mismo patrón puede analizarse para determinar los campos de velocidades superficiales (Figura 4.3).



Figura 4. 3: Ondulaciones Visibles del flujo – Medición 14/01/2016 -
Altura de escala 3.5 m.

Los caudales resultantes mediante LSPIV se contrastaron con los caudales medidos desde junio del 2010 a diciembre del 2016 en la estación fija de aforo que se encuentra en la sección de medición, manejada por la empresa EVARSA para la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Para la filmación de los videos se adoptaron, según las condiciones imperantes en el momento de la medición, dos posiciones. La primera, quedó definida por la ubicación de la cámara arriba del puente peatonal, y por más que la misma se ubicó apuntando hacia abajo, es notable la oblicuidad con respecto al plano de la superficie del agua (Figura 4.4). La segunda posición quedó definida por la ubicación de la cámara en forma lateral al plano de

la superficie del agua (margen izquierdo del río). En ambos casos los resultados obtenidos con LSPIV fueron corregidos para rectificar las coordenadas de la imagen a una proyección ortogonal (Figura 4.5).



Figura 4. 4: Imagen extraída del video tomado sobre el puente peatonal (sector centro) (fecha de medición 14-01-2016)



Figura 4. 5: Imagen extraída del video tomado sobre margen lateral izquierda del río (fecha de medición 01-02-2016)

La tabla 4.1 muestra para las mediciones realizadas en las distintas fechas, la sección y ubicación de la cámara, la resolución, duración y fps (imágenes por segundo) del video filmado, la cantidad de imágenes extraídas por segundos y la altura de escala asociada en el momento de la medición.

Fecha de Medición	Calidad de Fotograma del Video	Duración del Video	Duración Extraída para Análisis	fps. del video por defecto	fps. (Cantidad de imágenes extraídas por segundo)	Ubicación de la Cámara	Altura de Escala Limnimétrica (m)
14/01/2016	1280*720	00:01:22	00:00:24	15	15	Sobre el puente peatonal (sector centro)	3.5
01/02/2016	1280*720	00:01:02	00:00:34	29	29	Margen Lateral Izquierdo	1.4
07/02/2016	1280*720	00:01:03	00:00:33	15	15	Margen Lateral Izquierdo	1.8
13/02/2016	1280 * 720	00:01:19	00:00:34	15	15	Margen Lateral Izquierdo	1.6
08/03/2017	1920*1080	00:01:31	00:00:30	29	29	Margen Lateral Izquierdo	2.4
01/04/2017	1920*1080	00:01:06	00:00:30	29	15	Sobre el puente peatonal (sector lateral derecho)	3.2
01/04/2017	1920*1080	00:01:08	00:00:30	29	15	Sobre el puente peatonal (sector lateral derecho)	3.6

Tabla 4.1: Características del video e imágenes extraídas para las distintas mediciones

Una vez extraídas las imágenes, en cada campaña se implementó la secuencia metodológica detallada en el capítulo 2 para las etapas de: pre procesamiento, procesamiento y de orto-rectificación y post procesamiento de los resultados.

4.4 RESULTADOS

4.4.1 MEDICIÓN 14-01-2016 ALTURA DE ESCALA 3.50 METROS

En la figura 4.6 se visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas donde el rango de las mismas, oscilan en el orden de 1 a 10 m/s para toda el área de interés.

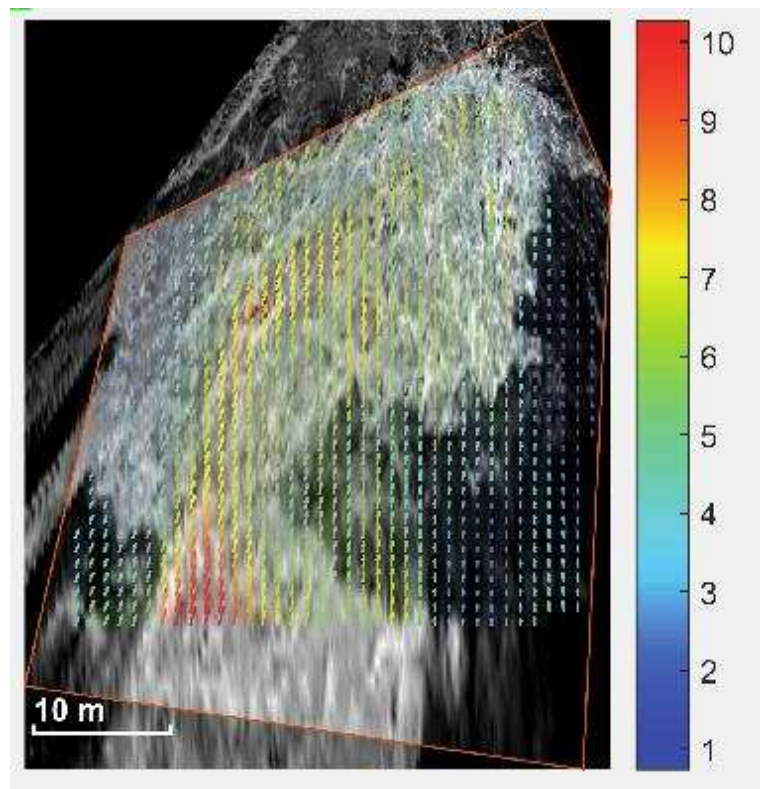


Figura 4. 6: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s) para toda el área de interés. (H= 3.50 m)

La sección transversal relevada (Figura 4.7) posee un ancho de 44 m con profundidades de entre 1.39 m y 3.50 m. (Figura 4.8)

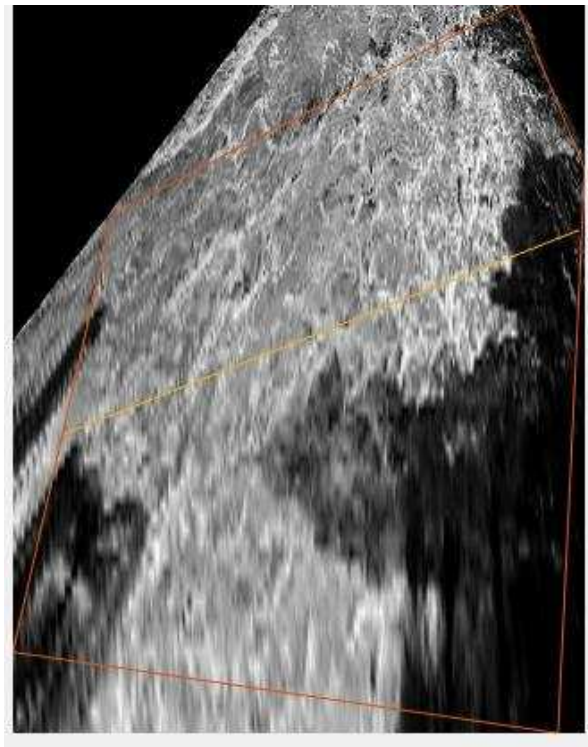


Figura 4. 7: Ubicación de la sección transversal relevada para el Cálculo del caudal mediante LSPIV. (H = 3.50 m)

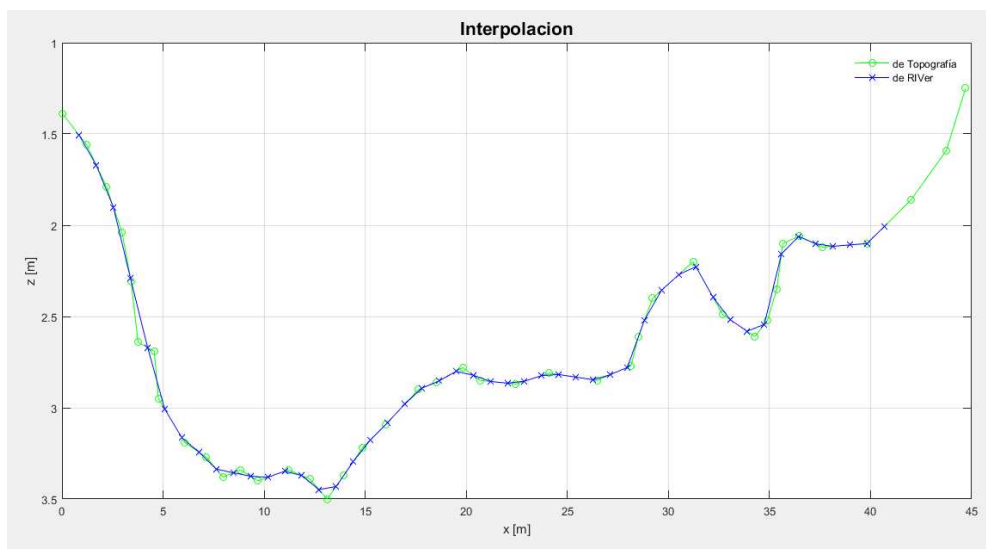


Figura 4. 8: Batimetría de la sección transversal. (H = 3.50 m)

El rango de velocidades superficiales ajustadas con un factor $\alpha = 0.80$ para la sección transversal relevada oscila entre 0.73 y 4.8 m/s

El caudal obtenido mediante el uso de LSPIV para una altura de escala de 3.50 m es de $Q = 378.32 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.4.2 MEDICIÓN 01-02-2016 ALTURA DE ESCALA 1.40 METROS

En la figura 4.9 se visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas para un rango que oscila en el orden de 0.2 a 1.2 m/s para toda el área de interés.

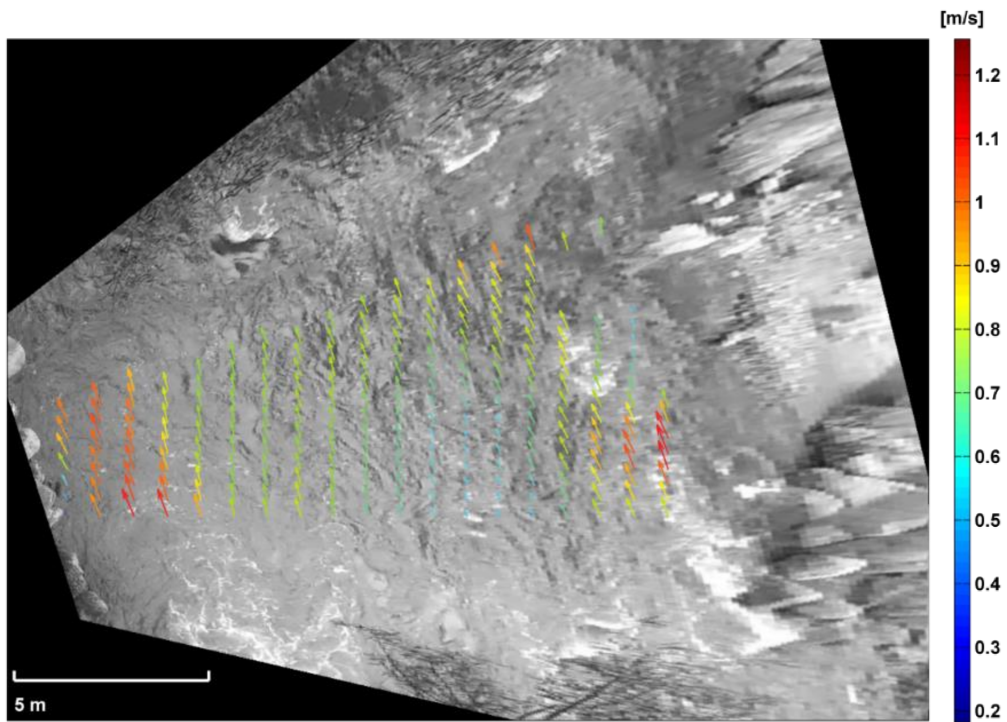


Figura 4. 9: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).
($H = 1.40 \text{ m}$)

La sección transversal relevada (Figura 4.10) posee un ancho de 20 m con profundidades de entre 0.05 y 1.11 m. (Figura 4.11)

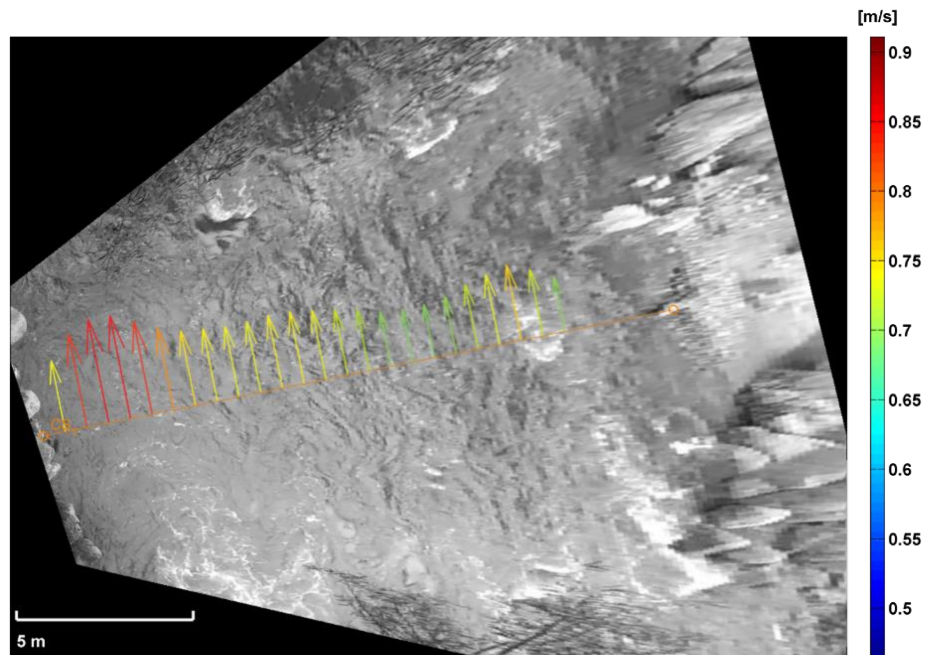


Figura 4. 10: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV y campo de velocidades superficiales obtenidas para esa sección. (H = 1.40 m)

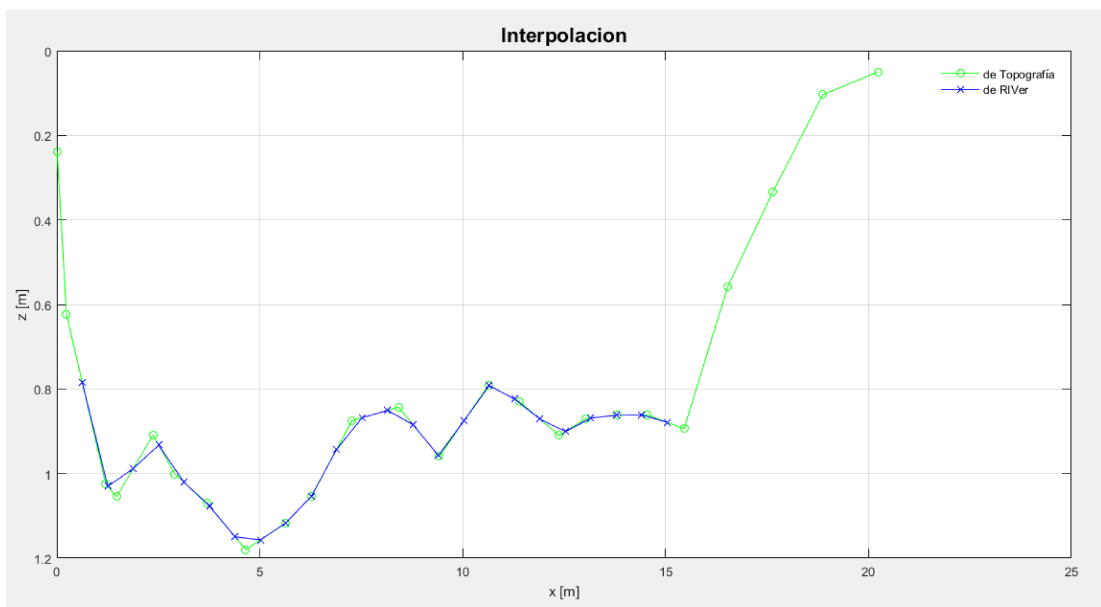


Figura 4. 11: Batimetría de la sección transversal. (H = 1.40 m)

El rango de velocidades superficiales ajustadas con un factor $\alpha = 0.80$ para la sección transversal relevada oscila entre 0.37 y 0.72 m/s

El caudal obtenido mediante el uso de LSPIV para una altura de escala de 1.40 metros es de $7.55 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.4.3 MEDICIÓN 07-02-2016 ALTURA DE ESCALA 1.80 METROS

La figura 4.12 visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas para un rango del área de interés que oscila entre 0.8 y 2.5 m/s.

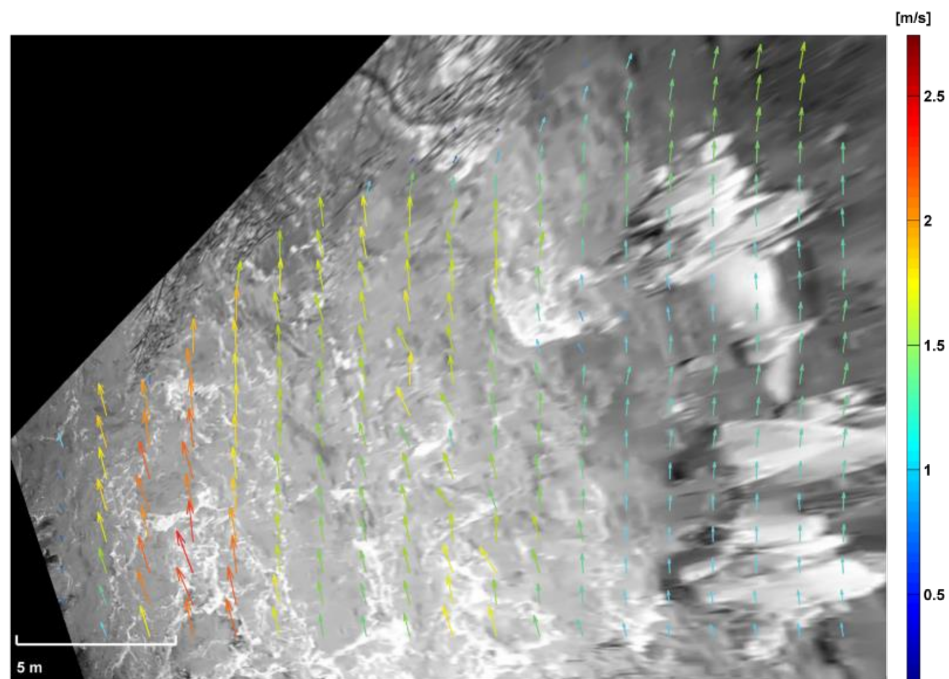


Figura 4. 12: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).
($H = 1.80 \text{ m}$)

La sección transversal relevada (Figura 4.13) posee un ancho de 21 m con profundidades de entre 0.05 y 1.60 m. (Figura 4.14)

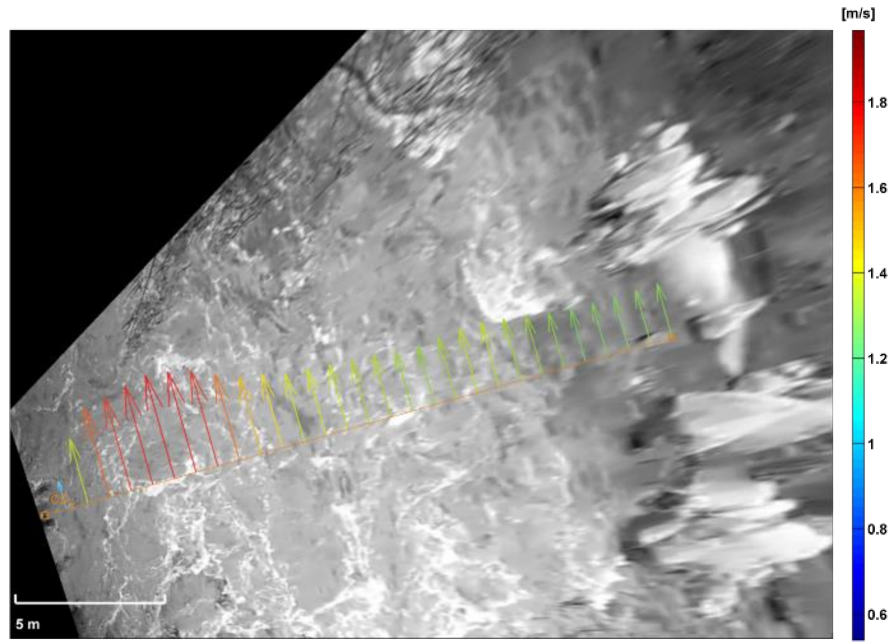


Figura 4. 13: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV y campo de velocidades superficiales obtenidas para esa sección. (H = 1.80m)

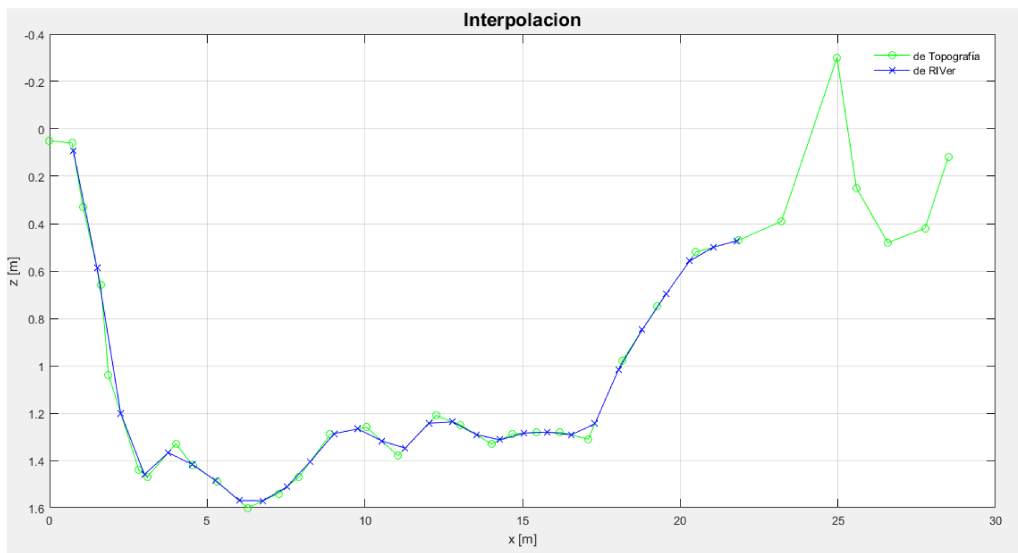


Figura 4. 14: Batimetría de la sección transversal. (H = 1.80m)

El rango de velocidades superficiales ajustadas con un factor $\alpha = 0.80$ para la sección transversal relevada oscila entre 0.07 y 1.25 m/s

El caudal obtenido mediante el uso de LSPIV para una altura de escala de 1.80 metros es de 27.40 m³/s.

4.4.4 MEDICIÓN 13-02-2016 ALTURA DE ESCALA 1.60 METROS

La figura 4.15 visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas para el rango del área de interés que oscila entre 0.2 y 1.8 m/s.

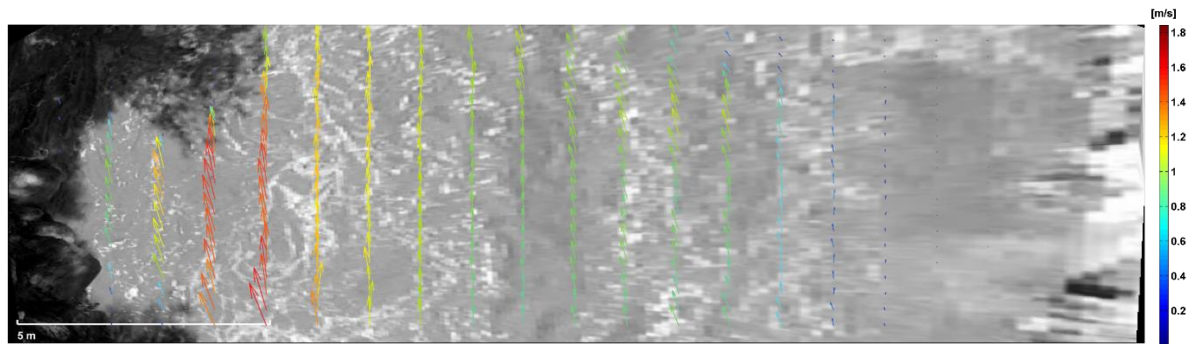


Figura 4. 15: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).
(H = 1.60 m)

La sección transversal analizada (Figura 4.16) posee un ancho de 22.6 m con profundidades de entre 0.05 y 1.40 m. (Figura 4.17)

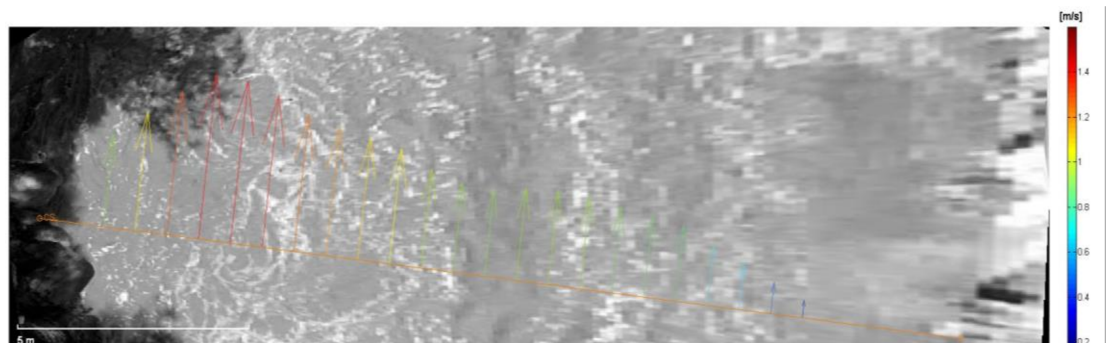


Figura 4. 16: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV y campo de velocidades superficiales obtenidas para esa sección.
(H = 1.60 m)

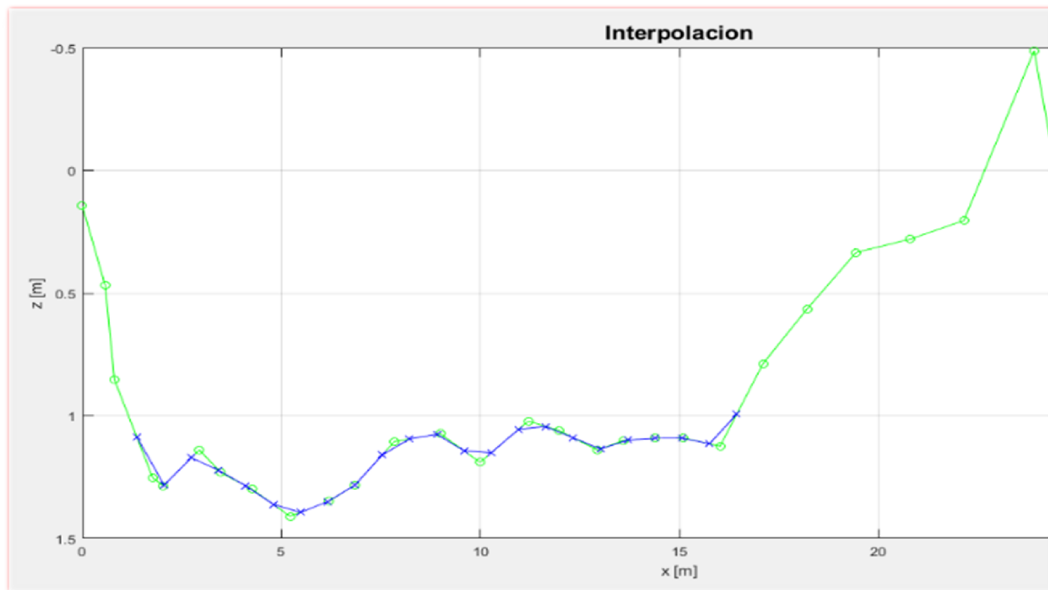


Figura 4. 17: Batimetría de la sección transversal ($H = 1.60$ m)

El rango de velocidades superficiales ajustadas con un factor $\alpha = 0.80$ para la sección transversal relevada oscila entre 0.13 y 1.28 m/s

El caudal obtenido mediante el uso de LSPIV para una altura de escala de 1.60 metros es de 14.74 m³/s

4.4.5 MEDICIÓN 08-03-2017 ALTURA DE ESCALA 2.40 METROS

La figura 4.18 visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas para el rango del área de interés que oscila entre 0.5 y 5 m/s.

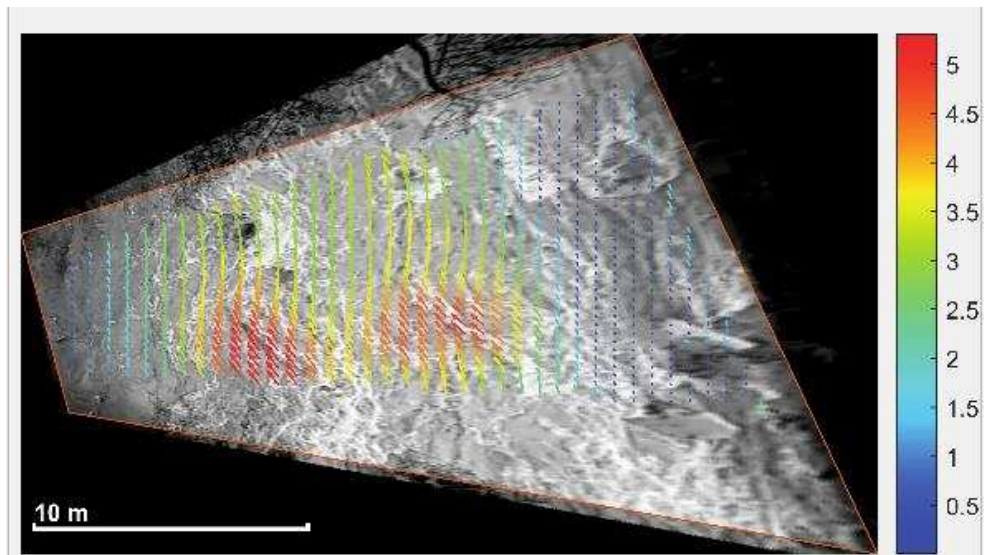


Figura 4. 18: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).
(H = 2.40 m)

La sección transversal analizada (Figura 4.19) posee un ancho de 37 m con profundidades de entre 0 y 2.40 m. (Figura 4.20)

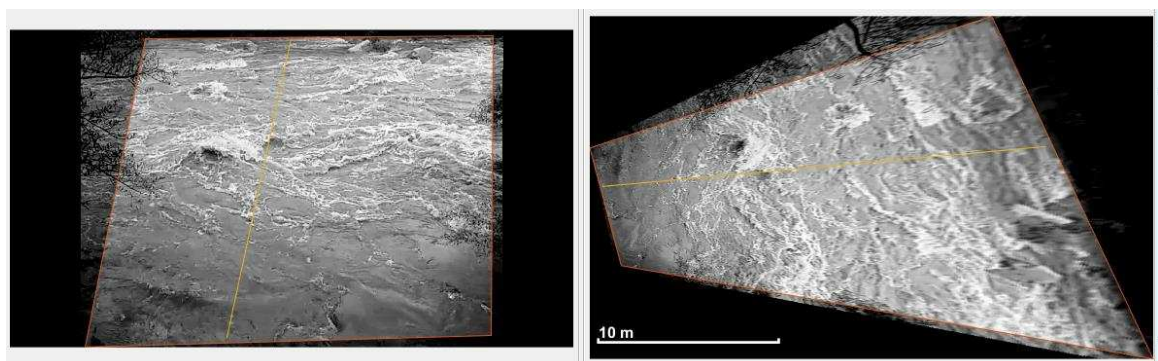


Figura 4. 19: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV - Imagen original (izquierda) – Imagen rectificada (derecha).
(H = 2.40 m)

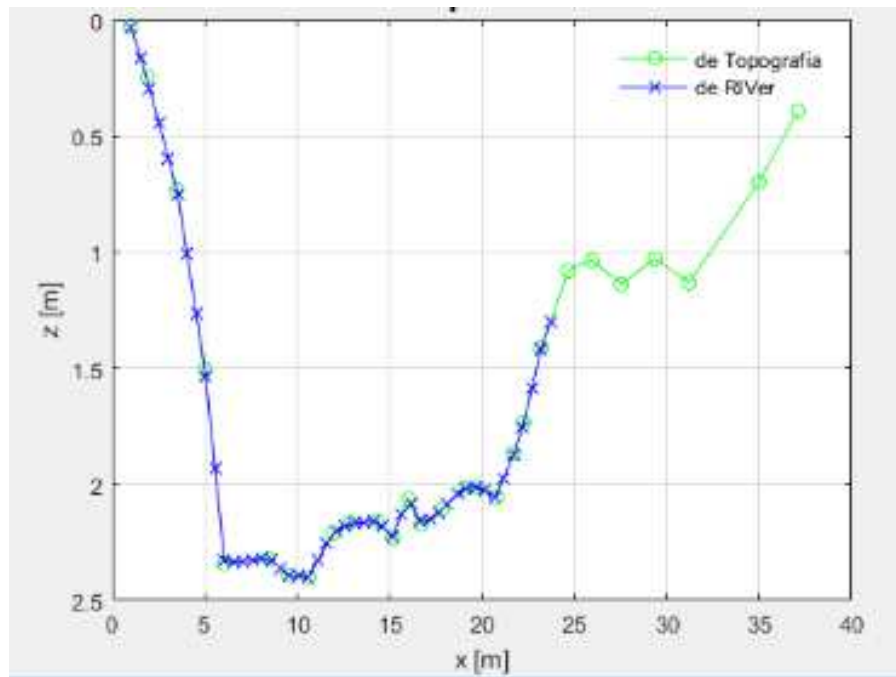


Figura 4. 20: Batimetría de la sección transversal. (H = 2.40 m)

El rango de velocidades superficiales ajustadas con un factor $\alpha = 0.80$ para la sección transversal relevada oscila entre 0.29 y 2.87 m/s

El caudal obtenido mediante el uso de LSPIV para una altura de escala de 2.40 m es de 90.64 m³/s

4.4.6 MEDICIÓN 01-04-2017 ALTURA DE ESCALA 3.20 METROS

La figura 4.21 visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas para un rango del área de interés que oscila entre 0.8 y 9 m/s.

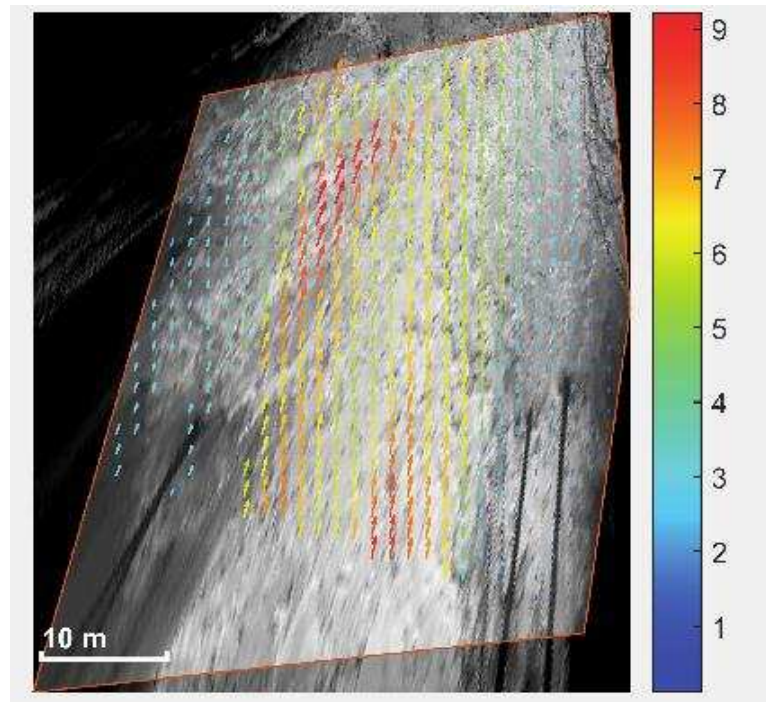


Figura 4. 21: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).
(H = 3.20 m)

La sección transversal analizada (Figura 4.22) posee un ancho de 45 m con profundidades de entre 0.95 y 3.15 m. (Figura 4.23)

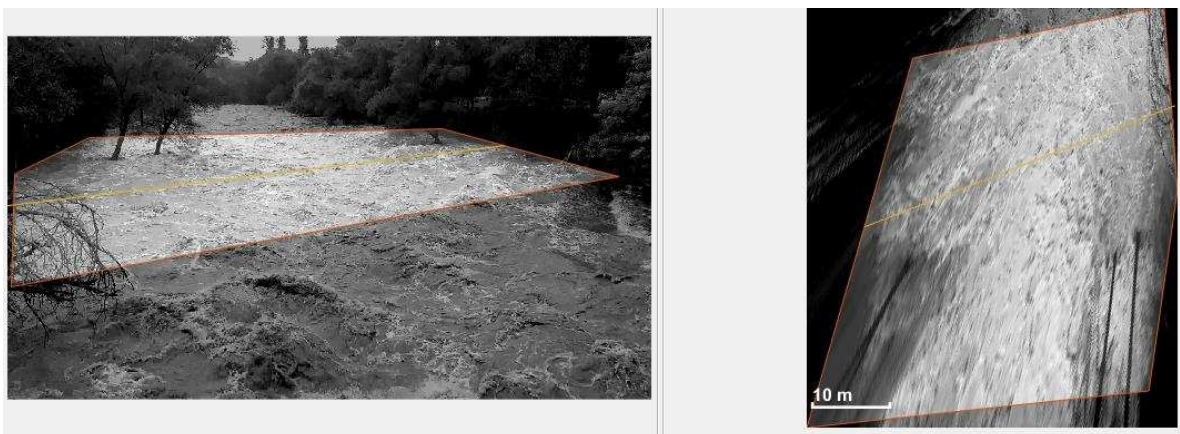


Figura 4. 22: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV - Imagen original (izquierda) – Imagen rectificada (derecha).
(H = 3.20 m)

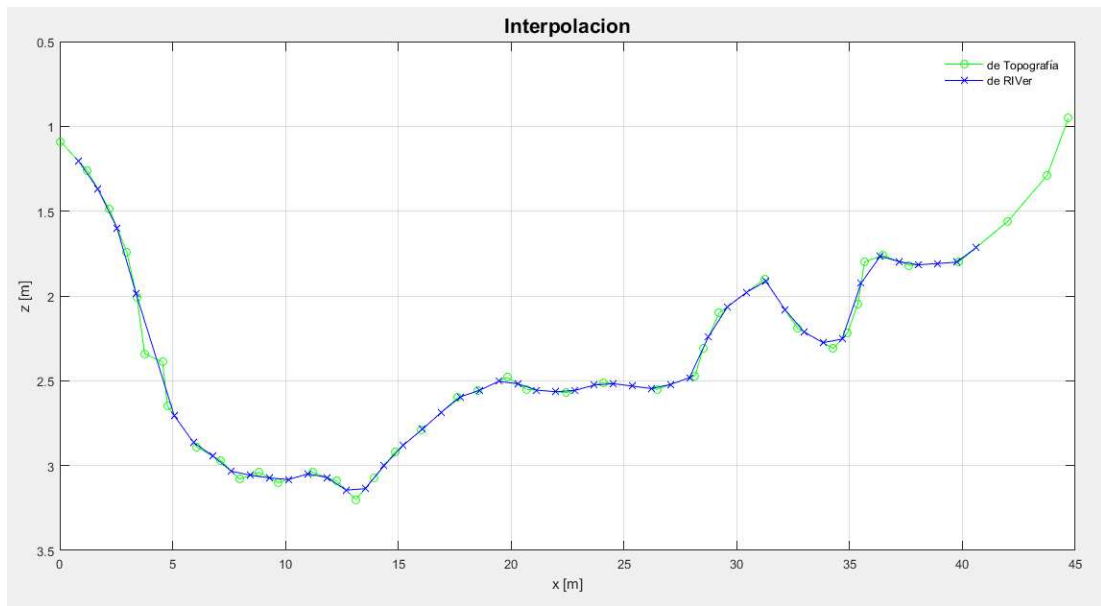


Figura 4. 23: Batimetría de la sección transversal. (H = 3.20 m)

El rango de velocidades superficiales ajustadas con un factor $\alpha = 0.80$ para la sección transversal relevada oscila entre 0.37 y 5.12 m/s

El caudal obtenido mediante el uso de LSPIV para una altura de escala de 3.20 m es de 321.97 m³/s

4.4.7 MEDICIÓN 01-04-2017 ALTURA DE ESCALA 3.60 METROS

La figura 4.24 visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas para un rango del área de interés que oscila entre 1.5 y 9.5 m/s.

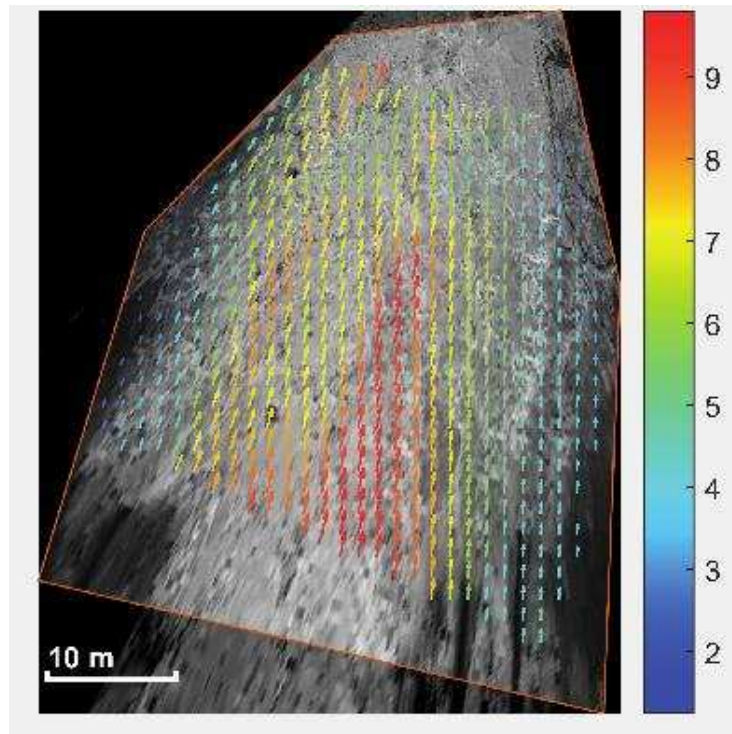


Figura 4. 24: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).
($H = 3.60$ m)

La sección transversal analizada (Figura 4.25) posee un ancho de 47 m con profundidades de entre 0.09 y 3.55 m. (Figura 4.26)

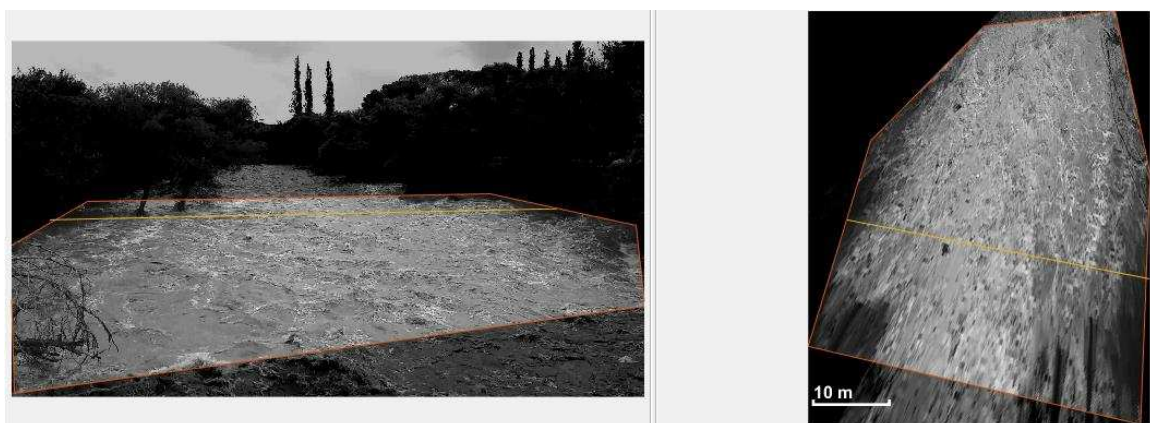


Figura 4. 25: Ubicación de la sección transversal relevada para el cálculo del caudal mediante LSPIV - Imagen original (izquierda) – Imagen rectificada (derecha).
($H = 3.60$ m)

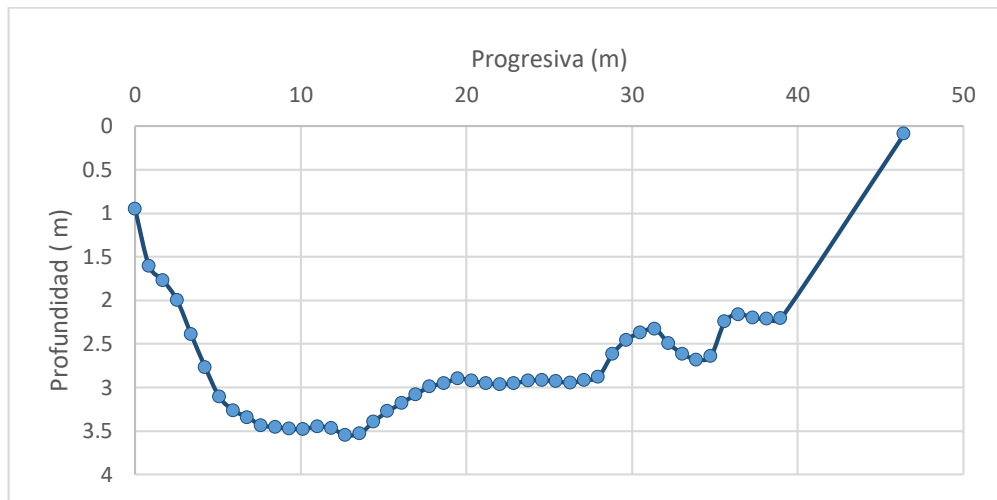


Figura 4. 26: Batimetría de la sección transversal. (H = 3.60 m)

El rango de velocidades superficiales ajustadas con un factor $\alpha = 0.80$ para la sección transversal relevada oscila entre 1.50 y 6.50 m/s

El caudal obtenido mediante el uso de LSPIV para una altura de escala de 3.60 m es de 476.71 m³/s

4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para validar la implementación de la técnica LSPIV en la determinación de caudales de crecidas se utilizaron los valores de caudales oficiales registrados para distintas alturas de la escala limnimétrica ubicada en la sección de análisis y perteneciente a la SSRHN. Esta estación forma parte de la red hidrológica nacional y son suministrados a las provincias por dicha institución. La determinación de los caudales en la estación hidrométrica de SSRHN es realizada con molinete en la sección del puente colgante ubicado en la zona de análisis y vinculados a las alturas de la escala anteriormente citada.

La figura 4.27 muestra el rango de caudales aforados desde Junio del 2010 hasta Diciembre del 2016 publicados en la Red Hidrológica Nacional (Publicaciones Hidrometeorológicas 2017) y las mediciones de LSPIV de diferentes eventos ocurridos entre los años 2016 y 2017. En la misma se visualiza que el rango de mediciones mediante el método de aforo convencional es reducido encontrándose sólo valores de caudales asociados a alturas de escalas entre 0.95 y 1.91 metros, mientras que con la técnica LSPIV se obtuvieron caudales para alturas de escalas considerablemente superiores (1.40 m a 3.60 m).

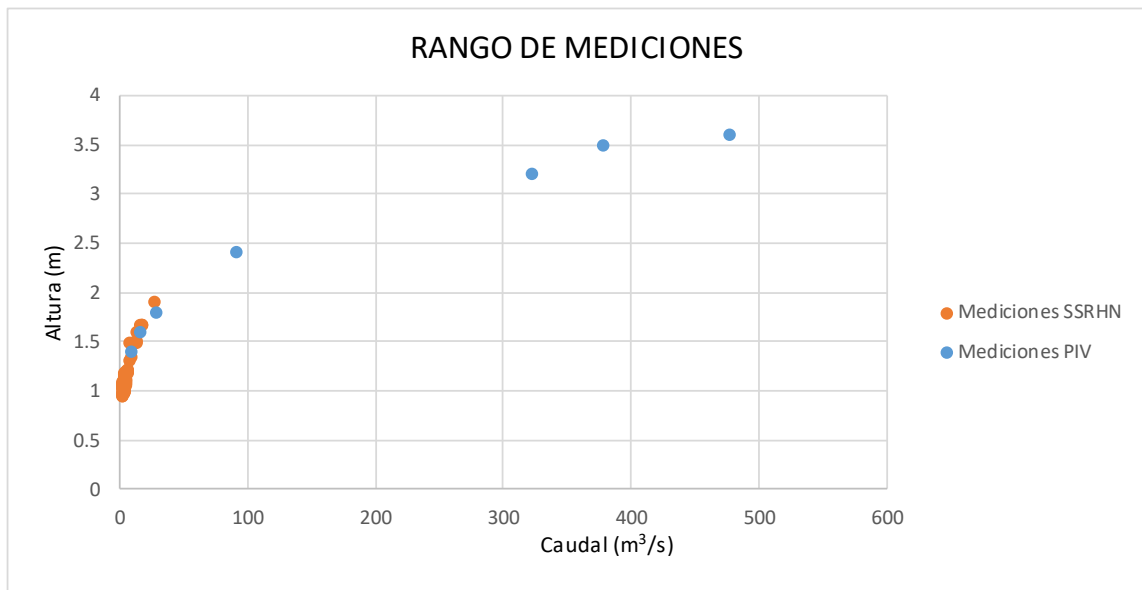


Figura 4. 27: Comparación entre Rango de Mediciones

Con los valores H-Q proporcionados por la SSRHN se procedió a desarrollar interpoladores por ajustes estadísticos mediante ecuaciones matemáticas (con fundamento hidráulico) del tipo:

$$Q = \alpha(H - H_{Q0})^\beta = \alpha \Delta H^\beta \tag{4.1}$$

Donde α y β son constantes de calibración, H es el nivel o altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia y H_{Q0} es un parámetro que representa la altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento. (Figura 4.28)

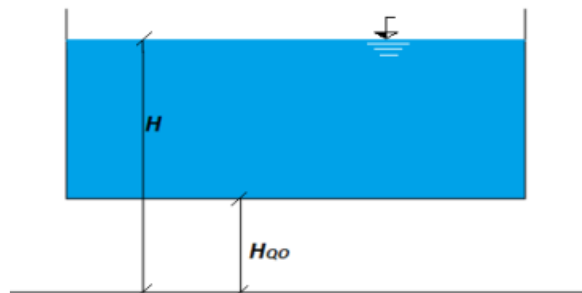


Figura 4. 28: Esquema de un canal rectangular donde se representa al nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo (H_{Q0}) (tomada de Díaz 2014)

La tabla 4.2 muestra los parámetros de la ecuación 4.1 ajustados estadísticamente en una primera aproximación considerando un $H_{Q0} = 0$ asumiendo así que el nivel de referencia coincide con el nivel 0 y utilizando únicamente como variable independiente el valor del nivel observado en la escala durante la medición del caudal.

Sección	α	β
Escala Huaycama río del Valle - puente colgante	1.8542	4.2532

Tabla 4. 2: Parámetros calibrados de la curva H-Q en la sección de estudio asumiendo un $H_{Q0}=0$

En una segunda aproximación, finalmente seleccionada en esta tesis, se procedió a determinar el parámetro H_{Q0} de forma tal que represente un comportamiento hidráulico adecuado, con un exponente β del orden de $5/3$ para los caudales relevados. La figura 4.29 visualiza el ajuste realizado y la tabla 4.3 presenta los parámetros encontrados.

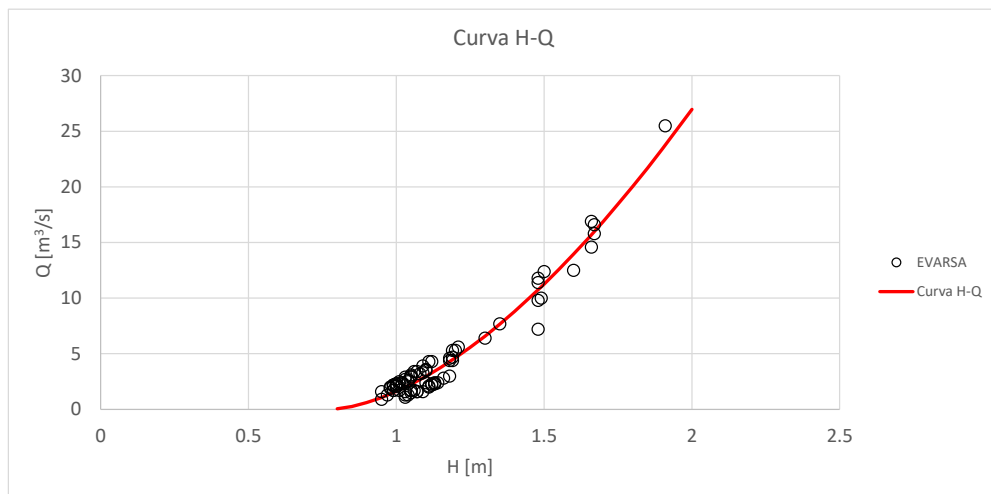


Figura 4. 29: Curva (H-Q) determinada en función del comportamiento hidráulico del cauce según los datos de SSRHN

Sección	α	β	H_{Q0} (m)
Escala Huaycama río del Valle - puente	19.22	1.67	0.779

Tabla 4. 3: Parámetros de la ecuacion 4.1 calibrados que representan el comportamiento hidráulico del cauce

La ecuación con base teórica de la curva determinada está dada por:

$$Q = 19.22 * (H - 0.779)^{1.67} \quad (4.2)$$

El valor de caudal nulo $H_{Q0} = 0.779$ fue verificado in situ encontrándose el cero de la escala enterrado 0.7 metros (dato medido en campo y constatado posteriormente por el observador de la escala). La corroboración in situ del H_{Q0} demuestra que la ecuación H-Q encontrada es representativa del comportamiento hidraulico del cauce en la sección de análisis.

De la bibliografía consultada la relación $\alpha = U_b/U_s$ entre la velocidad superficial del flujo (U_s), y la correspondiente velocidad media en la profundidad (U_b), puede variar ampliamente y tienen principal influencia en los resultados. Anteriormente se ha mencionado que valores de $\alpha = 0.85$ para canales naturales y $\alpha = 0.90$ para canales de concreto son típicamente propuestos. Experimentos recientes han demostrado que el valor preciso de la relación de velocidades es un parámetro específico del sitio de medición, dependiente del número de Reynolds, de la profundidad del flujo, de la relación de aspecto del canal, y de la rugosidad relativa del lecho. Por ejemplo, en flujos con vegetación sumergida se han medido valores tan bajos como $\alpha = 0.397$ (Gunawan et al. 2012), mientras que flujos intensos en arroyos de montaña arrojan valores en el rango $\alpha = 0.75-0.83$ (Jodeau et al. 2008), característica de este caso de estudio por lo que para la elección del α se verificó el mejor

ajuste a la curva (H-Q) encontrada para un rango de α de entre 0.75 y 0.85 adoptando como mejor ajuste un valor de $\alpha = 0.80$.

La tabla 4.4 muestra el ajuste obtenido entre la curva H-Q determinada según los valores proporcionados por la SSRHN y LSPIV hasta una altura de H= 1.80 donde la diferencia % obtenida entre la ecuación teórica y LSPIV para H= 1.40 y 1.60 valida los valores de caudales obtenidos mediante LSPIV.

H [m]	QLSPIV [m ³ /s]	Ecuacion Teórica [m ³ /s]	Diferencia %
1.4	7.55	8.69	15.07
1.6	14.74	13.84	-6.14
1.8	27.40	19.90	-27.38

Tabla 4. 4: Diferencias Porcentuales obtenidas entre la ecuación con base teórica y LSPIV

En el análisis de los datos de altura de superficie libre- caudal proporcionados por SSRHN (Tabla 4.5) se visualiza que existe una gran variación del caudal obtenido entre las diferentes mediciones realizadas con la misma metodología y para una misma altura de escala, duplicando en algunos casos su valor. Esto puede deberse a la influencia de las incertidumbres y los errores introducidos debido a la medición de la profundidad, calibración del equipo, posición de la hélice del molinete con respecto al flujo, etc.

Fecha de Medición	H (m)	Q (m ³ /seg)
06/07/2010	1.03	1.6
10/12/2010	1.03	1.1
10/08/2011	1.03	2.9
14/01/2014	1.03	2.7
15/11/2016	1.03	1.3

Tabla 4. 5: Variación del caudal para una misma altura de superficie de agua libre

Teniendo en cuenta esto, la curva H-Q se determina mediante el mejor ajuste de todos los valores obtenidos en sucesivas mediciones. En nuestro caso de estudio el rango de H oscila principalmente entre 0.95 y 1.67 (varias mediciones para ese H), contando con un solo dato de caudal de H= 1.91.

La diferencia porcentual del -27.38 % obtenida entre la ecuación con base teórica de H-Q y LSPIV para H= 1.80 m da evidencia de la falta de datos para el ajuste de la curva en rango superiores a H= 1.67 m por lo que afirma aún mas la necesidad de contar con valores de caudales medidos en rangos superiores, y la realización de mas mediciones.

Asumiendo que las expresiones obtenidas del ajuste estadístico son solo válidas en el rango de valores de H-Q incluidos en la calibración (Díaz 2014) los valores de caudales obtenidos mediante LSPIV para alturas de escala superiores no pueden ser validadas, pero bajo la hipótesis que, si la técnica LSPIV es válida para valores de caudales inferiores a 1.67 metros de altura de escala limnimétrica, también lo es para valores superiores ya que el procedimiento utilizado es el mismo (Lobo et al., 2017).

La figura 4.30 muestra el ajuste de H-Q obtenido según los datos de SSRHN y LSPIV. En la misma se aprecia que para valores de H próximos a 2 m la curva H-Q encontrada presenta un cambio en la pendiente por lo que la ecuación 4.2 no es representativa en alturas de superficie libre de agua superiores. Lo dicho anteriormente tiene su fundamento en que a partir de cierta altura de la escala el escurrimiento superficial comienza a inundar las planicies de inundación y el ancho de la zona inundada adquiere relevancia con respecto a la altura alcanzada en el cauce principal, por lo que el $(H-H_0)$ de la ecuación 4.1 tiende a un valor semejante a la altura de la superficie de agua libre en la planicie de inundación.

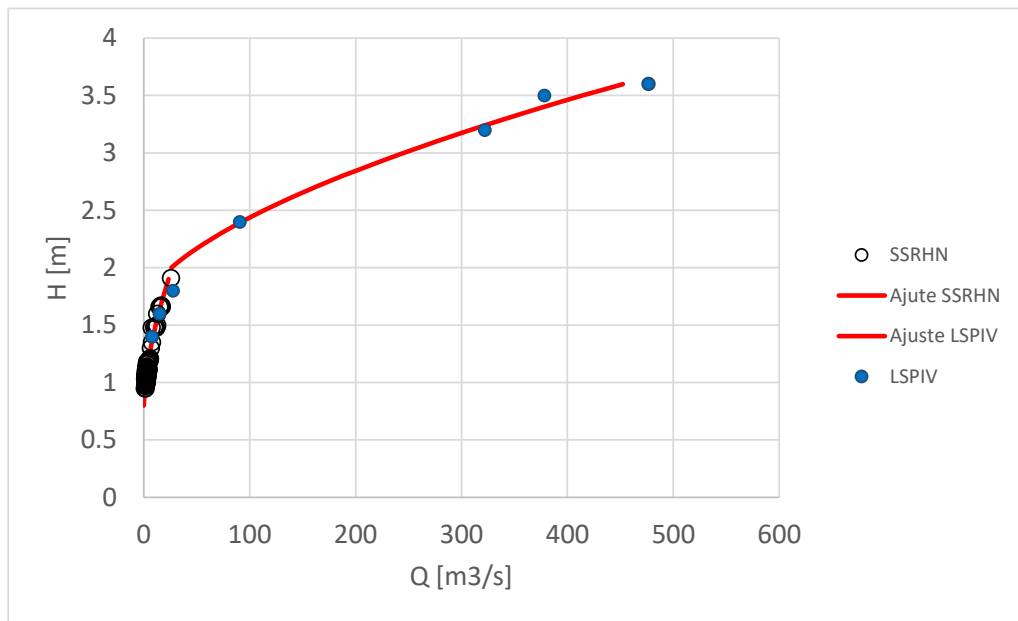


Figura 4. 30: Curva H-Q ajustada para todo el rango de H disponible

El factor de calibración α en la ecuación 4.1 es función de la rugosidad del cauce, la pendiente de la línea de energía y el ancho superficial. La tabla 4.6 muestra el aumento significativo de éste factor debido al aumento del ancho superficial del área de la sección transversal, dada por el escurrimiento superficial sobre la planicie de inundación. En esta situación H_0 , representa la altura de escala a la que el escurrimiento superficial comienza a invadir la planicie de inundación. De observaciones in situ para la sección en estudio este valor de H_0 rondaría entre 1.80 y 2 metros valor coincidente con el determinado estadísticamente

Sección	α	β	H_0 (m)
Escala Huaycama río del Valle - puente colgante	148.2	1.67	1.647

Tabla 4. 6: Parámetros de la ecuacion 4.1 calibrados representando el comportamiento hidráulico del río para $H > 2m$

La nueva ecuación de ajuste esta dada por:

$$Q = 148.2*(H-1.647)^{1.67} \quad (4.3)$$

H [m]	QLSPIV [m ³ /s]	Ecuación Teórica[m ³ /s]	Diferencia %
2.40	90.64	92.36	1.90
3.20	321.97	308.65	-4.14
3.50	378.00	414.29	9.60
3.60	476.71	452.22	-5.14

Tabla 4. 7: Diferencia porcentual los valores de Caudales obtenidos mediante la curva H-Q y LSPIV

Si bien existe un buen ajuste entre los caudales obtenidos mediante LSPIV y la ecuación teórica con una diferencia % entre ambas de hasta el 10% (Tabla 4.7), es necesario seguir realizando mediciones en este rango de valores para lograr una buena calibración de H-Q, sin embargo al haber podido verificar que la misma es representativa del comportamiento hidraulico del cauce en esa sección, podría considerarse como válida para una primera aproximación.

Contar con mediciones de caudales significativamente superiores a las realizadas hasta el momento por SSRHN permitió: encontrar una curva H-Q que describa satisfactoriamente la relación altura - caudal con el comportamiento del cauce en un rango de mediciones muy superior al utilizado hasta el momento permitiendo obtener una ecuación matemática con fundamento hidráulico que sirva para interpolar valores de caudales en el rango medido.

Una vez validada la técnica LSPIV se comparó las condiciones de flujo observadas con las existentes en ríos de montaña en otros países del mundo.

En el trabajo “Predicción de la velocidad media del flujo en ríos de montaña”, Lopez et al. (2008) ha recopilado una importante base de datos de variables hidráulicas observadas. La base de datos elaborada incluye datos de más de 400 tramos de diferentes ríos de grava y de montaña principalmente localizados en Estados Unidos, Nueva Zelanda, Canadá, Reino Unido y España cuyos criterios de selección se presentan a continuación:

1. El tramo del río debía ser un canal único de baja sinuosidad y casi prismático.
2. El perímetro mojado debía encontrarse libre de cubierta vegetal importante y de obstáculos prominentes.
3. Las condiciones de flujo debían aproximarse en forma suficientes a un régimen permanente y macroscópicamente uniforme y además no debía acontecer desbordamiento del cauce principal. No obstante, debido a las características de los ríos de montaña el flujo es variado a escala de detalle, por consiguiente la uniformidad del mismo debe interpretarse como una propiedad promedio a lo largo del tramo.
4. El sedimento debía estar constituido por grava.
5. Con el ánimo de minimizar la influencia de los márgenes del cauce, la relación ancho de superficie libre (T) y profundidad media de la sección debía ser superior a 10.

La aplicación de los criterios expuestos permitió la compilación de 904 datos experimentales correspondientes a 24 referencias bibliográficas publicadas en el período de 1955 al 2002.

La tabla siguiente muestra los valores máximos, mínimos y medios de las distintas variables hidráulicas en la base de datos.

Variable	Símbolo	Unidades	Mínimo	Máximo	Media	C_v (%)
Base de datos de calibración ($N = 904$)						
Velocidad media	V	m/s	0,04	4,31	1,16	66
Pendiente del lecho	S	m/m	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,60 \cdot 10^{-1}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	146
Caudal	Q	m^3/s	$3,50 \cdot 10^{-3}$	$8,21 \cdot 10^3$	$9,22 \cdot 10^1$	496
Diámetro mediano	d_{50}	m	0,007	0,51	0,11	88
Sumersión relativa	y/d_{84}	m/m	0,11	120	7,81	166

Tabla 4. 8: Intervalo de las variables hidráulicas

Para éste trabajo, se compararon los valores de velocidades medias de flujo obtenidos mediante la implementación de la técnica LSPIV con los valores observados en la base de datos recopilada por Lopez et al. (2008). Las condiciones hidráulicas caracterizadas en esta tesis y que se incluyen en la comparación son las correspondientes a las alturas de escala asociada a 1.40, 1.60, y 1.80 metros, debido a que para niveles de superficie libre de agua superiores, el cauce activo invade las planicies de inundación infringiendo así los criterios 2 y 3 anteriormente expuestos.

Los valores de caudales obtenidos en esta tesis para $h = 1.40, 1.60, y 1.80$ m oscilan entre los 7.55 y 27.4 m^3/s , el tramo del río considerado presenta una pendiente $S = 0.022$ m/m, valores incluidos en los intervalos de la base de datos analizada. Si bien no se realizó en el tramo del río un análisis granulométrico, de la inspección visual (Figura 4.27) se deduce que el d_{50} (diámetro mediano) y la sumersión relativa (y/d_{84}) estarían también dentro de los intervalos de la base de datos analizada por lo que las condiciones hidráulicas e hidro geomorfológicas del tramo del río están incluidas dentro de las condiciones representadas en la base de datos utilizada como referencia.



Figura 4. 31: Granulometría del cauce

La tabla 4.9 contiene los intervalos de velocidades medias en el área analizada y en la sección transversal. En todos los casos el intervalo de velocidades de flujo observadas en esta tesis se encuentran dentro del intervalo de la base de datos analizada por lo que los resultados de velocidades obtenidos mediante el uso de LSPIV se encuentran dentro de los esperados para ríos de grava y de montaña en tramos que satisfacen los criterios adoptados.

H (m)	Velocidades (m/s)			
	Área de Análisis		Sección Transversal	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
1.4	0.16	0.96	0.37	0.72
1.6	0.16	1.44	0.7	1.25
1.8	0.64	2	0.13	1.28

Tabla 4. 9: Rango de velocidades medias encontradas mediante LSPIV

Sin embargo, un aspecto a destacar en esta tesis es la caracterización de flujo realizada para condiciones de flujos con alturas de superficie libre superiores a los 2 metros ya que se han detectado valores límite de velocidades medias cercanas a los 8 m/s como es el caso de las mediciones realizadas para $H= 3.5$ m y $H=3.6$ m, significativamente superiores

a los valores máximos observados en la base de datos de Lopez et al. (2008). El reciente desarrollo de técnicas de velocimetría no intrusivas permitirá a futuro contar con datos registrados en condiciones de flujo extremas para ser incorporadas a las bases de datos de ríos de montaña existentes.

Las velocidades máximas encontradas en las condiciones de flujo extremas caracterizadas en este trabajo, son las mayores registradas para los todos los sistemas fluviales monitoreados con ésta técnica por el grupo de trabajo donde se desarrolló esta tesis en cauces fluviales de las provincia de Salta, Córdoba, Catamarca y Santa Cruz destacando la relevancia del trabajo experimental realizado, debido a la implementación de la técnica experimental LSPIV bajo las condiciones de flujo más desfavorables caracterizadas hasta el momento.

4.6 IMPLEMENTACIÓN DE LSPIV PARA CAUDALES DE ESTIAJES SOBRE EL RÍO LOS NOGALES

Con el objeto de comparar las técnicas LSPIV y LSPTV se repitió la medición (17-08-2017) realizada en LSPTV en el mismo lugar y a la misma hora empleando LSPIV. Debido a la baja velocidad, no fue factible usar como trazadores las ondulaciones visibles del flujo, por lo que se utilizó para ello viruta de aserrín. La sección de medición se describió en el capítulo 3 del presente escrito. La metodología utilizada para la aplicación de LSPIV se detalló en el capítulo 2 del presente trabajo.

Tanto en la obtención del campo de velocidad superficial del flujo como en el cálculo del caudal mediante LSPIV y LSPTV, se empleó la misma sección transversal. Los resultados se verificaron con los caudales resultantes de aplicar la técnica de aforo con molinete por el método de vadeo en la misma sección de análisis.

4.6.1.-RESULTADOS LOS NOGALES 17-08-2017

La figura 4.31 visualiza el campo de velocidades medias de flujo superficiales interpoladas y rectificadas mediante LSPIV para toda el área de interés que oscila entre 0.05 y 0.55 m/s.

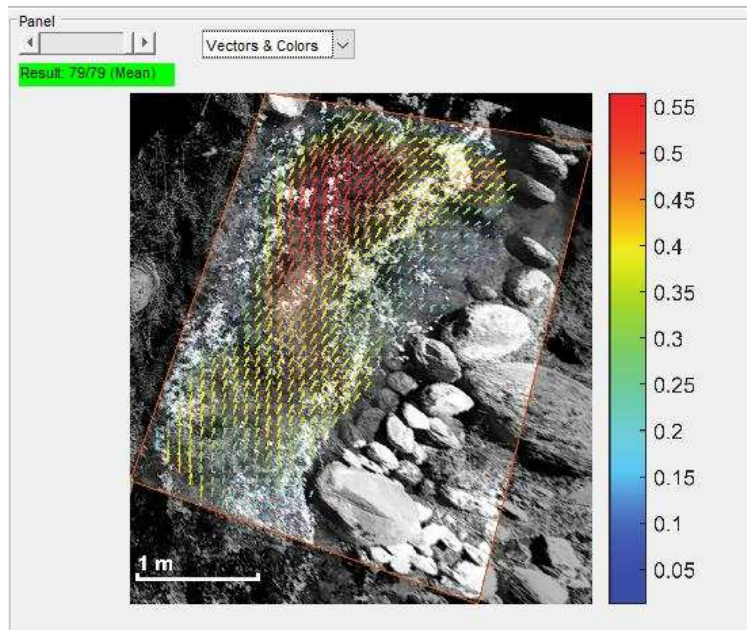


Figura 4. 32: Campo de velocidades medias de flujo interpoladas y rectificadas (m/s).

El rango de velocidades superficiales ajustadas con un factor $\alpha = 0.85$ para la sección transversal relevada oscila entre 0.05 y 0.37 m/s

El caudal obtenido mediante el uso de LSPIV es de 0.072 m³/s

4.6.2. COMPARACIÓN ENTRE TÉCNICAS

La Tabla 4.6 muestra los resultados de caudales obtenidos mediante las diferentes técnicas. En la misma se visualiza que la menor diferencia porcentual se obtiene mediante el uso de LSPIV con un -2.70 %.

Caudal (m ³ /s) Aforo-Molinete	Caudal (m ³ /s) LSPTV	Caudal (m ³ /s) LSPIV	Dif. % (Aforo-LSPTV)	Dif. % (Aforo-LSPIV)
0.074	0.082	0.072	10.81	-2.70

Tabla 4.10: Comparación entre resultados LSPTV Y LSPIV

Las diferencias en los resultados obtenidos con LSPIV y LSPTV puede deberse a la elección de los parámetros de calibración como ser (fps extraídos, los filtros aplicados, el procedimiento de rectificación, etc.), presentado LSPIV para éste caso, un mejor ajuste a la técnica de aforo por molinete usada en la validación de los resultados.

4.7 FUENTES DE ERRORES DETECTADAS

A demás de la incidencia de la luz natural en las mediciones y la adopción del factor α anteriormente descrito se detectaron otras fuentes de errores que a continuación se detallan:

El ángulo entre la cámara y la superficie del agua: los errores en los resultados del procesamiento aumentan a medida que disminuye el mismo. En este aspecto el uso de una VANT (vehículo aéreo no tripulado) permitiría reducir los errores asociados a la implementación de LSPIV y LSPTV por la oblicuidad de la cámara cuando se realizan las mediciones desde puentes y/o márgenes de los cursos fluviales de medianas y grandes escalas.

- La cantidad de imágenes por segundo con que se trabaja, ya que la misma se encuentra en relación directa con la velocidad del flujo. Quizás estudiando la relación velocidad estimada del flujo con el tamaño de la imagen a nivel de pixel y el desplazamiento de la partícula se pueda incorporar al algoritmo alguna rutina que disminuya la influencia del error.

- Debido a las características del flujo (crecida), la precisión del proceso de rectificación se vio influenciada por la elección de los puntos de control, la determinación de la distancia entre los mismos y sus ubicaciones en la imagen.

CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DIGITALES A GRAN ESCALA EN LA CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL A NIVEL PROVINCIAL.

5.1 INTRODUCCIÓN

Una vez validadas las técnicas LSPIV y LSPTV para cuantificar los caudales escurridos superficiales en la provincia de Catamarca, es necesario extrapolar su implementación a otros lugares. Para ello se formuló el proyecto: *“Implementación de las técnicas de velocimetría por imágenes digitales a gran escala en la cuantificación del recurso hídrico superficial a nivel provincial”*.

Los medios de comunicación y los avances tecnológicos han permitido producir una gran cantidad de material digital sobre crecidas de ríos y compartirlas a través de las redes sociales. Las redes sociales vinculan informaciones diversas sobre crecidas repentinas que ocurren en diferentes lugares como así también informes de riesgo de inundaciones y daños ocurridos derivados de las mismas que generan discusiones, debates, juicios, denuncias, apelaciones y observaciones a las autoridades locales.

La Gestión Integrada de Crecidas (GIC) se sustenta en primer lugar por el conocimiento y análisis de la peligrosidad del evento natural. Esta peligrosidad estará dada en función de la probabilidad de ocurrencia del evento y la magnitud del mismo expresada en variables hidráulicas como la altura de agua en el curso fluvial y la velocidad del flujo. Del análisis de las variables mencionadas, surgirá la vulnerabilidad y exposición de los

bienes y personas potencialmente afectados, expresando finalmente el riesgo como producto entre la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición.

En la provincia de Catamarca, está en manos de Recursos Hídricos realizar una gestión eficiente del riesgo hídrico, teniendo en cuenta los condicionantes como: factores naturales, ambientales y antrópicos, siendo este último el más dificultoso de tratar cuando de conciencia social se trata. En éste aspecto para asegurar el éxito de los resultados es de vital importancia que el estado logre crear en la sociedad, conciencia del peligro derivado que una crecida puede ocasionar y fomente en la misma una participación activa del ciudadano en la determinación de las variables hidráulicas como la altura del agua y velocidad de flujo mediante el apoyo en la filmación de los sucesos en el momento que se lleven a cabo.

Los datos cuantitativos como el área, profundidad de las zonas inundadas o estimaciones de caudal, pueden ser calculados por medio de mensajes, fotos y videos de testigos a modo de ayudar en la modelización de áreas inundables. De ésta manera los ciudadanos comunes pueden contribuir a la ciencia hidrológica. Un ejemplo de la participación de la comunidad en la caracterización de eventos meteorológicos en Catamarca se muestra en la página cazadores de tormentas, un blog dedicado a los registros de fenómenos meteorológicos con participación activa de la comunidad.

Los videos de crecidas grabadas por empleados de los diferentes organismos gubernamentales y ciudadanos en general basados en la predisposición de filmar eventos hidrológicos extremos con el fin de compartir sus imágenes en las redes sociales, pueden ser analizados y procesados por los técnicos de la Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos.

5.2 OBJETIVOS

Los ríos de montañas de la provincia de Catamarca, se caracterizan por la ocurrencia de eventos de caudales significativos a gran velocidad que se dan en la época de lluvias (diciembre a marzo). Debido a la naturaleza repentina del evento, es muy poco probable la cuantificación del caudal máximo y su evolución temporal, ya que las velocidades del flujo, y los desechos flotantes ponen en riesgo la vida del personal técnico dedicado a las tareas de aforo.

Habiendo probado la validez técnica LSPIV en la determinación del campo de velocidad superficial del flujo y habiendo podido cuantificar el caudal en eventos de características extremas a través de ella, el estado ha recibido una nueva herramienta eficaz y sin riesgo alguno para el operador. En este punto, el OBJETIVO de éste capítulo es armar un plan de acción para que el organismo gubernamental de incumbencia (Recursos Hídricos) pueda implementar la metodología LSPIV explicada en este trabajo en toda la provincia, involucrando en su accionar a los distintos organismos dependientes del poder ejecutivo provincial y municipal como así también a la comunidad en general.

5.3 LUGAR DE IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación de la técnica a nivel provincial se plantea dos líneas paralelas de trabajo. La primera, estará dada por la implementación de la metodología LSPIV a nivel institucional, y la segunda línea estará definida por las acciones que permitan una participación activa de la comunidad.

Si bien la implementación de LSPIV a nivel provincial se plantea en forma gradual a corto y mediano plazo, a corto plazo el trabajo se circunscribirá a los lugares donde haya personal permanente del Ministerio de Obras Públicas a través de las Intendencias de Riego dependiente de la Dirección Provincial de Riego, los encargados de las Plantas Potabilizadoras pertenecientes a la DASI (Dirección de Agua y Saneamiento del Interior) y, algunos lugares aislados donde el personal de defensa civil, encargado de asistir a la población ante siniestros pueda realizar las filmaciones de crecidas de ríos que luego se procesarán. A mediano plazo el objetivo es extender el área de implementación a todos los cursos de agua superficial de la provincia con la ayuda de la participación activa de la comunidad.

5.4 IMPLEMENTACIÓN

La implementación de la metodología LSPIV deberá hacerse en forma gradual planteándose las actividades y los objetivos para un horizonte de tiempo de entre 2 (corto plazo) y 5 años (mediano plazo).

5.4.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA LSPIV A CORTO PLAZO (HORIZONTE TEMPORAL 2 AÑOS)

Objetivo General:

- Implementar la metodología LSPIV (Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala) a nivel local e involucrar a las instituciones gubernamentales en el proceso.

Objetivos Particulares:

- Implementar la metodología LSPIV para la cuantificación de caudales de crecidas en algunos cursos de aguas superficiales.
- Incorporar la conciencia en el poder ejecutivo provincial y municipal, a cerca de la importancia de la medición de las variables hidráulicas y su incidencia en el riesgo hídrico existente.
- Lograr la participación activa del personal de planta permanente de las Intendencias de Riego, y la DASI en la filmación de los eventos.
- Capacitar al personal en la aplicación de la metodología LSPIV.

Lugares de implementación para un horizonte temporal de 2 años

A modo de definir los primeros lugares de implementación, se realizó un relevamiento de las diferentes instituciones con incumbencias en recursos hídricos donde

haya personal permanente o donde sea posible la visualización del evento por la cercanía al lugar de medición. (Tabla 5.1)

Departamento	Localidad	Dependencias Fijas de Obras Públicas	Organismo	Ríos Cercanos (posibles de filmar)
San Fernando del Valle de Catamarca	Capital	-	DPHy ERH	El Tala
Ambato	Humaya	Planta Potabilizadora	DASI	Huañomil
Ambato	El Rodeo	Planta Potabilizadora	DASI	Ambato - Los Nogales- Arroyo Seco
Ambato	Las Juntas	Planta Potabilizadora	DASI	Las Juntas - Las Lajas
Ambato	La Puerta	Planta Potabilizadora	DASI	Ambato- del valle
Ambato	Isla Larga	Planta Potabilizadora	DASI	DeL Valle
Capayán	Concepción	Planta Potabilizadora	DASI	Simbolar
Capayán	San Pablo	Planta Potabilizadora	DASI	San Pablo
Capayán	Miraflores	Planta Potabilizadora	DASI	Miraflores
Capayán	Chumbicha	Planta Potabilizadora	DASI	San jeronimos
Fray mamerto Esquiú	Las Pirquitas	Planta Potabilizadora	DASI	DeL Valle
Santa María	Ampajango	Planta Potabilizadora	DASI	Santa María
Santa María	La Hoyada	Planta Potabilizadora	DASI	Santa Maria
Santa María	San Antonio del Caion	Planta Potabilizadora	DASI	Santa Maria
Santa María	Santa Maria	Planta Potabilizadora - Intendencia de Riego	DASI	Santa Maria
Santa Rosa	Los Altos	Planta Potabilizadora - Intendencia de Riego	DASI	El San Francisco
Santa Rosa	Alijilan	Planta Potabilizadora - Intendencia de Riego	DASI	El Abra
Ancasti	Icaño	Planta Potabilizadora - Intendencia de Riego	DASI	Los Molino - Motegasta
Andalgalá	Andalgala	Planta Potabilizadora - Intendencia de Riego	DASI	Andalgala
Andalgalá	Amanao	Planta Potabilizadora	DASI	Amanao
Belén	Belen	Planta Potabilizadora	DASI	Belen
Belén	Hualfin	Planta Potabilizadora	DASI	La Colpa
Belen	Londres	Planta Potabilizadora - Intendencia de Riego	DASI	Quimivil - Las Trancas
Pomán	Pomán	Planta Potabilizadora	DASI	Poman
Pomán	Saujil	Planta Potabilizadora	DASI	Saujil
Tinogasta	Tinogasta	Planta Potabilizadora - Intendencia de Riego	DASI	Abaucan
Tinogasta	Palo Blanco	Planta Potabilizadora	DASI	Colorado
Paclín	La Merced	-	DPHy ERH	Paclín
Valle Viejo	Valle Viejo	-	DPHy ERH	Paclín

Tabla 5.1: Posibles lugares de implementación de la Técnica LSPIV para medición de caudales

Las figuras 5.1 y 5.2 visualizan los lugares donde el poder ejecutivo de la provincia a través de sus organismos de incumbencia posee personal permanente, que con la debida capacitación en ésta primera etapa, podrían ser los encargados de realizar las filmaciones de las crecidas de los ríos involucrados. La tabla 5.1 visualiza la ubicación precisa de los lugares propuestos.

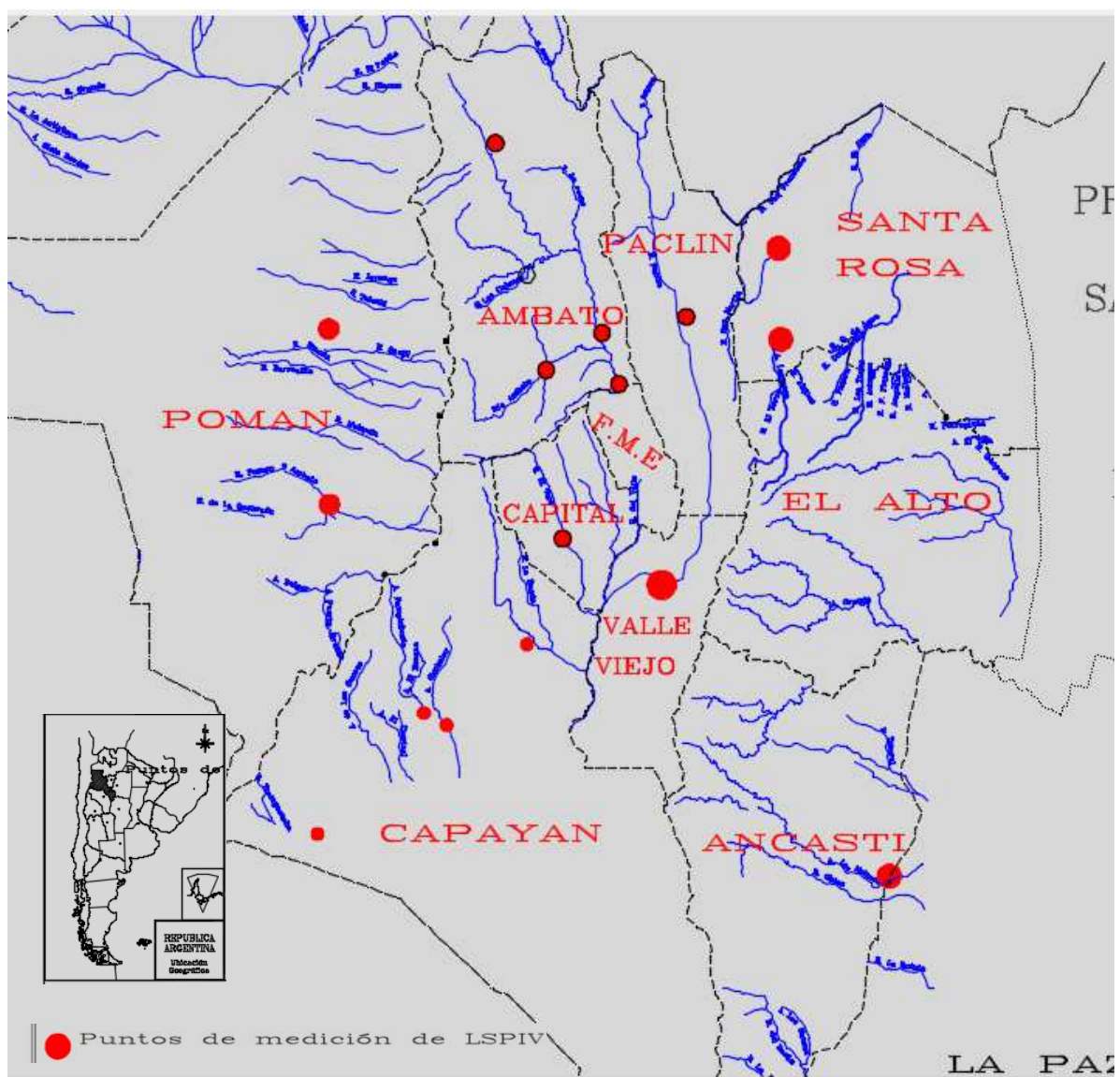


Figura 5. 1: Puntos de implementación de LSPIV zona centro y este de Catamarca (Horizonte Temporal - 2 años)

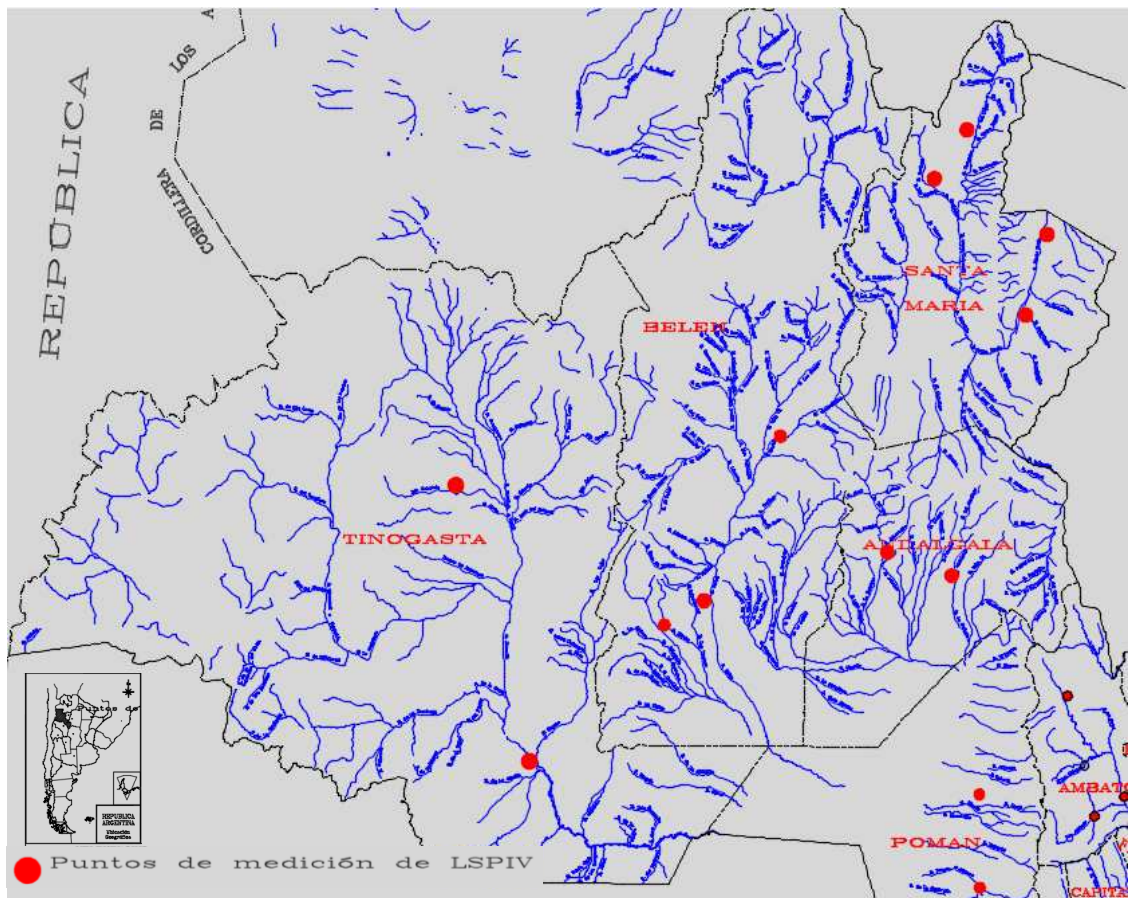


Figura 5. 2: Puntos de Implementación de LSPIV zona Norte y Oeste de Catamarca (Horizonte Temporal de 2 años)

Actividades a corto plazo:

- Celebración de convenios de cooperación técnica entre instituciones del poder ejecutivo provincial (Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Seguridad, Ministerio de Ciencia y Técnica, etc.): para lograr la intervención del personal de planta de los diferentes organismos involucrados, es necesaria la firma de un convenio de cooperación técnica entre partes que permita formalizar las responsabilidades concernientes a cada uno.
- Capacitación de los técnicos de la provincia en la toma de los videos: una vez formalizada la colaboración entre instituciones se debe llevar a cabo un ciclo de capacitación de los técnicos involucrados en el proyecto. El desarrollo de ésta actividad es sumamente

importante para lograr el éxito de los objetivos planteados ya que una filmación del evento mal realizada no permitirá el procesamiento de las imágenes. El capacitador deberá hacer énfasis en la importancia que el criterio del observador tendrá en el éxito del procesamiento posterior. Los ciclos de capacitación deberán realizarse durante el primer año del proyecto y prever al menos una capacitación por cada lugar de medición establecido.

- Capacitación en el uso de LSPIV y River del personal designado para el procesamiento de los videos: una vez obtenidos los videos de crecidas de los ríos en los diferentes sitios designados para la visualización de los eventos, el organismo encargado de recibir y realizar la metodología LSPIV será la Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos (organismo de incumbencia para llevar a delante la implementación y el seguimiento del proyecto). En virtud de lo expuesto, es necesario que el personal designado a tal fin sea capacitado en el uso de los softwares específicos (PIVlab y River). En un principio para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos será necesario contar con la colaboración y supervisión del CETA (Centro de Estudio y Tecnología del Agua) por su vasta experiencia en el desarrollo e implementación de la LSPIV en cursos de aguas superficiales de la provincia de Córdoba.

- Firmas de convenios de colaboración mutua entre la provincia y los municipios para la implementación de la técnica LSPIV: es fundamental la intervención y participación activa los municipios en la concreción de las actividades y su vinculación con la comunidad local. A pesar que en una primera instancia se plantea la implementación de LSPIV con personal de la provincia, en paralelo deberán definirse los mecanismos formales mediante la firma de convenios de cooperación mutua para trabajar conjuntamente con los diferentes municipios y a través de ellos con la comunidad local.

CAPITULO 5

- Charlas informativas sobre Riesgo Hídrico y Uso del suelo a la comunidad en general: es de vital importancia trabajar tanto en lo técnico mediante la cuantificación de las variables hidrológicas y, lo social creando concientización en la comunidad acerca del uso del suelo en las áreas susceptibles de riesgo hídrico. Para ello se plantea un ciclo de charlas informativas a la comunidad local en cooperación con los municipios.

- Estudios de la factibilidad de implementación de estaciones fijas de aforo de LSPIV en diferentes puntos de la provincia: para la concreción de ésta actividad será necesario la realización de un relevamiento de detalle consignando: a) existencia de obras hidráulicas como ser: puentes carreteros, puentes colgantes, alcantarillas, o cualquier otra estructura existente que permita el montaje de una estación fija de LSPIV); b) características hidrológicas del cauce, c) existencia de sección transversal fija en algún tramo del río, d) sistema de comunicación existente (telefonía celular, telefonía satelital, GPRS, GCM, etc.); e) posibilidad de comunicación mediante UHF; f) Acceso al lugar de medición y cercanía a los lugares habitados, g) Antecedentes de inundaciones en la zona; etc.

A partir de éste relevamiento deberá estudiarse la factibilidad de la implementación de estaciones fijas de aforos en diferentes lugares de la provincia, definiendo un orden de prioridad de instalación de las mismas conforme un cronograma tentativo de emplazamiento de los equipos para un horizonte temporal de 5 años.

- Confección de una página web que permita mostrar los resultados obtenidos a la comunidad en general: uno de los primeros pasos en la realización de éste proyecto es la creación de un sitio web con dominio institucional que permita a los usuarios subir sus videos de crecidas grabados junto a los metadatos (fecha y hora de grabación, ubicación exacta de la sección del río y cualquier otro dato que pudiera ayudar en el procesamiento de los mismos). En el caso que los videos subidos a éste medio sean favorables, se analizarán

y procesaran utilizando la metodología LSPIV ya explicada. A través de ésta página se extenderá a la comunidad en general una invitación a participar del proyecto proporcionando para tal fin, una guía metodológica para que usuarios sin conocimientos previos puedan hacer su contribución.

- Publicidad del proyecto a través de las redes sociales: en la actualidad uno de los principales medios de comunicación es el uso de las redes sociales. Gran parte del éxito del proyecto es la difusión del mismo a la sociedad y, si bien se busca la participación activa de las comunidades a mediano plazo, para conseguir éste objetivo es necesario difundir tanto el proyecto en sí como la importancia de mantener el mismo en el tiempo, y es allí donde la publicidad a través de las redes sociales (Facebook, Instagram, twitter, Whats App, etc.) cumplen un rol fundamental. La idea es que en una primera instancia la difusión sea realizada a través de los mismos técnicos encargados de llevar a cabo el proyecto, marcando desde allí el punto de salida inicial para luego extenderse a un nivel mayor a medida que se avance en la difusión y se obtengan los primeros resultados.

- Procesamiento de los primeros videos obtenidos en el marco de los convenios firmados: la Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos será la encargada de procesar los videos de crecidas y publicar los resultados en la página web creada para tal fin.

- Difusión a nivel institucional de logros obtenidos en la concreción de las diferentes actividades.: tanto los resultados obtenidos (campos de velocidades y caudales), como así también los avances en todas las actividades, deben ser difundidas entre las instituciones participantes manteniendo una comunicación fluida entre técnicos y funcionarios desde el inicio del proyecto.

CAPITULO 5

- Difusión a nivel local de los resultados obtenidos en el marco de los convenios firmados con los diferentes municipios: para esta actividad se plantea la difusión del proyecto a través de talleres de divulgación en colaboración con los municipios. Es importante involucrar a la comunidad local a través de las grabaciones de los videos y documentar el conocimiento innato de las zonas problemáticas que lo habitantes del lugar poseen. El llegar a la comunidad y lograr la colaboración permanente de la misma debe enfocarse a través de los municipios, ya que es esa institución la encargada en su gestión diaria de conocer y resolver las inquietudes y los problemas de los habitantes de su jurisdicción.

Cronograma de Actividades:

Las actividades especificadas en el punto anterior podrán ser realizadas según el siguiente cronograma tentativo. (Tabla 5.2)

ACTIVIDADES	MES ES																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Celebración de convenios de cooperación técnica entre instituciones del Poder Ejecutivo Provincial	X	X	X																					
Capacitación de los técnicos de la provincia en la toma de los videos				X	X	X	X	X																
Capacitación en el uso de LSPIV y River del personal designado para el procesamiento de los videos	X	X	X	X	X	X	X	X	X															
Firmas de convenios de colaboración mutua entre la provincia y los municipios para la implementación de la técnica LSPIV	X	X	X	X	X	X																		
Charlas informativas sobre Riesgo Hídrico y Uso del suelo a la comunidad en general				X	X	X	X	X	X						X	X	X	X						
Estudios de la factibilidad de implementación de estaciones fijas de aforo de LSPIV en diferentes puntos de la provincia									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
Confección de una página web que permita mostrar los resultados obtenidos a la comunidad en general				X	X	X	X	X	X															
Publicidad del proyecto a través de las redes sociales				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Procesamiento de los primeros videos obtenidos en el marco de los convenios firmados										X	X	X	X	X	X	X	X	X						
Difusión a nivel institucional de logros obtenidos en la concreción de las diferentes actividades.			X						X									X						X
Difusión a nivel local de los resultados obtenidos en el marco de los convenios firmados con los diferentes municipios.																		X	X	X	X	X	X	X

Tabla 5.2: Cronograma tentativo de actividades

5.4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA LSPIV A MEDIANO PLAZO (HORIZONTE TEMPORAL 5 AÑOS)

Una vez elaboradas con éxito las actividades planteadas para un horizonte temporal de 2 años, se podrá considerar que el proyecto marcha satisfactoriamente, estando ya en condiciones de extender la implementación de LSPIV a lo largo del territorio provincial. Para ello se deben fijar objetivos más amplios y permanentes, que contemplen el seguimiento de las actividades ya desarrolladas, y la inclusión de nuevas tareas derivadas de la ampliación del proyecto.

Objetivo General:

- Ampliar la utilización de LSPIV a nivel provincial e involucrar a la sociedad catamarqueña en el proceso.

Objetivos Particulares:

- Incorporar la conciencia en la comunidad catamarqueña sobre la importancia de la medición de las variables hidrometeorológicas e hidrológicas y su incidencia en el riesgo hídrico existente.
- Promover la participación de la comunidad a través de la filmación de videos y lograr que, en el proceso el ciudadano sienta que su contribución es fundamental para generar medidas a futuro que garanticen una gestión efectiva del recurso hídrico y que impacten en forma directa en la mejora de la calidad de vida de las poblaciones ribereñas.
- Utilizar los resultados obtenidos hasta el momento en modelo hidrológicos e hidráulicos que permitan reproducir el comportamiento de un curso fluvial ante un evento de características extremas.

Actividades tentativas en relación con los avances del proyecto a mediano plazo:

- Monitoreo y seguimiento de las actividades planteadas a corto plazo: partiendo del supuesto que las actividades planteadas para un horizonte temporal de dos años se realizaron satisfactoriamente, se estaría en condiciones de llevar adelante el monitoreo y seguimiento de las mismas. Para lograr el éxito del proyecto es fundamental tener en claro la importancia del seguimiento continuo y hasta individual de cada uno de los técnicos intervinientes.
- Ciclo de charlas informativas sobre Riesgo Hídrico y Uso del suelo en toda la provincia: si lo que se busca es ampliar el proyecto a todo el territorio provincial se debe

trabajar en coordinación con el gobierno local y continuar con el ciclo de charlas informativas sobre riesgo hídrico y uso del suelo, organizando las mismas en cada cabecera departamental. En ésta etapa sería importante coordinar con el ministerio de educación y estudiar la posibilidad de generar charlas de concientización hídrica en el nivel polimodal preferiblemente en los últimos años a modo de crear conciencia en lo jóvenes y promover en ellos la cooperación en las mediciones.

- Actualización permanente de la página web: es de vital importancia que la página web creada a partir de éste proyecto este continuamente en actualización y, con mejoras permanentes en su interfaz gráfica. La página debe ser dinámica y contener toda la información a tiempo real derivada de las actividades desarrolladas para todos los horizontes de tiempo planteados.

- Colocación de estaciones fijas de aforo de LSPIV: según los resultados obtenidos de la actividad “estudios de la factibilidad de implementación de estaciones fijas de aforo de LSPIV en diferentes puntos de la provincia” se realizará gradualmente la colocación y el armado de las mismas.

- Procesamiento de los videos: una forma de vislumbrar el estado del proyecto es con la cantidad de videos compartidos y subidos a la página web por los diferentes usuarios. La Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos será la encargada de procesar los videos de crecidas y publicar los resultados.

- Realización de estudios hidrológicos e hidráulicos: en función de las caracterización de los eventos a través de los campos de velocidades superficiales y los caudales obtenidos mediante la utilización de LSPIV, la Subsecretaría de Planificación de los Recursos Hídricos a través de sus Direcciones deberá realizar los estudios pertinentes para la elaboración de las medidas de mitigación del riesgo hídrico que pueden ser de índole

estructural (proyectos de defensas, obras de desvío, etc.), y no estructural (delimitación de zonas de riesgo hídrico, restricción al uso de suelo, tratamiento de leyes que regulen la línea de ribera y conexas, etc.) que contribuyan como información base para la elaboración de un plan de gestión de crecidas. Al respecto existen antecedentes de trabajos expuestos utilizando mediciones de LSPIV para calibrar modelos hidrológicos como ser el trabajo “Calibración de modelos hidrológicos en cuencas de montañas a partir de mediciones experimentales de caudal aplicando LSPIV”, presentado por (Alvares et al, 2017) en el V Simposio de Métodos Experimentales en Hidráulica.

- Difusión del proyecto y sus resultados: ésta actividad engloba toda tarea de divulgación planteada en forma individual para un horizonte temporal de 2 años. En ésta etapa cada una de esas actividades se suponen ya desarrolladas y con un mecanismo de funcionamiento aprobado y adoptado como parte de su accionar diario por los diferentes actores. Es necesario que las tareas de difusión se desarrollen en forma dinámica y permanente buscando generar nuevos mecanismos de divulgación como ser: radios, televisión local, diarios y eventos científicos, que mantengan a toda la comunidad no tan solo informada sino también interesada en la continuidad del proyecto.

- Elaboración de un plan para la Gestión del Riesgo Hídrico: En base a toda la información generada producto de éste proyecto se propondrá la conformación de equipos multidisciplinarios para la elaboración de un plan para la gestión del riesgo hídrico, que contenga los lineamientos básicos a seguir, para la concreción de metas y objetivos a corto, mediano y largo plazo.

Cronograma de Actividades:

En ésta instancia armar un cronograma de actividades a mediano plazo no se considera recomendable, ya que el mismo debe realizarse en función de los objetivos alcanzados y el grado de desarrollo de las actividades planteadas para el horizonte temporal de dos años. Si bien en el punto anterior se han detallado las actividades a realizar a mediano plazo partiendo de la hipótesis de la concreción satisfactoria de los objetivos y, a pesar que las mismas son de carácter general, quizás sea necesario realizar una evaluación crítica del estado del proyecto al finalizar la etapa de implementación de la metodología LSPIV a corto plazo y, en función de los resultados definir el punto de partida y reformular lo expuesto aquí para la implementación de LSPIV a mediano plazo.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

6.1.1 CONCLUSIONES GENERALES

A lo largo de este trabajo se ha visualizado la problemática de la escasez de valores de caudales determinados experimentalmente durante eventos de características extremas (máximos y mínimos hidrológicos) enfatizando la dificultad que éste problema origina a la hora de realizar una gestión integral del recurso hídrico. En esta tesis se han implementado satisfactoriamente en dos ríos muy importantes por su potencial turístico de la provincia de Catamarca, dos técnicas de velocimetría por imágenes digitales denominadas LSPTV y LSPIV. Estas técnicas permiten cuantificar caudales escurridos superficialmente durante condiciones hidrológicas extremas, contando con equipos de fácil acceso y de tecnología conocida y usada por la mayoría de los usuarios como son los teléfonos celulares y las cámaras digitales modernas, que hoy permiten la grabación de imágenes de alta resolución. Así, ambas técnicas no intrusivas LSPTV y LSPIV constituyen una buena alternativa con bajo costo para la determinación experimental de caudales escurridos superficialmente en ríos con características similares a las ensayadas a condición de conocer la batimetría de la sección aforada.

La implementación a gran escala de las técnicas de velocimetría LSPIV y LSPTV, requiere la rectificación de los resultados, para lo cual se realiza la medición de la distancia

entre 4 puntos fijos bien diferenciados y sus diagonales resultando ésta, una tarea sencilla que puede desarrollarse con equipos de uso común como una cinta métrica, aunque también pueden utilizarse equipos de medición topográficos como la estación total. La ventaja es que esta actividad puede llevarse a cabo en un tiempo posterior a la ocurrencia del evento que se quiere caracterizar

Los paquetes computacionales usados en la determinación de los campos de velocidades superficiales y la rectificación ortogonal, poseen algoritmos matemáticos de última generación desarrollados y testeados por el grupo de trabajo del CETA- FCEFYN-UNC con el cual la autora de este trabajo ha interactuado intensivamente.

Si bien ambas técnicas son efectivas en la determinación de los campos de velocidades superficiales del flujo en eventos de características extremas (máximos y mínimos hidrológicos) se ha utilizado LSPTV para la cuantificación de caudales de estiajes (mínimos hidrológicos), mientras que LSPIV fue empleada en la cuantificación de caudales de crecidas (máximos hidrológicos). A pesar que la técnica LSPTV puede ser usada a priori para la determinación de caudales de crecidas, en la práctica resulta más sencilla realizar la medición utilizando la metodología LSPIV debido a que la misma reconoce a las ondulaciones visibles del flujo producto de la turbulencia como patrones visuales, haciendo en muchos casos posibles la medición, por lo cual se puede procesar videos de crecidas sin necesidad de sembrar en el flujo las partículas trazadoras. De esta forma se pueden utilizar videos filmados por diferentes usuarios en el momento en que el evento está ocurriendo.

El objetivo de proporcionar a la provincia de Catamarca una nueva metodología que permita la cuantificación del recurso hídrico superficial en eventos de características extremas con un bajo costo y sin exponer al personal a ningún riesgo en el momento de realizar la medición, ha sido logrado en forma satisfactoria generando en la provincia a nivel

gubernamental una nueva herramienta que permite ampliar horizontes hasta el momento no alcanzados desde lo técnico y lo social, impulsando proyectos que a futuro puedan definir líneas específicas de acción y leyes que regulen el comportamiento antrópico ante riesgos naturales inminentes.

6.1.2 CONCLUSIONES SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPTV EN EL RÍO LOS NOGALES DPTO. AMBATO PROVINCIA DE CATAMARCA.

En el capítulo 3 se presentó una evaluación experimental de la técnica LSPTV para la cuantificación de caudales en el río Los Nogales localizados en la localidad turística de El Rodeo en el departamento Ambato provincia de Catamarca.

En total se realizaron cinco mediciones en tres tramos con distintos tipos de trazadores (naranjas, discos circulares de goma eva y bolas de poliestireno expandido). Los resultados se contrastaron satisfactoriamente con aforos realizados por el método de vadeo con un molinete hidrométrico. La máxima diferencia porcentual (%) observada para todas las mediciones entre caudales determinados mediante LSPTV y sus aforos correspondientes fue del 12.9 % y corresponde a la medición experimental ejecutada utilizando naranjas como partículas trazadoras. La mínima diferencia porcentual (%) observada para todas las mediciones entre los caudales determinados mediante LSPTV y sus aforos correspondientes fue del 2.15 % y corresponde a una medición experimental ejecutada utilizando círculos de goma eva como partículas trazadoras. Las mediciones realizadas no son suficientes para establecer el tipo de trazador que mejor se adapta a las condiciones del flujo y que permite determinar con mayor precisión los campos de velocidades superficiales.

En todas las mediciones la diferencia porcentual encontrada entre el valor contrastado y el valor de referencia es aceptable teniendo en cuenta las incertidumbres de ambos métodos, por lo que la metodología LSPTV se considera validada para los cursos de agua superficiales con características físicas similares.

La aplicación de la metodología LSPTV necesita de una preparación previa a la realización de la filmación del evento, debido al uso de partículas trazadoras que deben ser sembradas en el flujo en el momento de la filmación.

6.1.3 CONCLUSIONES SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPIV EN EL RÍO DEL VALLE, DPTO. AMBATO PROVINCIA DE CATAMARCA.

En el capítulo 4 se presentó una evaluación experimental para la cuantificación de caudales de crecidas en un tramo del río Del Valle ubicado en localidad turística de Huaycama, departamento Ambato, provincia de Catamarca. Si bien las condiciones analizadas correspondieron a períodos de crecidas, también se ha demostrado la eficacia de la técnica en períodos de estiajes.

Para su implementación se realizaron en total siete mediciones con diferentes alturas de escala hidrométricas asociadas. En todas ellas se utilizaron como trazadores las ondulaciones visibles del flujo producto de la turbulencia. Los caudales resultantes mediante LSPIV hasta 1.80 m de altura de escala asociada se contrastaron con los caudales obtenidos de la curva H-Q determinada con los datos existentes en la estación fija de aforo de la SSRHN arrojando una diferencia porcentual (%) entre un 15.07 % y un -6.14 % para H= 1.40 y 1.60 respectivamente validando la técnica LSPIV hasta un rango de valores de superficie libre de agua de hasta 1.67 m

La diferencia porcentual del -27.38 % obtenida entre la ecuación teórica de H-Q y LSPIV para H= 1.80 m da evidencia de la falta de datos para el ajuste de la curva en rango superiores a H= 1.67

La máxima diferencia porcentual entre LSPIV y la nueva ecuación con base teórica encontrada teniendo en cuenta la influencia de las planicie de inundación para valores de $H > 2\text{m}$ es del 9.6 %.

Es necesario realizar mas mediciones para lograr calibrar las curvas H-Q encontradas.

Los valores de velocidades media de flujo encontrados mediante el uso de LSPIV hasta una altura de escala asociada de 1.80 m se encuentran dentro de los esperados para ríos de grava y de montaña cuyas características hidráulicas e hidro geomorfológicas han sido expuestas en el capítulo 4 de este trabajo.

Los valores límites de velocidades medias para $H= 3.5$ m y $H=3.6$ m son las mayores registradas para los todos los sistemas fluviales monitoreados por el equipo de trabajo donde se desarrolló esta tesis, por lo que los alcances de esta investigación permitió implementar la técnica LSPIV bajo las condiciones de flujo más desfavorables caracterizadas hasta el momento.

La implementación de la metodología LSPIV no necesita de una preparación previa a la captura del evento, debido a que la técnica utiliza las ondulaciones visibles de flujo producto de la turbulencias como partículas trazadoras haciendo posible la filmación del evento a tiempo real por cualquier usuario que posea el equipo necesario (telefono celular, cámara de foto, filmadora, etc.).

Los valores de caudales máximos medidos mediante el uso de LSPIV marcan un nuevo horizonte en la generación de modelos hidráulicos e hidrológicos permitiendo su calibración, constituyendo, en éste punto, un gran avance en el conocimiento y verificación del comportamiento hidráulico de los distintos sistemas fluviales en la provincia de Catamarca.

6.1.4 CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS POR IMÁGENES DIGITALES A GRAN ESCALA EN LA CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL A NIVEL PROVINCIAL.

En base a la experiencia adquirida en las mediciones, como así también al conocimiento de otros grupos investigación (por ejemplo el Centro de Estudios y Tecnología del Agua de la Facultad de Ciencias Exacta Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba) que actualmente están llevando a cabo proyectos de ciencia ciudadana con resultados prometedores, se elaboró un proyecto de implementación de las técnicas de velocimetría por imágenes digitales en la cuantificación del recurso hídrico superficial a nivel provincial. A pesar que la implementación de las técnicas de velocimetría por imágenes se encuentran en la etapa de idea proyecto, existen en ejecución proyectos de ciencia ciudadana exitosos a nivel nacional e internacional.

En una primera etapa el objetivo fundamental de la implementación de LSPIV es circunscribirlo dentro del ámbito gubernamental, pero en paralelo se trabajará con los elementos necesarios para la inclusión paulatina de las comunidades locales y lograr una participación activa de las mismas en las actividades del proyecto.

El cumplimiento de las metas establecidas en la formulación del proyecto acerca de la implementación de la metodología LSPIV en la cuantificación del recurso superficial a nivel provincial será un gran avance en la política hídrica de la provincia, con beneficios que exceden los límites de la hidráulica incorporando al ciudadano en una participación activa gobierno- comunidad en el tratamiento del riesgo hídrico, que concluya en la elaboración de lineamientos a implementar que sirvan como base a los organismos de incumbencia para realizar una gestión más eficiente de los recursos hídricos.

Por último, el éxito en la implementación del proyecto brindará a Catamarca información precisa y escasa acerca de la cuantificación de caudales en condiciones extremas en todo el territorio provincial. Más allá de los desafíos técnicos, de coordinación y comunicación entre organismos, el mismo propone una forma eficaz para sensibilizar y hacer que la sociedad se comprometa en una participación continua, dinámica y activa para llevar a cabo una eficiente Gestión Integrada de Crecidas creando conciencia y acción pública.

6.2 RECOMENDACIONES

Para la implementación de LSPTV y LSPIV se recomienda avanzar con la determinación del factor α que representa la relación entre la velocidad superficial y la velocidad media del flujo teniendo en cuenta las características físicas y geométricas de cada cauce en la provincia. Para ello se aconseja realizar nuevas mediciones experimentales en distintos cursos fluviales de la provincia.

Es recomendable estudiar la sensibilidad que los diferentes parámetros de calibración de las técnicas LSPTV y LSPIV (intervalo entre imágenes, posición de la cámara, resolución del video, filtro de imágenes, etc.) tienen sobre los resultados y cuál de ellos influye mayormente en la incertidumbre de la determinación del campo de velocidad superficial del flujo y en el caudal.

En la implementación de la metodología LSPIV se debe estudiar la posibilidad de una estación fija de aforo teniendo en cuenta como factor decisivo en la elección del lugar de emplazamiento, la conectividad telefónica y/o de internet existente. Desafortunadamente la provincia de Catamarca no posee una buena conectividad vía celular, gprs u otra, siendo esto un factor limitante a la hora de la transmisión del dato.

Es importante profundizar sobre el estudio de la variación de la sección transversal del cauce sobre todo en los ríos donde los procesos de erosión y sedimentación se encuentran más acentuados.

Las metodologías LSPTV y LSPIV podrían ser también valiosas en el estudio de los procesos de erosión y sedimentación (que han causado daños severos sobre la cuenca del río

Paclín y las cuencas de los ríos El Abra, San Francisco, y Bañado de Ovanta en el Este Catamarqueño) cuya tratativa debe ser motivo de investigación.

Por último, es sabido que la implantación de la conciencia hídrica es muy sensible a las condiciones particulares de vida de cada comunidad local. Por ello, para lograr una colaboración y un cambio de hábito en lo social, se recomienda tratar la temática hídrica buscando el enfoque que mejor respuesta origine para cada comunidad local, abordándola de forma tal que promueva el interés en el ciudadano, atacando en primera instancia el problema hídrico existente en la zona.

6.3 TRABAJOS FUTUROS

- Se avanzará en la reducción de los errores asociados a la oblicuidad de la cámara utilizando en la implementación de las técnicas de velocimetría por imágenes un vehículo aéreo no tripulado (VAN).

- Las aplicaciones vistas anteriormente responden a mediciones puntuales realizadas a partir de un video registrado en una posición única y solo ha captado parte del evento (una medición en el hidrograma de crecida) sin reproducir el hidrograma completo o al menos determinar el pico del mismo. El USGS junto al CETA están implementando el uso de LSPIV en una estación fija para la cuantificación del caudal continuo. (Patalano et al. 2017). En Agosto del 2017 y en base a todos los avances logrados en la implementación de LSPIV como producto de éste trabajo, la Dirección Provincial de Hidrología en coordinación con la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca y otros organismos asociados presentaron el proyecto “Cuantificación y Caracterización de Eventos Hidrológicos Extremos para Mitigar el Riesgo Hídrico asociado en la provincia de Catamarca” en la convocatoria 2017 “Universidad y Desarrollo Local”. Dicho proyecto, contempla la implementación de una estación fija de aforo LSPIV sobre el río del Valle en la localidad de Huaycama (lugar donde se realizaron las mediciones para validar la técnica) y la colaboración de los usuarios locales en el proyecto a través de las filmaciones de los eventos.

Es importante mencionar este proyecto, ya que el mismo resume el interés del gobierno provincial en el desarrollo de la aplicación de la metodología LSPIV con la participación activa de la sociedad. Los objetivos, metas y fundamentos del proyecto presentado para su financiamiento ante la Secretaría de políticas Universitarias (ANEXO I) proponen a nivel

puntual y para un solo lugar de medición, parte de lo planteado en el capítulo 5 del presente escrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvares, J., Baraquet, M. M., Guillén, N. F., & Garcia, C. M. (2017). Calibración de modelos hidrológicos de cuencas de montañas a partir de mediciones experimentales de caudal aplicando LSPIV. *V Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*. Buenos Aires, Argentina.
- Barja, J. S., & Fiaschetti, L. (2015). *Una herramienta integral para el procesamiento de Velocimetría por imágenes de partículas aplicado a problemas de fluidodinámica*. Tesis de grado de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Tandil.
- Barveito, O., Ambrosino, S., & Rydzewski, A. L. (2017). *Estudio hidrogeomorfológico, cuenca del río Paclín- Catamarca*. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Centro de Estudios y Tecnología del Agua.
- Brevis, W., Niño, Y., & Jirka, G. H. (2011). Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry. *Exp. Fluids* 135-147. doi: 10.1007/s00348-010-0907-z
- Burgos, V., Lopez, P., Maza, J., Salcedo, A., Bonilla, J., & Cartagena, A. (2015). *Delimitación de áreas de riesgo hídrico ocasionadas por las crecidas de los ríos El Tala, y Paclín- Catamarca*. Informe Final, Instituto Nacional de Agua.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. Tokyo: McGraw-Hill Higher Education.
- Colegio de geólogos de la provincia de Catamarca. (2014). *CAUSAS DEL DESASTRE, (SÍNTESIS). EL RODEO, AMBATO, PROVINCIA DE CATAMARCA*.
- Comisión de Emergencia para el tratamiento de la problemática de inundaciones en el sur de la provincia de Tucumán, E. d. (2017). *Problemática del área sur de Tucumán, este de Catamarca y Río Hondo - Documento Síntesis*.
- Díaz Lozada, J. M. (2014). Cuantificación y caracterización del escurrimientosuperficial en el sistema fluvial del río Carcarañá. *Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos- Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales- Universidad Nacional de Córdoba*. Córdoba.
- Eremchuk, J., Cisterna, M., Baez, G., Vergara, E., & Costello, M. (2016). *Determinación de áreas inundables de las localidades ubicadas en la cuenca de los ríos Las Cañas y Las Tunas-*

- Bañado de Ovanta del departamento Santa Rosa, provincia de Catamarca.* Colegio de Geólogos de la rprovincia de Catamarca.
- Eremchuk, J., Cisternas, M., Baez, G., Vergara, E., & Costello Marcelo. (2016). *Determinación de áreas inundables de las localidades ubicadas en la cuenca de los ríos El Abra y San Francisco del Este Catamarqueño, provincia de Catamarca.* Colegio de Geólogos de la provincia de Catamarca.
- Gioria, R. (2006). *Estudio de la Línea Ribera y Conexas en el río Del Valle.* Informe Final, CFI (Consejo Federal de Inversiones), San Fernando del Valle de Catamarca.
- Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaranf,, P., . . . Fujita, I. (2012). The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows. *Flow Measurement and Instrumentation*(24), 1-12.
- Henao, M. (2017). Metodología para el análisis de velocimetría de partículas por medio del tratamiento de imágenes. *Tesis inédita de Maestría en Ingeniería – énfasis automatización industrial. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.* Medellín, Colombia.
- Herrero, H. (2011). *Inestabilidades en Aguas Someras en Confluencias.* Tesis Inédita de Maestría , Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Huang, H., Daviri, D., & Gharib, M. (1997). On errors of digital particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* 8: 1427–1440.
- Ishikawa, M.-a., Murai, Y., & Yamamoto, F. (2000). Numerical validation of velocity gradient tensor particle tracking velocimetry for highly deformed flow fields. *Measurements Science Technology*, 11, 677-684.
- ISO 1992. (s.f.). *Measurement of liquid flow in open channel- Parshall and SANIIRI flumes.* ISO 9826:1992 (E).
- ISO 2007. (s.f.). *Hydrometry - Measurement of Liquid Flow in Open Channel Using Current - Meters or Floats.* ISO 748:2007(E).
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., & Dramais, G. (2008). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2), 117-127.

- Johnson, E., & Cowen, E. (2017). Remote Determination of the Velocity Index and Mean. *Water Resources Research*, 53, 7521-7535. doi:10.1002/2017WR020504
- Keane, R., & Adrian, R. (1990). Optimization of particle image velocimeters. Part 1: Double pulsed systems. *Measurement Science and Technology*, 1202-1215. doi:10.1088/0957-0233/1/11/013
- Lobo, A. P., Alvez, J., & Varela, M. (2007). *La Hidrografía y el Agua en Catamarca*. San Fernando del Valle de Catamarca: Ediciones Color S.A.
- Lobo, A. P., García, C. M., & Patalano, A. (2017). Implementación de la técnica experimental de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) para la cuantificación de caudales de crecidas sobre el río Del Valle provincia de Catamarca. *V Simposio de Métodos Experimentales en Hidraulica*. Buenos Aires, Argentina.
- Lopez Alonso, R., Barragán Fernandez, J., & Colomer, M. A. (2008). Predicción de la velocidad media del flujo en ríos de montaña. *Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua*, 15(2), 81-93. ISSN:1134-2196
- Maza, J., Lopez, P., & Burgos, V. (2012). *Delimitación de áreas de Riesgo Hídrico en El Rodeo, departamento Ambato-Catamarca*. Informe Final, Instituto Nacional del Agua.
- Mosa, & Nuñez. (2005). *Estudios topo-batimétricos de seis embalses de la provincia de Catamarca. A solicitud de la Secretaría del Agua y Ambiente*.
- Nación, S. d. (2017). *Red Hidrológica Nacional. Publicaciones Hidrometeorológicas 2016*.
- Niz, A. (2014). *Análisis de base geológico - geomorfológico del evento de remoción en masa en el río Ambato-El Rodeo-Dpto. Amabato- Catamarca*. Facultad ce Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, Instituto de Monitoreo y Control de la Degradación Geoambiental.
- Okamoto, K., Nishio, S., Saga, T., & Kobayashi, T. (2000). Standard images for particle-image. *Meas. Sci. Technol.*, 11, 685-691. doi:10.1088/0957-0233/11/6/311
- Patalano , A., Engel, F., & García, C. M. (2017). Desarrollo de una estación fija y automática para la cuantificación de caudal a partir de la técnica de velocimetría por imágenes LSPIV. *V Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidraulica*. Buenos Aires, Argentina.

- Patalano, A. (2017). *Desarrollo e Implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre*. Tesis inédita de Doctorado, Facultad de Ciencia Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Patalano, A., Lobo, P., Garcia, C. M., Moreno, L., & Girardi, G. (2015). Implementación de técnicas experimentales de velocimetría por imágenes de partículas (PTV y PIV) a gran escala para cuantificar el recurso hídrico superficial en cursos fluviales de la provincia de Catamarca. *IV Simposio de Métodos Experimentales en Hidraulica*. La Plata, Argentina.
- Pizer, S., Amburn, P., Austin, J., Cromartie, R., Geselowitz, A., Greer, T., . . . Zuiderveld, K. (1987). Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing.*, 39, 355-368. doi:10.1016/S0734-189X(87)80186-X
- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., & Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry Experimental Fluid Mechanics*. Heidelberg, Berlin: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-72308-0
- Sanchez Puga, P. (2015). Velocimetría por imágenes de partículas (PIV) aplicado a lechos fluidizados. *Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos*. Leganés, Madrid, España.
- Savid, C., & Wierzbicki, P. (2008). *Caracterización del flujo en modelos físicos del vertedero lateral del aprovechamiento múltiple los monos*. Tesis inédita de grado, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- Takehara, K., & Etoh, T. (1999). A Study on Particle Identification in PTV - Particle Mask Correlation Method. *Journal of Visualization*, 1(3), 313-323.
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Open Research Software*. 2. doi:10.5334/jors.bl
- Varela, M. M. (2012). *Conociendo Nuestros Ríos - Escorrentía superficial de la provincia de Catamarca*. San Fernando del Valle de Catamarca: La Isla.
- Vargas Aranibar, A., Maza, J., Lopez, P., Bonilla, J., & Burgos, V. (2010). *Relevamiento de la disponibilidad de recursos hídricos superficiales de cuenca del salar del Pipanaco, cuenca Abaucán - Colorado - Salado, cuenca Faldeo Oriental del Anacasti*. Informe Final, Instituto Nacional del Agua.

ANEXOS

ANEXO I: CUANTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS PARA MITIGAR EL RIESGO HÍDRICO ASOCIADO EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA

Objetivo General

Cuantificar y caracterizar eventos hidrológicos extremos para evaluar y mitigar el riesgo hídrico asociado en la provincia de Catamarca.

Objetivos particulares:

- Definir las principales características de los eventos hidrológicos extremos que afecta a las cuencas de los principales cursos fluviales de la provincia de Catamarca.
- Evaluar la técnica de velocimetría por imágenes digitales para caracterizar experimentalmente eventos hidrológicos extremos en distintas regiones de la provincia de Catamarca.
- Desarrollar tecnología para implementar estas técnicas en forma fija y móvil.
- Incorporar el concepto de conciencia ciudadana para optimizar el uso de la tecnología desarrollada (a través de los representantes de la sociedad (municipios, defensa civil, bomberos y de las personas locales). En este proyecto además de incorporar a la comunidad a la generación de información para el proyecto se genera conciencia sobre la problemática del riesgo hídrico.
- Asociar los resultados de la cuantificación y caracterización de eventos extremos con mapas de riesgo hídrico elaborados con criterios geomorfológicos.

- Transferir los principales resultados de este proyecto a organismos de gestión provincial y municipal.
- METAS
- Realizar un mapa que indique los distintos tipos de respuesta hidrológica de los principales cursos fluviales.
- Determinar la técnica experimental óptima para medir caudales y velocidades de flujo en cada sistema fluvial durante eventos extraordinarios.
- Implementar una estación fija de medición de caudales con Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) en un sitio óptimo en el río del Valle a la altura de la localidad de Huaycama (Catamarca).
- Lograr la colaboración de la ciudadanía en la generación de la información distribuida (utilizando técnicas desarrolladas en el proyecto) crítica para caracterizar eventos extremos en distintos sitios seleccionados.
- Elaborar un mapa de riesgo hídrico en la zona donde se implementará las técnicas de cuantificación de eventos extremos.
- Generar conciencia en la población local y gobiernos locales sobre el riesgo hídrico y los eventos hidrológicos asociados a ese riesgo.

Problemática a resolver:

En los últimos años ocurrieron en la provincia de Catamarca eventos hidrológicos extremos que motivó el interés de las autoridades para gestionar medidas de mitigación del riesgo hídrico asociado. La población se ha asentado en zonas aledañas a los ríos desconociendo el peligro derivado de esa acción debido a la falta de conciencia del riesgo hídrico y la ausencia de zonificación de áreas inundables originadas entre otras cosas por la

falta de mediciones de variables hidro -meteorológicas e hidrológicas (precipitaciones y caudales, respectivamente).

Fundamentación del proyecto:

A raíz de los eventos hidrológicos ocurridos en los últimos cinco años, se hace necesario contar con información base para el diseño de medidas estructurales y no estructurales requeridas para mitigar los efectos generados por esos eventos. El inadecuado uso del suelo influye de manera negativa en la vulnerabilidad urbana ante inundaciones afectando especialmente a los asentamientos no planificados que avanzan sobre los cursos de agua consolidándose en las planicies de inundación.

La Gestión Integrada de Crecidas (GIC) se sustenta, en primer lugar, por el conocimiento y análisis de la peligrosidad en función de la probabilidad de ocurrencia y su magnitud expresadas en variables como caudal, altura y velocidad del escurrimiento, quienes toman un rol protagónico. Las ausencias de mediciones in situ de dichas variables dificultan la zonificación de áreas susceptibles de riesgo debido a la imposibilidad de calibrar los modelos hidrológicos e hidráulicos necesarios con eventos observados y cuantificados. A lo anterior, se suma los intereses privados relacionados a la regulación del uso del suelo loteando terrenos en zonas cercanas a cursos fluviales promocionando lo atractivo de un asentamiento poblacional a la vera de un río, aprovechando la falsa sensación de seguridad en la población que se ve imposibilitada de visualizar el efecto devastador que pueda tener una crecida de una magnitud, que quizás hasta el momento, no se haya observado, debido al clima árido y semiárido en el cual se encuadra la provincia.

La ejecución de éste proyecto, se fundamenta en el hecho de establecer una base que sirva para una eficiente gestión integral del riesgo, abordando la problemática en tres ejes

temáticos principales. El primero, contempla la implementación de una estación fija de medición LSPIV (Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala) para la cuantificación de caudales y de velocidades de flujo de crecidas de diferentes magnitudes y que será la primera de muchas a colocar en el territorio provincial, permitiendo a mediano y largo plazo calibrar modelos hidrológicos e hidráulicos haciendo más precisa la delimitación de áreas susceptibles de inundación.

El segundo eje temático se centra en lograr la participación activa de la sociedad en las mediciones mediante la filmación de videos de crecidas, para los cuales se hace necesaria la capacitación, a diferentes actores de la sociedad como ser defensa civil, municipalidades, bomberos, policías, habitantes locales cercanos al sector de medición, etc. Con esto se busca crear conciencia de los posibles efectos devastadores que eventos críticos pueden originar, y a su vez, a través de la colaboración activa en el proyecto, hacer sentir al ciudadano partícipe, protagonista y generador de un conocimiento cuyo resultado puede afectar directamente a su comunidad.

El tercer eje temático se fundamenta en el trabajo conjunto con instituciones y organismos locales para generar las medidas de prevención y planes de contingencia antes eventos de ciertas características, contando con la valiosa información generada por el proyecto. Dicha tarea está diseñada para lograr que la comunidad incorpore las medidas y recomendaciones como uso y costumbre, solicitando al gobierno local la planificación del uso del suelo en función de su vulnerabilidad hídrica y exigiendo el cumplimiento de las mismas ante eventos de diferente magnitud.

Breves antecedentes:

En la fundamentación del proyecto se aborda el tratamiento de la problemática en tres ejes principales. Si bien, existen antecedentes de estudios similares en cada uno de ellos, es necesario destacar la vinculación de los mismos para abordar la problemática del riesgo hídrico en forma integral entrelazando los aspectos científicos, tecnológicos, técnicos, institucionales, y sociales. Con respecto al primer eje, que se centra netamente en la obtención del dato de caudal, se puede nombrar como antecedente el desarrollo de una estación fija para la cuantificación de caudal en continuo mediante LSPIV colocada por el CETA (Centro de Estudio y Tecnología del Agua de la FCEFyN – UNC, uno de los grupos que intervienen en este proyecto) y el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) en el arroyo Boneyard, Urbana (EE.UU.). Existen antecedentes de calibración de modelos hidrológicos que utilizan las mediciones de caudal aplicando LSPIV como es el caso de un modelo hidrológico para un tramo del río San Antonio en la provincia de Córdoba. (Alvares *et al.* 2017).

El segundo eje del proyecto se fundamenta en lograr una participación activa de la sociedad en la intervención de la medición de las variables. El proyecto Cazadores de Crecidas creado por investigadores del CETA (Centro de Estudio y Tecnología del Agua) en 2015 permite generar una base de datos de videos y fotos digitales de inundaciones repentinas en ríos de la Provincia de Córdoba. Estos videos y fotos han sido registrados y compartidos por los ciudadanos utilizando tecnología digital como ser teléfonos celulares, cámaras digitales, tablet, etc. Cazadores de Crecidas actualmente se encuentra en ejecución y ha demostrado que los proyectos de Ciencia Ciudadana tienen un gran potencial para mejorar la evaluación del riesgo de inundación en interacción con las comunidades locales.

Para lograr la realización del tercer eje se hace referencia a múltiples estudios de delimitación de riesgo hídrico encargados a terceros particulares por el gobierno de la Provincia de Catamarca y que en base a los resultados obtenidos busca generar un plan de acción para lograr una gestión eficiente del riesgo, en los cuales se puede citar:

- “Delimitación de áreas de Riesgo Hídrico Ocasionadas por Crecidos de los ríos El Tala y Paclín – Catamarca” cuyo objetivo es la zonificación de áreas de riesgo hídrico según un criterio hidráulico.
- Estudio hidro-geomorfológico sobre el río El Tala y Paclín: estos estudios se realizaron para complementar el estudio anterior incorporándole a la temática el enfoque hidro-geomorfológico.
- Determinación de áreas inundables en la cuenca de los ríos El Abra y San Francisco y Las Tunas y Las Cañas del este catamarqueño, con el objeto de establecer acciones de prevención y mitigación de inundaciones.

Estrategia general de la propuesta:

1. La primera parte del proyecto contempla el estudio de las grandes cuencas hidrográficas de la Provincia de Catamarca a modo de caracterizar los eventos hidrológicos extremos y los tipos de respuesta hidrológica de los principales cursos fluviales.
2. Basados en el punto anterior se determinará la posibilidad de implementación y tipo de técnica óptima para medir caudales y velocidad de flujo durante eventos extraordinarios en diferentes puntos de la provincia
3. Se implementará una estación experimental fija y automática para la cuantificación de caudales a partir de la técnica de velocimetría por Imágenes LSPIV sobre el río del Valle en la localidad de Huaycama, departamento Ambato provincia de Catamarca.

La misma cuenta con una cámara de seguridad, montada debajo de un puente peatonal, una computadora que controla la grabación de la cámara y un sensor para medición de niveles. La plataforma de recolección de datos consta de un registrador que graba las mediciones de los sensores de nivel y permite activar la cámara para grabar 30 segundos de videos de 25 fotogramas por segundo cada un intervalo definido cuando el nivel se encuentre por encima de un umbral.

4. Se organizará una jornada de capacitación en la metodología de medición para la estación fija de LSPIV incorporando a la comunidad y a distintas instituciones gubernamentales y no gubernamentales en la generación del dato. En la misma jornada se realizará una charla introductoria sobre la problemática a resolver, por qué es necesario contar con mediciones confiables, qué es el riesgo hídrico y cómo afecta a la sociedad.

5. Se elaborará un modelo hidrológico de precipitación escorrentía que permita vincular precipitaciones a tiempos de recurrencia y a caudales.

6. Con las mediciones experimentales de caudales mediante LSPIV se realizará la calibración del modelo hidrológico generado.

7. Se estudiará la variación del fondo del cauce principal en la zona de medición.

8. Se asociarán los resultados de la cuantificación y caracterización de eventos extremos con mapas de riesgo hídrico elaborados con criterios geomorfológicos

9. Se generarán mapas de riesgo hídrico en la zona donde se implementará las técnicas de cuantificación de eventos extremos (Rio del valle hasta su entrada al dique Las Pirquitas).

10. Conforme a los resultados obtenidos se trabajará conjuntamente con los organismos de incumbencia en las medidas de prevención, planes de contingencia por inundaciones.

11. Se organizará una charla a la comunidad donde se mostrará la delimitación de áreas susceptibles de inundación obtenidas en base a la participación activa de la ciudadanía y se informará sobre las medidas de prevención recomendadas y los planes de contingencia elaborados.

Beneficiarios directos e indirectos:

Los beneficiarios directos de este proyecto serán:

a) La Municipalidad de la Puerta (lugar donde se instalará la estación fija de medición de caudales) departamento Ambato y los habitantes de la Localidad de Huaycama, Colpes y La Puerta;

b) Los representantes de los distintos organismos del poder ejecutivo provincial que tienen directa incumbencia con la problemática a resolver

c) Accionistas en bienes raíces y otros rubros que a través de la definición de áreas seguras de riesgo hídricos podrán buscar emplazamientos seguros para sus inversiones.

Los beneficiarios indirectos serán:

a) Los habitantes no permanentes (turistas) que se alojan en la época veraniega

b) Los profesionales que usarán los datos de medición de caudales de la estación fija en el desarrollo de sus proyectos

c) Los habitantes de poblaciones ubicadas a la vera de sistemas fluviales similares donde concluido este proyecto se utilice para su replicación.