



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ESTIMACIÓN DE CAUDAL Y NIVEL DE AGUA EN ESTERO MARGA MARGA MEDIANTE MÉTODOS NO INTRUSIVOS.

Memoria de Título presentada por

Nicolás Alberto Carreño Lanchipa

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Raúl Flores Audibert

07 de octubre de 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**ESTIMACIÓN DE CAUDAL Y NIVEL DE AGUA EN ESTERO MARGA
MARGA MEDIANTE MÉTODOS NO INTRUSIVOS.**

AUTOR:

Nicolás Alberto Carreño Lanchipa

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Prof. Guía

Raúl Flores Audibert

Miembro 1 Comisión

Raúl Flores Audibert

Miembro 2 Comisión

Álvaro Ossandón

Valparaíso, Chile, octubre de 2024

ESTIMACIÓN DE CAUDAL Y NIVEL DE AGUA EN ESTERO MARGA MARGA POR MEDIO DE MÉTODO NO INTRUSIVOS.

Nicolás Carreño Lanchipa¹, Raúl Flores Audibert²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo determinar el caudal que fluye por el estero Marga Marga de manera no intrusiva mediante videos capturados con dispositivos celulares e implementar una metodología para la calibración de una curva de descarga. Con la finalidad de lograrlo, se determina la velocidad superficial del cauce en diferentes días a través del procesamiento de los videos con técnicas de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) utilizando las herramientas PIVlab y RIVeR, para luego calcular la velocidad media del estero a través de distintos factores de relación. Adicionalmente, se estima la altura de escurrimiento por medio de la configuración geométrica de la sección transversal del estero correspondiente a una sección trapecial, en conjunto de las imágenes rectificadas. De esta manera, mediante resultados del área de la sección antes mencionada y la velocidad media, se estima el caudal del estero. Para validar los resultados, se compara con valores determinados en terreno y utilizados en la fórmula de Manning, obteniendo una gran desviación entre ellos, debido a la alta sensibilidad a la variación de los parámetros involucrados en esta ecuación, la precisión de las mediciones dependiendo de la configuración utilizada en el software para el análisis, las condiciones climáticas y del entorno del estero. Finalmente, se presentan recomendaciones para futuras investigaciones, se concluye respecto al mejoramiento de la obtención de datos y se propone un proyecto futuro.

Palabras claves: Velocidad superficial, caudal, PIVlab, no intrusivo.

1 Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para nuestro planeta, por lo que su buena gestión es una tarea importante para el ecosistema y el bienestar de las personas (Aumassanne & Gaspari, 2023). La disponibilidad de los datos hidrológicos más importantes como lo son el caudal y el nivel de agua es fundamental para comprender el comportamiento de este recurso hídrico y así proveer un control eficiente de él.

El estero Marga Marga es el principal afluente de la ciudad de Viña del Mar, sin embargo, este no cuenta con la instrumentación necesaria para mantener información a largo plazo de las variables hidrológicas más relevantes (González, 2022). Estos datos son necesarios, por ejemplo, para controlar los niveles de agua en la desembocadura, para el manejo de la barra de arena presente allí y para el diseño y operación de los múltiples proyectos que históricamente se han planeado para el cauce. Entre estos proyectos, destaca el plan maestro impulsado por la alcaldesa de Viña del Mar, Macarena Ripamonti aprobado por el concejo municipal de la ciudad consistente en convertir parte del cauce del estero en un parque urbano.

Para la obtención del caudal y nivel de agua en este sector, se presenta en esta investigación una alternativa de monitoreo no intrusivo, el cual consiste en mediciones mediante la implementación de la metodología de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala con la utilización del software PIVlab, el cual permite el análisis de imágenes o videos capturados a través de drones, cámaras, celulares o láser, permitiendo conocer el campo de velocidades superficiales (Tauro et al., 2016). Adicionalmente, se requerirá la utilización de un software que permita la rectificación de aquellos videos que sean

grabados de manera oblicua o no perpendicular al flujo del cauce, siendo RIVeR la herramienta escogida para esta tarea, ya que permite la obtención de los resultados rectificadas mediante la suposición de que todos los puntos de control y la superficie libre se encuentran en el mismo plano de análisis (Patalano et al., 2017)

Este procedimiento da un punto de partida para la calibración de una curva de descarga, ya que representa una alternativa moderna, simple y de bajo costo para el monitoreo del cauce. La calibración de dicha curva radica en la importancia que esta tiene para la gestión de recursos hídricos, la planificación de inundaciones y la evaluación de riesgos ambientales, por lo que tener esta curva y un modelo que permita medir la velocidad del flujo, facilitaría el control del cauce y permitiría comprender cómo varía el caudal del estero en diferentes condiciones climáticas y estacionales, lo que a su vez mejoraría la toma de decisiones para la gestión sostenible del agua y la prevención de inundaciones.

En consecuencia, se requerirá determinar modelos que permitan estimar la velocidad media a partir de los datos obtenidos para las velocidades superficiales. En base a lo anterior, este trabajo buscará determinar una metodología y los parámetros necesarios para la calibración de la curva de descarga, basada en la técnica LSPIV y mediciones indirectas del nivel del agua.

2 Marco teórico

2.1 Cálculo de caudal

El caudal es una medida fundamental en hidrología que describe la cantidad de flujo que pasa por una sección transversal dada en un período de tiempo específico. El método de velocidad área (Genç et al., 2015) es una técnica comúnmente utilizada para determinar el caudal en ríos o canales naturales en donde se relaciona la velocidad del fluido y el área de la sección transversal a través de la cual fluye.

Para calcular el caudal utilizando este método, se mide la velocidad del agua en diferentes puntos a lo ancho de la corriente y se toman medidas del área transversal en esos mismos puntos. Matemáticamente esto se puede expresar mediante la Ecuación (1).

$$Q = \iint v \, dA \quad (1)$$

En donde Q representa al caudal, v corresponde a la velocidad del fluido en un punto dado de la sección transversal y dA representa un elemento diferencial de área. Esta integral suma las velocidades del fluido en todos los elementos diferenciales de área dentro de la sección transversal, multiplicadas por el tamaño de cada elemento diferencial de área, para calcular el volumen total de fluido que pasa a través de la sección en un período de tiempo dado.

A modo de simplificación se utiliza un valor medio de las velocidades en la profundidad. En la literatura se han propuesto diversas maneras de calcular la velocidad media en función de la velocidad superficial, principalmente relacionando estos valores a través de un factor de correlación c .

$$c = \frac{v_{media}}{v_{sup}} \quad (2)$$

El valor de c en la Ecuación (2) ha sido determinado por diversos autores a través de propuestas diferentes. El más utilizado en canales abiertos o esteros naturales es el coeficiente 0.85 (Rantz, 1982), mientras que otras indican que esta constante puede variar dependiendo del nivel de agua en el río, cuyos valores corresponden a 0.8 para casos en la que la profundidad del río es menor a 2 metros y 0.9 para profundidades mayores (Hauet et al., 2018). Por otro lado, Schoninger et al. (2023), proponen un valor de c igual a 1.13, obtenido de manera experimental y recomendado para canales en donde el ancho sea mayor a 10 veces la altura de escurrimiento y finalmente Patalano (2017) recomienda utilizar un factor c cercano a 1 ya que con este valor obtuvo los mejores resultados en comparación a los otros recomendados.

Con lo anterior, se dispone de la Ecuación (3) con la cual es posible calcular el caudal a través de la velocidad superficial del flujo. Esta última se obtiene mediante el procesamiento de los videos con el

método de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala en el software PIVlab (Thielicke & Stamhuis, 2014).

$$Q = v_{media} \times \text{Área} \quad (3)$$

2.2 Velocidad superficial

En esta investigación se implementa el método de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala o LSPIV (Tauro et al., 2016), el cual se basa en el cálculo de los desplazamientos a través del movimiento de un grupo de partículas y la correlación cruzada entre áreas de interrogación presente en los frames que componen los videos (Thielicke & Stamhuis, 2014). Estas áreas de interrogación son la parte fundamental del proceso de análisis, ya que luego de capturar las imágenes del flujo del agua, PIVlab divide los frames en pequeñas regiones o áreas de interrogación en donde el software compara el patrón de movimiento de las partículas en frames consecutivos. En otras palabras, es la medición cuantitativa precisa de vectores dados por trazadores o las ondas del flujo en un gran número de puntos simultáneamente.

Para la implementación del método de LSPIV se utiliza PIVlab, una toolbox de Matlab desarrollado por Thielicke & Stamhuis (2014), en el cual se sigue un procedimiento general que incluye la importación de frames, el marcado de las partículas en cada uno de ellos, su respectivo procesamiento utilizando diversos algoritmos, el cálculo de las velocidades, el análisis y la visualización de los resultados.

Dentro de los algoritmos que utiliza este software se destacan los siguientes:

- La correlación cruzada, la cual compara la intensidad de píxeles en dos frames sucesivos y busca el mejor ajuste entre regiones de estos. Este proceso se repite durante la secuencia de ellos para obtener los desplazamientos de las partículas.
- La interpolación entre las posiciones de las partículas para mejorar la precisión de los resultados.
- Una ventana de correlación para determinar el área de análisis en la que se buscarán coincidencias entre los frames.
- Se realiza un filtrado y procesamiento a los que se someten los frames para mejorar la calidad de los datos, esto puede incluir correcciones de fondo, ajustes de contrastes y eliminación de ruido.

Con este procesamiento, el software entrega la información de velocidad superficial requerida, tanto media como discreta a lo largo de todo el espacio analizado.

2.3 Curva de descarga

Esta curva es una representación gráfica que muestra la relación entre el caudal y el nivel de agua en un punto específico a lo largo de un río, canal o estructura hidráulica. Esta relación se establece a través de mediciones y análisis de datos. Existen diversas formas de calibrar esta curva, por un lado, el ajuste matemático de una función a través de la extracción de datos de caudal y de niveles de agua, mientras que, por otro lado, se tienen los ajustes físicos mostrados en las Ecuaciones (5) y (6) respectivamente, siendo la ecuación de Manning el más conocido para este último tipo de ajuste.

$$Q = a \cdot (H - b)^c \quad (5)$$

$$\frac{Q \cdot n}{\sqrt{i}} = A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

Donde a , b y c de la Ecuación (5) corresponden a parámetros obtenidos a través del ajuste matemático de los datos, Q al caudal y H al nivel de agua presente, mientras que para la Ecuación (6) Q de igual manera representa el caudal, n corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning, i es la pendiente hidráulica del canal la cual se relaciona con la diferencia de energía entre dos puntos, sin embargo, en la mayoría de los casos se utiliza la pendiente geométrica del canal para referirse a este parámetro, A representa el área de la sección transversal que atraviesa el flujo y R_h al radio hidráulico.

Las curvas de descarga son fundamentales para una buena gestión y monitoreo del estero, además de ser de gran importancia en diversas aplicaciones prácticas como el diseño de infraestructura hidráulica,

planificación de la gestión de inundaciones y para la evaluación y control de la capacidad de flujo en el canal.

3 Objetivos

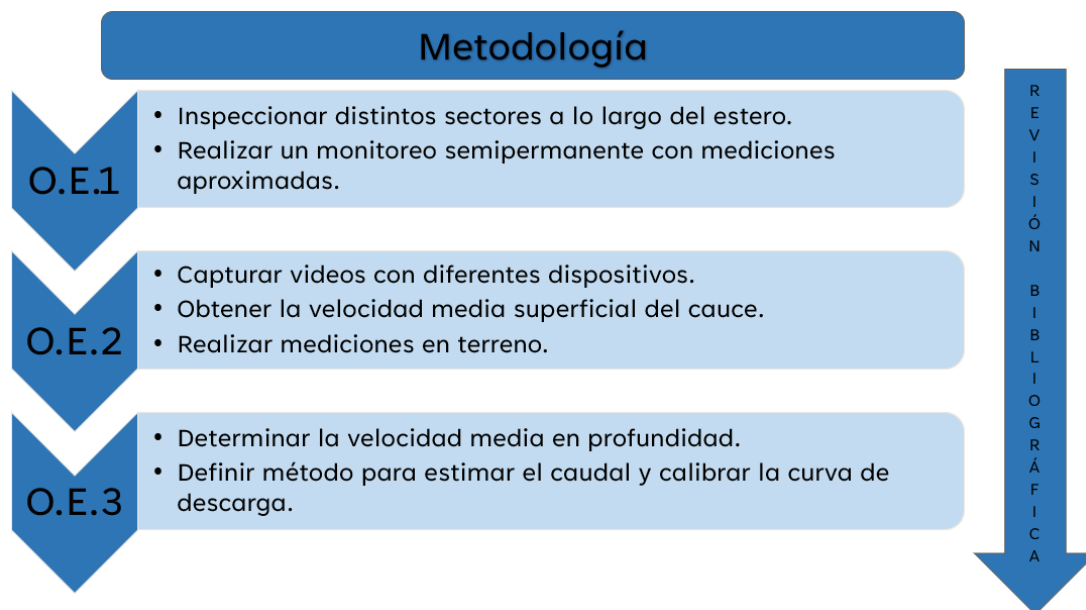
3.1 Objetivo general

Definir una metodología para la estimación de caudales, nivel de agua y calibración de una curva de descarga para el estero Marga Marga a través de técnicas de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala y mediciones indirectas.

3.2 Objetivos específicos

- Definir un sector óptimo del estero para realizar las mediciones y establecer un reporte del comportamiento del cauce en ese sector.
- Realizar mediciones de velocidades superficiales y niveles de agua.
- Definir metodología para estimar el caudal, nivel de agua y para calibrar una curva de descarga en el sector del estero.

4 Metodología



4.1 Elección del lugar

En primera instancia se inspeccionan distintos sectores a lo largo del estero en los cuales se consideren los parámetros hidráulicos conceptuales y las características geométricas del sector que atraviesa el cauce, más específicamente, considerar las singularidades existentes en el canal, que cuente con una sección transversal bien definida para facilitar el análisis y, por último, tener en cuenta la seguridad del lugar. En la Figura 1 y Figura 2 se muestran dos sectores candidatos para el estudio, siendo el segundo el escogido por los puntos mencionados anteriormente. Este lugar se ubica debajo del puente los Castaños, entre la calle 1 Norte y calle La Marina.



Figura 1. Primera opción de sector.



Figura 2. Segunda opción de sector.

Una vez escogido el sector, se realiza un monitoreo semipermanente con mediciones aproximadas de velocidad superficial y nivel de agua para estimar en primera instancia el comportamiento del cauce. Para la estimación de la velocidad se utilizará el método del flotador que consiste en medir la velocidad de algún objeto que viaje en la superficie del canal midiendo el tiempo que se demore en recorrer cierta distancia (Bello & Pino, 2000), mientras que para las mediciones de nivel de agua dentro del estero se realizarán de manera directa utilizando una cinta métrica.

4.2 Mediciones

Con respecto a este punto, se presentan actividades que tienen como finalidad obtener las mediciones de los datos hidrológicos más importantes del estero, es decir, la velocidad, caudal y nivel de agua. Dentro de las actividades propuestas se presentan la captura de videos a través de distintos dispositivos, como lo son celulares y cámaras fotográficas, luego, el procesamiento de estos a través del toolbox

PIVlab y RIVeR para obtener la velocidad superficial y finalmente mediciones de nivel de agua a través de imágenes rectificadas.

4.2.1 Captura de videos

La captura de videos se realizará a través de los dispositivos mencionados en el punto anterior, sin embargo, desde diferentes puntos de referencia. Los videos obtenidos mediante celulares y cámaras fotográficas serán grabados con una cierta inclinación tanto en la sección transversal como longitudinal del cauce. Para mayor detalle, en la

Figura 3 se presenta el sector en donde se grabará de manera transversal al cauce y en la

Figura 4 el lugar en donde se hará una toma longitudinal del estero. Se enfatizará la grabación con celulares, ya que son dispositivos al alcance de la gran mayoría de personas y permiten la grabación de videos de manera instantánea.



Figura 3. Vista transversal del estero.



Figura 4. Vista longitudinal del estero.

4.2.2 Velocidad superficial

La metodología para la obtención de esta velocidad es la velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV), la que busca obtener mapas de velocidades con el procesamiento de los videos capturados en el software PIVlab, herramienta desarrollada en Matlab por Thielicke & Stamhuis (2014), para luego rectificar estos resultados mediante el software RIVeR y obtener mejores resultados.

4.2.2.1 PIVlab y RIVeR

PIVLab es un conjunto de herramientas desarrolladas para MATLAB, el cual permite el análisis de los videos con la utilización de algoritmos descritos en puntos anteriores que permiten implementar la metodología LSPIV, mientras que RIVeR permite rectificar los resultados obtenidos cuando estos no sean grabados de manera perpendicular al flujo del agua. Para ello, se debe seguir una serie de pasos, siendo el primero la extracción de frames para cada video (Ver Figura 5).

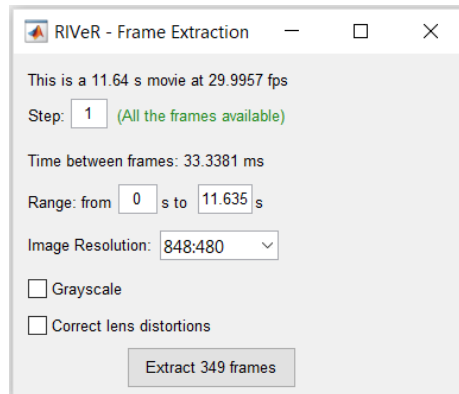


Figura 5. Extracción de frames.

Una vez se tienen todos los frames, se delimita la región de interés para el cálculo de las velocidades en cada uno de ellos, mediante el dibujo de una “máscara” como lo denomina PIVlab, tal como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Selección del área de interés mediante el uso de máscaras.

Con la región de interés definida, se sigue con el preprocesamiento de las imágenes en donde el software ofrece una serie de filtros y configuraciones para identificar de la mejor manera posible los vectores en la superficie del cauce. En la Figura 7 se presenta el cuadro con la configuración utilizada.

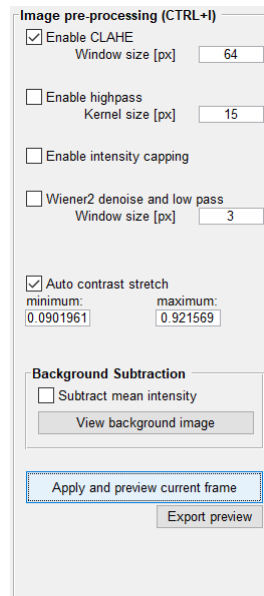


Figura 7. Configuración de filtros utilizada.

Luego, se empieza con el análisis de los frames y las áreas de interrogación, para lo cual PIVlab dispone de varias opciones como los distintos algoritmos de cálculo, diferentes tamaños para estas áreas, entre otros. Para el análisis, el autor recomienda utilizar un algoritmo de cálculo a través de la transformada de Fourier (FFT) y, por otro lado, sugiere utilizar un área de interrogación de 64 pixeles e ir disminuyéndola a la mitad en cada paso del análisis. En la Figura 8 se presenta la configuración para el análisis, mientras que en la Figura 9 se muestran las áreas de interrogación. Si bien, utilizar 4 pasos entregaría mejores resultados dada su precisión, este proceso tendría un costo computacional demasiado alto para los equipos con los que se dispone, por lo que se llega hasta el tercer paso.

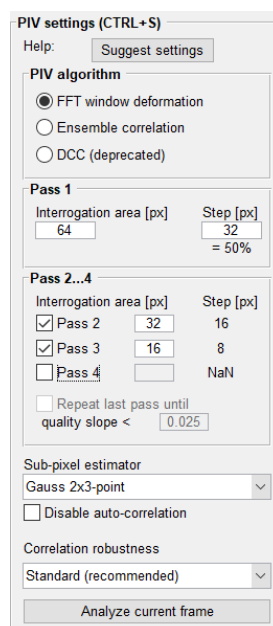


Figura 8. Configuración para el análisis de los frames.



Figura 9. Aplicación de áreas de interrogación.

Este análisis es aplicado a todos los frames obteniendo como resultado la Figura 10, en donde se muestran los vectores resultantes con información en unidad de [píxel/frame]. Además, el software da la opción de filtrar aquellos vectores con valores que se encuentren fuera del rango esperado e interpolarlos a través de una herramienta de post procesamiento denominada “vector validation”, en donde se seleccionan los límites aceptables de velocidad de manera gráfica presentes en la Figura 11.

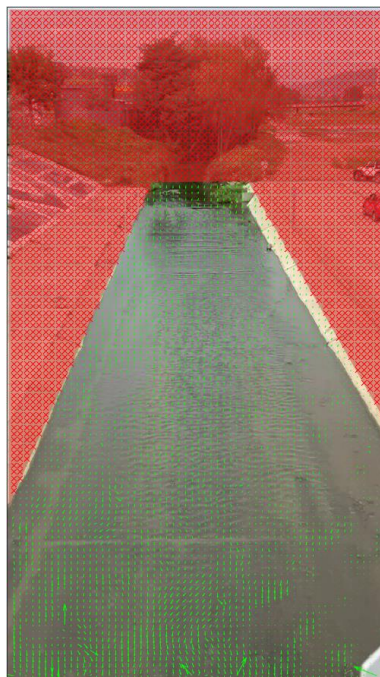


Figura 10. Resultado de vectores generados.

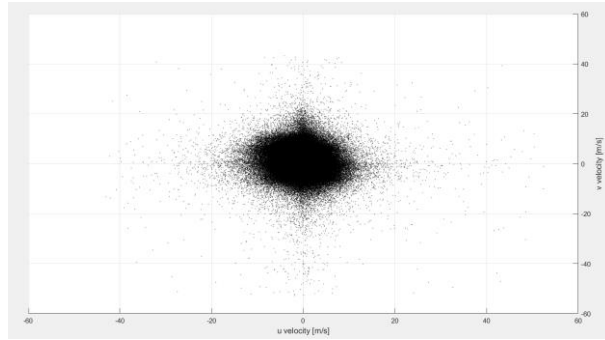


Figura 11. Filtro para vectores fuera de rango.

Teniendo los resultados, PIVlab da la opción de obtener un frame adicional que contenga el valor medio de cada vector con la información combinada de todos los frames analizados e interpolados, con la cual luego se trabaja para ser rectificadas.

Con el análisis PIVlab listo, se sigue con el proceso de rectificación de resultados en RIVeR, el cual comienza cargando la sesión de PIVlab y escogiendo una imagen de fondo, en donde se presentarán los resultados rectificadas. Esta imagen puede ser cualquiera de los frames extraídos en un comienzo o alguna externa pero que coincida con la resolución de las imágenes procesadas anteriormente.

Una vez escogida la imagen, se definen 4 puntos de control en ella, los cuales permitirán rectificar los resultados, ya que RIVeR considerará que la superficie del agua está en el mismo plano que los puntos de control. Estos puntos y sus coordenadas se presentan en la Figura 12 y 13.

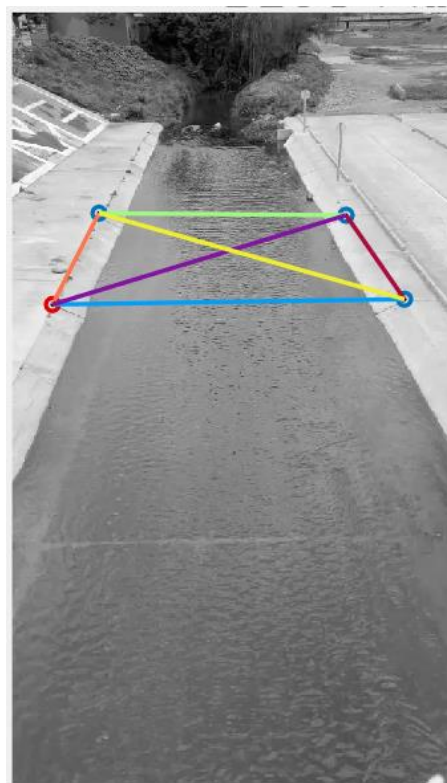


Figura 12. Puntos de control escogidos.

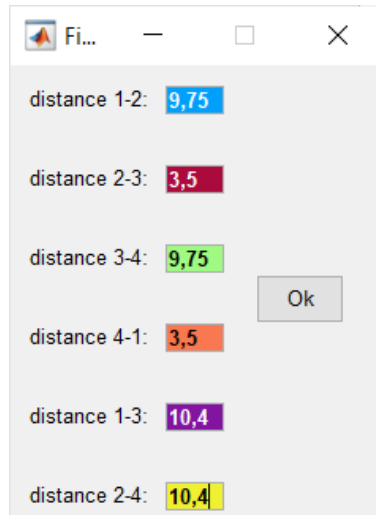


Figura 13. Distancias entre los puntos de control.

Por último, los resultados obtenidos durante el procesamiento de imágenes quedan en unidad de “pixel por frame”, sin embargo, la velocidad se mide en metros por segundo, por lo que es necesario definir el tiempo entre cada frame para realizar esta conversión. El tiempo entre frames viene ya definido por el tipo de grabación, para esta investigación, el celular captura los videos a 30 frames por segundo o más conocidos como fps.

Completando todos los pasos mencionados anteriormente, se obtienen los resultados y la imagen rectificadas, los que se muestran en las Figuras 14 y 15.

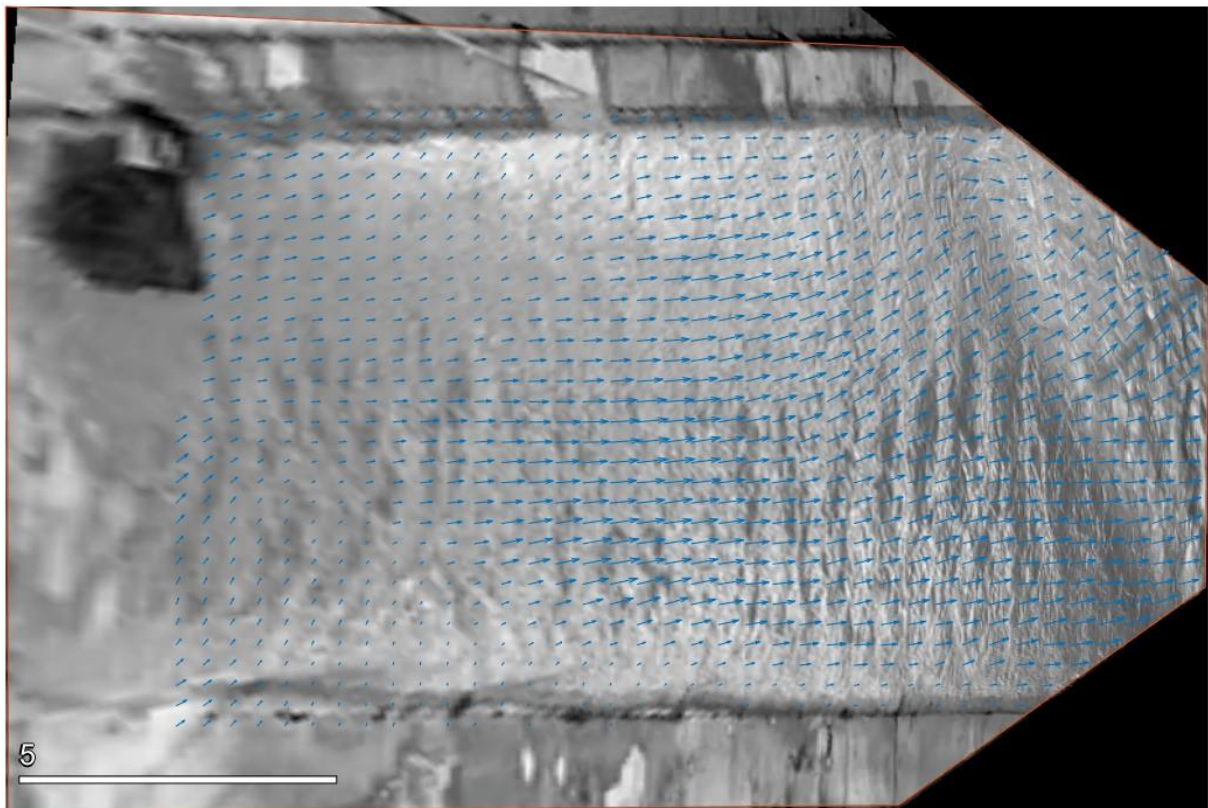


Figura 14. Resultados de vectores e imagen rectificada.

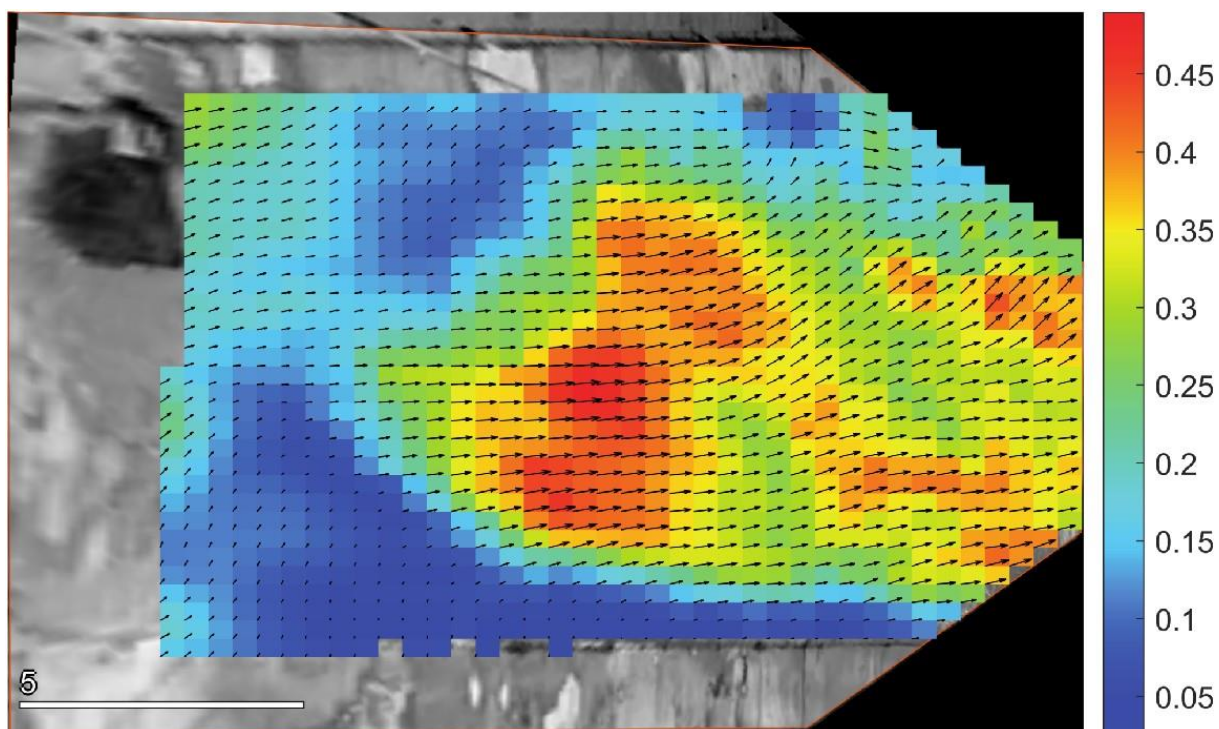


Figura 15. Mapa de calor con la magnitud de los vectores de velocidad obtenidos en [m/s].

4.2.3 Niveles de agua

Como última actividad para el segundo objetivo específico se tiene la medición de altura de agua en el estero, para ello, se utilizará la imagen rectificada obtenida en RIVeR junto a la geometría del estero para poder determinar la altura de escurrimiento. Específicamente se obtendrá la distancia seca en el talud del estero y junto al ángulo de inclinación de este, se calcula el nivel de agua. En la Figura 16 se presenta la distancia comentada en el talud y en las Figuras 17 y 18 la configuración geométrica del estero. Cabe mencionar que los 0.5 metros corresponden a la altura máxima del canal sin que este se desborde.

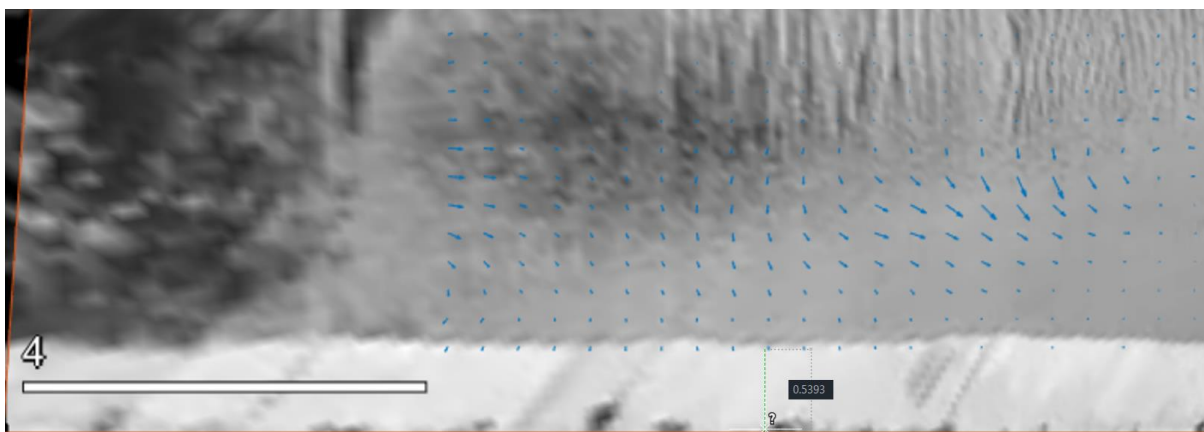


Figura 16. Distancia seca en el talud con la imagen rectificada.

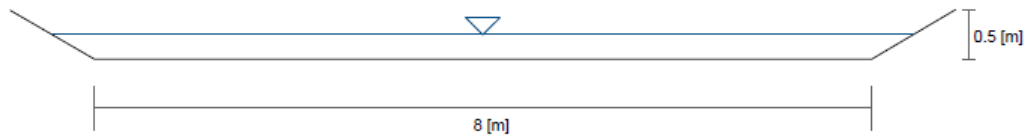


Figura 17. Sección transversal del estero.



Figura 18. Detalle de la configuración del estero.

4.3 Curva de descarga

Finalmente, se busca definir una metodología para la calibración de una curva de descarga en el sector del estero en estudio. Los datos necesarios para calibrar esta curva son los caudales con sus respectivas alturas. Una vez se tienen estos datos, se les realiza el ajuste ya sea matemático o físico a estos puntos para obtener la curva deseada. El ajuste matemático viene determinado por la Ecuación (5) mientras que el físico por la Ecuación (6). Para obtener los caudales en el estero no basta con la velocidad superficial para su cálculo, ya que no es una buena representación de la velocidad en la profundidad, por lo que se requiere de una velocidad media en la sección transversal del canal para obtener mejores resultados.

4.3.1 Velocidad media en la profundidad

Como se menciona en puntos anteriores, la metodología LSPIV permite obtener la velocidad superficial del cauce mediante el análisis de los videos, sin embargo, es necesario conocer el comportamiento de la velocidad en la profundidad para la estimación del caudal. Se puede establecer una relación entre la velocidad superficial y la velocidad media a través de un factor que permite describir de manera simplificada la variación de la velocidad en la profundidad. Para esta investigación los resultados se obtienen utilizando los factores propuestos por los autores presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Factor c para relacionar la velocidad superficial con la velocidad media.

Autor/es	Factor c propuesto
Rantz (1982)	0.85
Hauet et al. (2018)	0.8
Schoninger et al. (2023)	1.13
Patalano (2017)	1

4.3.2 Estimación de caudal

Es posible estimar el caudal a través del método área-velocidad dispuesto en la Ecuación (1), ya que, el valor medio de la velocidad en el canal se puede calcular en función de la velocidad superficial y, por otro lado, se cuenta con la geometría de la sección transversal del canal junto al nivel de agua correspondiente a cada medición de velocidad superficial. Teniendo estos datos, es factible comenzar a definir una metodología para la calibración de una curva de descarga a través de los ajustes mencionados anteriormente.

5 Resultados y discusión

5.1.1 Resultados

En primer lugar, se tienen las Figuras 17 y 18 con la sección del canal y sus respectivas dimensiones medidas en terreno, con lo cual se determina la Ecuación (7), la que establece la relación entre la distancia seca en el talud del estero con la altura de escurrimiento de este.

$$h = (1 - x) \times 0.5 \quad (7)$$

Donde h es la altura de escurrimiento y x es la distancia seca en el talud medida en la imagen rectificadas. Esta última distancia se determina estableciendo una relación entre las distancias de la Figura 16 de este documento.

Además, con Google Earth se determinó la pendiente en el sector correspondiente a 0.3% y el coeficiente de rugosidad de Manning utilizado fue de 0.017 ya que se trata de un canal artificial de hormigón alisado (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2016).

Siguiendo con la metodología enumerada en los puntos anteriores, se muestran en la Figura 19, 20, 21 y 22 frames de algunos de los videos con la finalidad de evidenciar la grabación de estos.



Figura 19. Frame video 5 de septiembre de 2023.

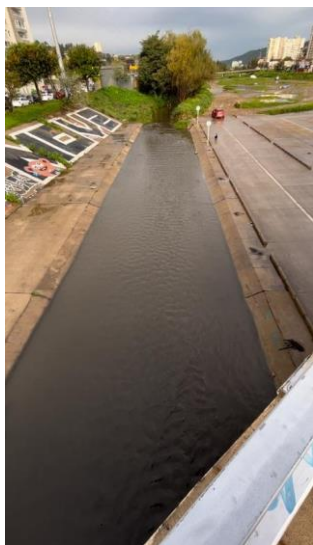


Figura 20. Frame video 10 de septiembre de 2023.

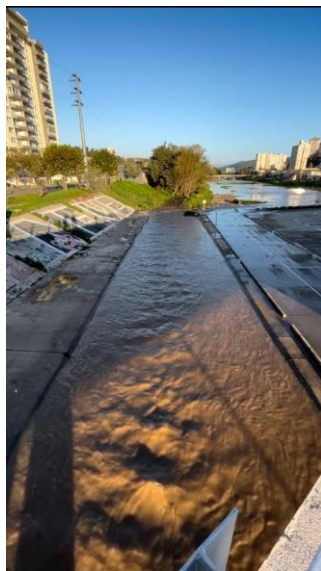


Figura 21. Frame video 11 de septiembre de 2023.



Figura 22. Frame video 11 de noviembre de 2023.

Si bien solo se muestran 4 imágenes, se tienen 12 videos que se analizan con PIVLAB y RIVeR siguiendo lo descrito en la metodología. De este análisis se obtiene la velocidad superficial para cada video, el área transversal de cierta sección del cauce y por consiguiente el caudal del estero.

A modo de resumen se presentan las Tablas 2, 3 y 4 con los resultados de las velocidades superficiales de cada video, la velocidad media determinada con las diferentes ecuaciones, la respectiva altura de escurrimiento y finalmente el caudal obtenido.

Tabla 2. Velocidades obtenidas en distintos días.

Día	Velocidad sup PIVlab [m/s]	Velocidad Rantz [m/s]	Velocidad Hauet [m/s]	Velocidad Schoninger [m/s]	Velocidad Patalano [m/s]
01-09-2023	0,090	0,077	0,072	0,102	0,090
02-09-2023	0,190	0,162	0,152	0,215	0,190
06-09-2023	0,250	0,213	0,200	0,283	0,250
07-09-2023	0,200	0,170	0,160	0,226	0,200
08-09-2023	0,060	0,051	0,048	0,068	0,060
09-09-2023	0,120	0,102	0,096	0,136	0,120
10-09-2023	0,050	0,043	0,040	0,057	0,050
11-09-2023	0,450	0,383	0,360	0,509	0,450
27-10-2023	0,070	0,060	0,056	0,079	0,070
29-10-2023	0,350	0,298	0,280	0,396	0,350
30-10-2023	0,120	0,102	0,096	0,136	0,120
11-11-2023	0,300	0,255	0,240	0,339	0,300

Tabla 3. Valores rectificados.

Día	Altura seca rectificada en el talud [m]	Altura rectificada [m]	Área rectificada [m ²]
01-09-2023	0,830	0,085	0,686
02-09-2023	0,840	0,080	0,646
06-09-2023	0,850	0,075	0,605
07-09-2023	0,820	0,090	0,727
08-09-2023	0,800	0,100	0,809
09-09-2023	0,860	0,070	0,564
10-09-2023	0,810	0,095	0,768
11-09-2023	0,280	0,360	2,992
27-10-2023	0,850	0,075	0,605
29-10-2023	0,790	0,105	0,850
30-10-2023	0,890	0,055	0,443
11-11-2023	0,840	0,080	0,646

Tabla 4. Caudales obtenidos.

Día	Caudal Rantz [m ³ /s]	Caudal Hauet [m ³ /s]	Caudal Schoninger [m ³ /s]	Caudal Patalano [m ³ /s]
01-09-2023	0,052	0,049	0,070	0,062
02-09-2023	0,104	0,098	0,139	0,123
06-09-2023	0,129	0,121	0,171	0,151
07-09-2023	0,124	0,116	0,164	0,145
08-09-2023	0,041	0,039	0,055	0,049
09-09-2023	0,058	0,054	0,077	0,068
10-09-2023	0,033	0,031	0,043	0,038
11-09-2023	1,144	1,077	1,521	1,346
27-10-2023	0,036	0,034	0,048	0,042
29-10-2023	0,253	0,238	0,336	0,297
30-10-2023	0,045	0,042	0,060	0,053
11-11-2023	0,165	0,155	0,219	0,194

De los resultados obtenidos se puede observar que la altura de escurrimiento no varía mucho con los días, ya que toma valores entre 7 a 10 [cm] aproximadamente a excepción del día 11 de septiembre en donde se aprecia un aumento de todos los valores dado que se presentó lluvia durante la mañana de ese día. Por otro lado, los valores de velocidad superficial y en consecuencia velocidad media, varían bastante, desde los 0,04 [m/s] hasta los 0,5 [m/s] aproximadamente. La variación en estos valores se puede asociar a varios motivos como por ejemplo a la falta de trazadores, los efectos de sombra y luz solar, el bajo caudal de este estero o la presencia de agentes externos en la base del estero, como la basura o musgos por la humedad. Sin embargo, la desviación entre estos valores podría disminuir incluyendo un paso más en la definición de áreas de interrogación para así obtener resultados más precisos sin considerar el coste computacional que esto requiera.

Finalmente, se calcula el caudal promedio con los distintos coeficientes c para graficar la curva de descarga, la cual se presenta en la Figura 23.

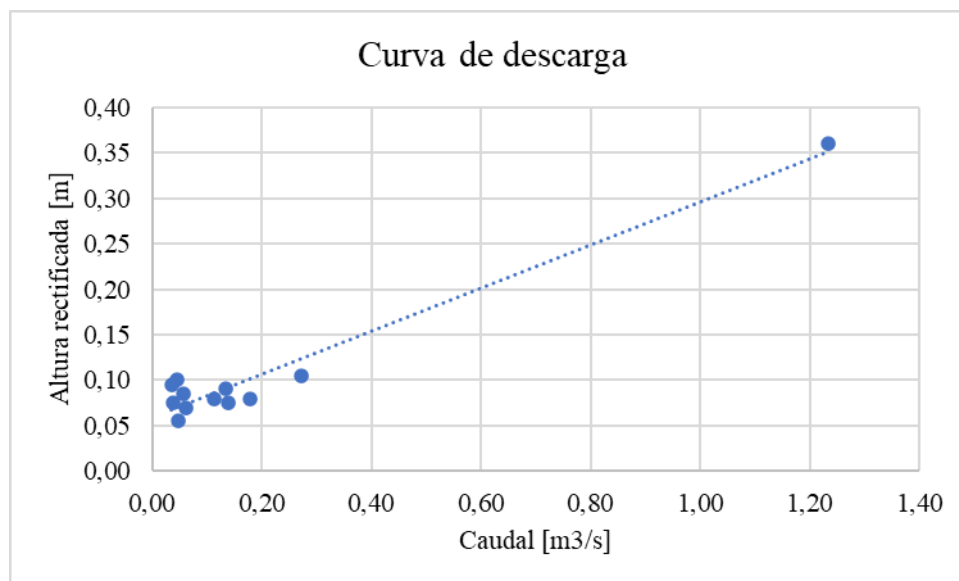


Figura 23. Curva de descarga con dato desviado.

De la gráfica se observa que existe un valor desviado a los demás, el cual corresponde a la grabación del día de lluvia mencionada en el punto anterior. Aun eliminando este valor, no se obtiene un ajuste claro en la curva de descarga, tal como se presenta en la Figura 24, debido a los diversos factores que afectan la obtención de mejores resultados y a la poca cantidad de mediciones.

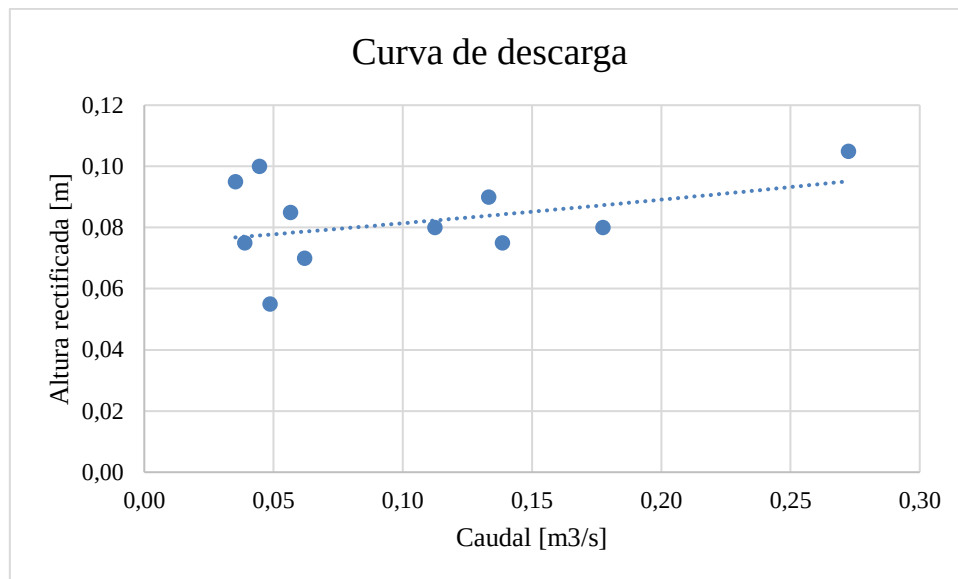


Figura 24. Curva de descarga con dato desviado eliminado.

5.1.2 Validación de resultados

Dado que el estero no cuenta con estación de aforo, no hay datos reales con los que se puedan comparar de manera directa los obtenidos en esta investigación, sin embargo, para validar los resultados se compararán 4 de ellos con 4 resultados obtenidos a través de la ecuación de Manning, la cual es usada y reconocida universalmente para la determinación del caudal. Para esto, se utiliza la pendiente y el coeficiente de Manning mencionados en el punto 5.1.1 de este documento, además de la medición del talud seco tomada en terreno con una cinta métrica durante los 4 días en que se grabaron los videos a comparar. Los resultados de esta comparación se presentan en la Tabla 5 y 6.

Tabla 5. Resultados aplicando Manning.

Día	Distancia seca en el talud [m]	Altura de escurrimiento [m]	Velocidad Manning [m/s]	Caudal Manning [m3/s]
27-10-2023	0,88	0,06	0,304	0,147
29-10-2023	0,82	0,09	0,396	0,288
30-10-2023	0,86	0,07	0,336	0,19
11-11-2023	0,80	0,10	0,423	0,342

Tabla 6. Comparación de caudales.

Día	Caudal Manning [m ³ /s]	Caudal Rantz [m ³ /s]	Caudal Hauet [m ³ /s]	Caudal Schoninger [m ³ /s]	Caudal Patalano [m ³ /s]
27-10-2023	0,147	0,036	0,034	0,048	0,042
29-10-2023	0,288	0,289	0,272	0,384	0,340
30-10-2023	0,190	0,045	0,042	0,060	0,053
11-11-2023	0,342	0,165	0,155	0,219	0,194

De estos resultados se aprecia que, para velocidades menores, el coeficiente propuesto por Schoninger et al., entrega mejores resultados, mientras que para velocidades mayores con el factor recomendado por Rantz se obtienen valores más cercanos a los resultados aplicando la metodología de Manning.

Dado que los resultados obtenidos que utilizan Manning muestran caudales significativamente mayores a los obtenidos mediante el uso de las herramientas PIVlab y RIVeR, se realiza un análisis de sensibilidad con respecto a los parámetros de la ecuación de Manning, que tiene como objetivo identificar cómo varía el caudal al ir variando el coeficiente de rugosidad n , la altura de escurrimiento y dejando los demás parámetros constantes.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de caudal variando los parámetros mencionados anteriormente en donde los datos marcados con café corresponden a la altura de escurrimiento, con azul se marcan las distancias secas en el talud, con verde los distintos coeficientes de rugosidad y en amarillo junto a los valores con fondo blanco corresponden a valores de caudal.

Tabla 7. Análisis de sensibilidad ecuación de Manning.

	0,2	0,15	0,1	0,05
0,266	0,6	0,7	0,8	0,9
0,005	5,83	3,63	1,86	0,59
0,010	2,91	1,82	0,93	0,30
0,015	1,94	1,21	0,62	0,20
0,020	1,46	0,91	0,47	0,15
0,025	1,17	0,73	0,37	0,12
0,030	0,97	0,61	0,31	0,10
0,035	0,83	0,52	0,27	0,08
0,040	0,73	0,45	0,23	0,07
0,045	0,65	0,40	0,21	0,07
0,050	0,58	0,36	0,19	0,06

Adicionalmente, se presenta el gráfico con estas variaciones en la Figura 25 para poder visualizar de mejor manera estos valores.

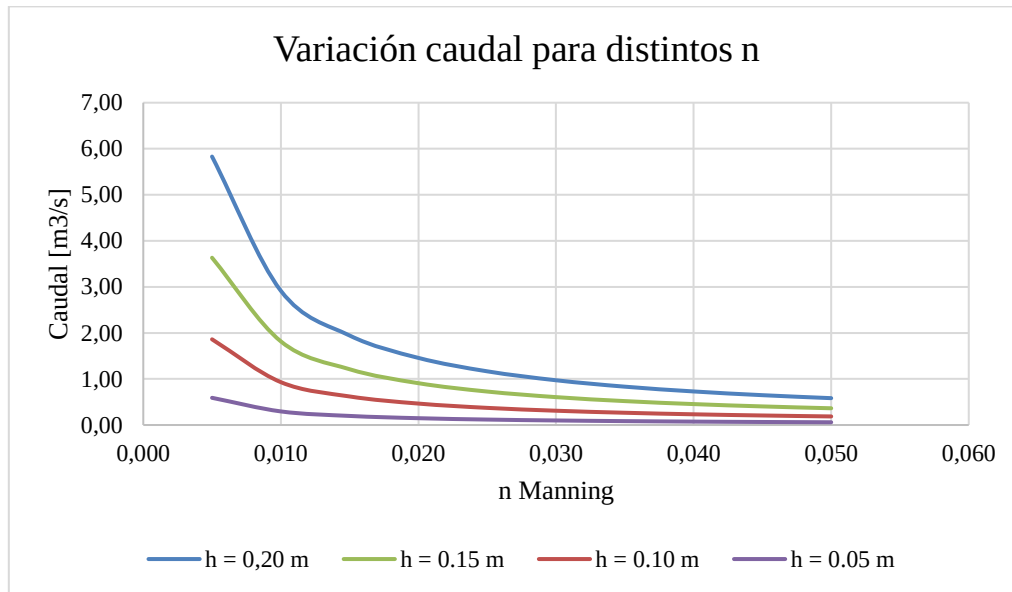


Figura 25. Gráfica del análisis de sensibilidad.

De acuerdo con la literatura, en canales revestidos de hormigón, el coeficiente de rugosidad n varía entre 0,015 y 0,03 aproximadamente (Ven Te Chow, 1994). Al revisar los datos presentados en la Tabla 7, para estos valores de n , se observa que el caudal incrementa casi al doble para una altura de escurrimiento específica. Este aumento en el caudal sugiere una sensibilidad significativa ante cambios en el coeficiente de rugosidad en este tipo de canales, por lo que se destaca la importancia de seleccionar un valor correcto de n para la estimación de caudal.

Este análisis contribuye a mejorar la precisión y disminuir la incertidumbre en la estimación de caudal en futuros estudios y aplicaciones prácticas en el estero Marga Marga.

6 Conclusiones y recomendaciones

Este estudio lleva a cabo el análisis de videos que permiten estimar el caudal del estero Marga Marga a través de las herramientas PIVlab y RIVeR, validando los resultados obtenidos mediante la aplicación de la ecuación de Manning. Si bien no se cuenta con un amplio catálogo de resultados aplicando esta última técnica, los valores muestran que los caudales calculados con métodos computacionales son menores a los esperados en comparación a los obtenidos con la ecuación de Manning.

Diversos son los motivos que podrían explicar esta discrepancia o variación entre los resultados. En primer lugar y más relevante es la ausencia de trazadores en el agua, lo cual podría haber afectado la precisión de las mediciones realizadas con PIVlab (Flores et al., 2020). Los trazadores, como partículas de color, sustancias químicas específicas o pequeños objetos son de gran ayuda para el seguimiento preciso del movimiento del flujo, ya que ellos permiten visualizar y seguir la dirección de las ondas del cauce.

Otros factores a tener en cuenta en la diferencia de los valores son las condiciones de la iluminación y sombras presentes en el estero, ya que estas pueden proporcionar puntos de referencia distintos en las grabaciones e interferir en la identificación de patrones del flujo y en consecuencia, estimaciones erróneas del caudal. Adicionalmente a estos factores, el bajo caudal del estero Marga Marga puede dificultar la detección y seguimiento del movimiento del agua, lo que puede afectar la precisión de las mediciones realizadas. Dado que las condiciones hidráulicas en un cauce pueden variar significativamente con pequeños cambios en ciertos parámetros como la pendiente, el coeficiente de

rugosidad, el nivel de aguas, etc., tal como se presenta en el punto 4.1.2 de este documento, el bajo caudal del estero afectaría la velocidad y el caudal estimado.

En relación a esto último, para una mejor comparación en futuras investigación y obtener mejores resultados a través de Manning, una buena opción es levantar una topografía del sector para así determinar la pendiente exacta, dado que la utilizada en este documento es obtenida de Google Earth y en consecuencia, tiene una baja precisión al usar datos y medidas satelitales. Lo mismo con el coeficiente de rugosidad, ya que, si se disponen de las herramientas y se quiere utilizar valores más específicos, se puede realizar un análisis de la base del canal del estero y de esta manera determinar este coeficiente directamente y no a través de recomendaciones provenientes de tablas.

Con respecto al procesamiento de videos y la obtención del caudal en esteros con bajo flujo, se recomienda utilizar trazadores para que así el programa pueda realizar el seguimiento exacto de estas partículas y así identificar de manera más precisa las trayectorias de movimiento entre frames consecutivos. En la misma línea de obtener mejores resultados, se plantea la posibilidad de realizar las grabaciones con dron de manera perpendicular al estero para así evitar o tener la menor cantidad de errores posibles provenientes de la rectificación de los resultados, ya que, si bien estos se llevan al plano del flujo mediante los puntos de control, estos no tendrán la precisión deseada. O bien, capturar varios videos desde diferentes ángulos hasta encontrar el que obtenga mejores resultados.

En adición a esto, además de validar los resultados con la ecuación de Manning, se recomienda utilizar otro método de validación, como lo puede ser la obtención de la velocidad del flujo con dispositivos ADV, herramientas muy utilizadas en este tipo de investigaciones.

Finalmente, la idea de esta investigación es aportar información e implementar una metodología para calibrar una curva de descarga en el estero Marga Marga. Dado que la instalación de una estación de aforo es costosa y poco rentable para el caudal que aporta el estero durante el año, se propone una idea de proyecto futuro con participación ciudadana, la cual consiste en primera instancia instalar un sensor de nivel de agua en la base del estero que entregue información sobre la altura de escurrimiento de manera más directa y en adición a esto instalar algún trípode con angulación y posición fija en donde cualquier persona que transite por el sector pueda grabar un video de baja duración, emigre a alguna plataforma y este sea procesado con una configuración previamente definida con las recomendaciones de esta investigación.

7 Referencias

- Aumassanne, C. M., & Gaspari, F. J. (2023). Conceptos para manejo integrado de cuencas. Caso de estudio: río Colorado, Argetina. *Boletín geográfico departamento de geografía*. N°45, 1–21. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s2313903x/vvwiptg6ehttps://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/4489>
- Bello, A., Pino, M. (2000). *Medición de presión y caudal*. Boletín INIA (n°28). Centro Regional de Investigación Kampenaike.
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Flores, R., Tejeda, S., Canaza, F., (2020). Estimación del caudal a partir de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala aplicado en flujo a superficie libre. *Revista Gaceta Técnica* 22(1), 53-65. doi:10.13140/RG.2.2.28763.08480
- Genç, O., Ardiçlioğlu, M., & Ağiralioğlu, N. (2015). Calculation of mean velocity and discharge using water surface velocity in small streams. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.013>
- González, R. (2022). *Diseño de humedales construidos para el control de crecidas en la cuenca del estero Marga-Marga, región de Valparaíso, Chile*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188008>
- Hauet, A., Morlot, T., & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over alarge sample of rivers. *E3S Web of Conferences*, 40. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006015>
- Ministerio de Obras Públicas. (2016). Guía de Presentación y Aprobación de Proyectos de Modificación de Cauces.
- Patalano, A. (2017). Desarrollo e implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre. [Tesis doctoral]. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba.
- Patalano, A., García, C. M., & Rodríguez, A. (2017). Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Computers and Geosciences*, 109, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>
- Rantz, S. E. (1982). Measurement and Computation of Streamflow: *Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*.
- Schoninger, R. N., Wber, J. F., Tarrab, L., Massó, L., Patalano, A., Rodriguez, A. (2023). Modelación numérica de la distribución bidimensional de la velocidad media longitudinal en canales a superficie libre utilizando datos de LSPIV. *Mecánica Computacional (vol XL)*, 1671-1680.
- Tauro, F., Petroselli, A., & Arcangeletti, E. (2016). Assessment of drone-based surface flow observations. *Hydrological Processes*, 30(7), 1114–1130. <https://doi.org/10.1002/hyp.10698>
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2. <https://doi.org/10.5334/jors.bl>