



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

CUANTIFICACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES SUPERFICIALES MEDIANTE IMÁGENES TOMADAS CON DRONES EN EL ESTUARIO DEL RÍO MAIPO

Memoria de Título presentada por

BRUNO ANTONIO ARAVENA PÉREZ

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Megan Elizabeth Williams

Noviembre de 2022



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**CUANTIFICACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES
SUPERFICIALES MEDIANTE IMÁGENES TOMADAS CON DRONES
EN EL ESTUARIO DEL RIO MAIPO**

AUTOR:

BRUNO ANTONIO ARAVENA PÉREZ

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 Prof. Guía

Megan Williams

.....

Nombre Miembro 1 Comisión

Raúl Flores

.....

Santiago, Chile, Noviembre de 2022

Cuantificación Del Campo De Velocidades Superficiales Mediante Imágenes Tomadas Con Drones En El Estuario Del Río Maipo

Bruno Aravena¹

1 Universidad Técnica Federico Santa María

Abstract

The use of drones as an instrument for measuring quantitative and qualitative variables has become, with the advancement of technology, a versatile tool to generate information easily and quickly, this equipment can reach places that are difficult for man to access and totally safe. Compared to other technologies, a simple way of making measurements is established with the use of sensors located on the same equipment, such as, for example, a camera. This tool is used in the present study to measure the speed of surface flow in the estuary located at the mouth of the Maipo River (Valparaíso region, Chile), by capturing high-definition images it is possible to establish the surface movement over time of the current and determine the velocity field at the surface. For this purpose, a program developed in Matlab that uses the PIV (particle image velocimetry) methodology is used. In this sense, the velocities obtained by taking images with aerial equipment are compared with those measured on the ground, with the intention of establishing the feasibility of using this type of tool in capturing velocities in the flow of the study area and in general in the estuarine zones of the coast of Chile. In this work, the procedure for obtaining speeds and the processing of the captured images is described, the computational cost and criteria to save processing time are also analyzed. Additionally, different bands and spectral indices are studied in order to analyze their feasibility in increasing the count of vectors, comparing the results of the red, green, blue bands and the NDTI normalized turbidity index.

In this study, it is possible to validate the methodology to obtain the velocity fields in the Maipo River Estuary with indicators over 80%, the main scope being its feasibility for subsequent studies in different estuarine environments. Finally, it concludes with recommendations for the correct application of the method.

Keywords: drones, estuary, Maipo River, velocity field, procedure, processing, PIV, computational cost, bands, spectral indices, NDTI.

Resumen

El uso de drones como instrumento de medición de variables cuantitativas y cualitativas se ha vuelto con el avance de la tecnología una herramienta versátil para generar información fácil y rápida, estos equipos pueden llegar a lugares de difícil acceso para el hombre y ser operados de forma totalmente segura. En comparación con otras tecnologías, se establece una forma sencilla de realizar mediciones con el uso de sensores ubicados sobre el mismo equipo, como lo puede ser, por ejemplo, una cámara. Esta herramienta es utilizada en el presente estudio para medir la velocidad del flujo superficial en el estuario localizado en la desembocadura del Río Maipo (región de Valparaíso, Chile), mediante la captura de imágenes de alta definición es posible establecer en el tiempo el movimiento superficial de la corriente y determinar el campo de velocidades en la superficie. En particular, para este propósito se emplea un programa desarrollado en Matlab que emplea la metodología PIV (particle image velocimetry). En este sentido, se comparan las velocidades obtenidas mediante toma de imágenes con equipo aéreo con las medidas en terreno, con la intención de establecer la factibilidad de usar este tipo de herramientas en la captura de velocidades en el flujo de la zona de estudio y en general en las zonas estuarinas de la costa de Chile. En este trabajo es descrito el procedimiento para la obtención de velocidades y el procesamiento de las imágenes capturadas, también se analiza el coste computacional y criterios para ahorrar tiempo de procesamiento. Adicionalmente, se estudian distintas bandas e índices espectrales a modo de analizar su factibilidad en incrementar el conteo de vectores, comparando los resultados de las bandas roja, verde, azul y el índice de turbidez normalizado NDTI.

En este estudio se logra validar la metodología para obtener los campos de velocidades en el Estuario del Río Maipo con indicadores sobre un 80%, siendo el principal alcance su factibilidad para estudios posteriores en diferentes ambientes estuarino. Por último, se concluye con recomendaciones para la correcta aplicación del método.

Palabras claves: drones, estuario, Río Maipo, campo de velocidades, procedimiento, procesamiento, PIV, coste computacional, bandas, índices espectrales, NDTI.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	6
2	OBJETIVOS AJUSTADOS	6
2.1	OBJETIVO GENERAL	6
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3	MARCO TEÓRICO	7
3.1	VELOCIMETRÍA DE PARTÍCULAS EN IMÁGENES	7
3.2	GEO RECTIFICACIÓN DE IMÁGENES	8
3.3	CONDICIONES ESTUARINAS	9
3.4	BANDAS ESPECTRALES.....	10
4	ZONA DE ESTUDIO	10
5	DATOS	14
6	METODOLOGÍA.....	15
6.1	CALIBRACIÓN IMÁGENES	16
6.1.1	<i>Imágenes a partir de videos</i>	<i>16</i>
6.1.2	<i>Establecer parámetros intrínsecos de cámara</i>	<i>16</i>
6.1.3	<i>Establecer puntos geográficos precisos.....</i>	<i>19</i>
6.1.4	<i>Establecer parámetros extrínsecos de la cámara.....</i>	<i>19</i>
6.1.5	<i>Establecer grilla de rectificación.....</i>	<i>20</i>
6.1.6	<i>Establecer puntos de estabilización</i>	<i>21</i>
6.1.7	<i>Corregir movimiento de la cámara.....</i>	<i>22</i>
6.1.8	<i>Realizar para cada fotograma.....</i>	<i>25</i>
6.2	OBTENCIÓN DE VELOCIDADES.....	26
7	RESULTADOS.....	27
7.1	VELOCIDADES DE VERIFICACIÓN	27
7.2	VELOCIDADES CON ANÁLISIS POR BANDAS.....	31
8	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	33
8.1	COSTE COMPUTACIONAL	33
8.2	VALIDACIÓN DE VELOCIDADES OBTENIDAS.....	34
8.3	ANÁLISIS DE BANDAS	38
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
10	REFERENCIAS	40

1 Introducción

Es frecuente que se requiera medir la velocidad del flujo cuando se estudian cuerpos de agua, este parámetro es un indicador importante en diferentes aspectos, sirve para establecer el régimen y el estado de un flujo participando en el cálculo del número de Froude y el número de Reynolds respectivamente, es importante al estudiar el arrastre de sedimentos y el nivel de erosión sobre los lechos y costas de los ríos y entre otras aplicaciones se debe conocer para estimar la socavación en pilas de puentes. En general para medir esta velocidad se hace uso de instrumentos especializados para dicha tarea, a modo de medir directamente la variable analizada. Los instrumentos de medición deben ser ubicados físicamente sobre el lugar que se quiere estudiar y brindan información sobre regiones limitadas por su radio de muestreo (Tazioli, 2011). Desde este punto de vista un dron como instrumento de medición ofrece mayor versatilidad, de tal forma, que se establece un medio prometedor para el análisis de zonas extensas o de difícil acceso. Sin embargo, si se quiere estudiar la velocidad de un fluido con este método se deben tener en cuenta distintos factores para realizar una correcta medición. Por la naturaleza del instrumento de medición, es importante el factor de la perspectiva en las imágenes ya que esta, de manera intrínseca, captura el espacio tridimensional en un plano bidimensional, perdiendo en ese paso las proporciones reales del mundo capturado. Adicionalmente, las imágenes deben estabilizarse para que el movimiento del dron no interfiera en las velocidades medidas a partir de las imágenes. Por otro lado, se deben tener presentes elementos a los cuales hacer seguimiento, estos deben ser distinguibles de otros movimientos para capturar fielmente las velocidades. Los elementos a los cuales hacer seguimiento pueden ser variados, considerando un ambiente estuarino se está en presencia de diferentes objetos en suspensión, como hojas de árboles, ramas, espuma o partículas en suspensión, la cual se ve reflejada en forma de turbidez en el agua.

Al momento de estudiar el movimiento de algún elemento entre distintas capturas, existen varios métodos basados en imágenes para llevar a cabo esta tarea. Dentro de estos métodos, la metodología PIV ha sido utilizada anteriormente para medir las velocidades superficiales en el agua (Koutalakis et al., 2019) por lo que en este estudio se espera proporcionar información precisa sobre el desempeño de esta técnica dentro de un ambiente estuarino.

2 Objetivos Ajustados

2.1 Objetivo general

- Determinar factibilidad en la obtención de velocidades superficiales en el Estuario del Río Maipo mediante tomas realizadas con equipo aéreo.

2.2 Objetivos Específicos

- Validar método con datos medidos en el estuario.
- Determinar condiciones para la correcta aplicación del método en la obtención de los vectores de velocidad del flujo estudiado.
- Medir el campo de velocidades en la zona de estudio y establecer una metodología para estudios similares.
- Determinar factibilidad de realizar un análisis de bandas para mejorar las mediciones.

3 Marco Teórico

3.1 Velocimetría de partículas en imágenes

La velocimetría de partículas mediante el uso de imágenes, mejor conocida como “*particle image velocimetry*” (PIV de acuerdo a sus siglas en inglés) lleva en desarrollo bajo ese nombre desde el año 1984 (Adrian, 2005). Las bases de la metodología consisten en hacer seguimiento al movimiento de partículas en el tiempo. Se monitorea el trazado de estas entre un instante y el siguiente, dado un determinado intervalo de tiempo, como puede ser entre fotogramas consecutivos en un video.

El poder de cómputo moderno permite analizar una gran densidad de puntos. La forma estándar en la actualidad de llevar a cabo el seguimiento de partículas es mediante la función de correlación cruzada (1), la cual es una herramienta estadística que intenta encontrar similitud numérica entre un patrón f y un área de interrogación h . La teoría detrás de la utilización de la función de correlación cruzada en el análisis de velocimetría de partículas es detallada por Keane & Adrian, (1992). En términos simples, el coeficiente de correlación cruzada C en el análisis de imágenes suma las coincidencias de píxeles y resta las no coincidencias a modo que a mayor similitud entre una imagen y otra mayor será el coeficiente de correlación, como se ve en la Ilustración 1.

$$C(i,j) = \int \int f(x,y)h(i+x,j+y)dx dy \quad (1)$$

De esta forma, se busca coincidencia estadística entre una determinada disposición de partículas f en un área de interrogación h , en donde f es una disposición de partículas en un determinado instante de tiempo y h es una región de interrogación más grande que f en un siguiente instante de tiempo. Así se puede determinar la posición de partículas en distintos intervalos de tiempo y por lo tanto su velocidad.

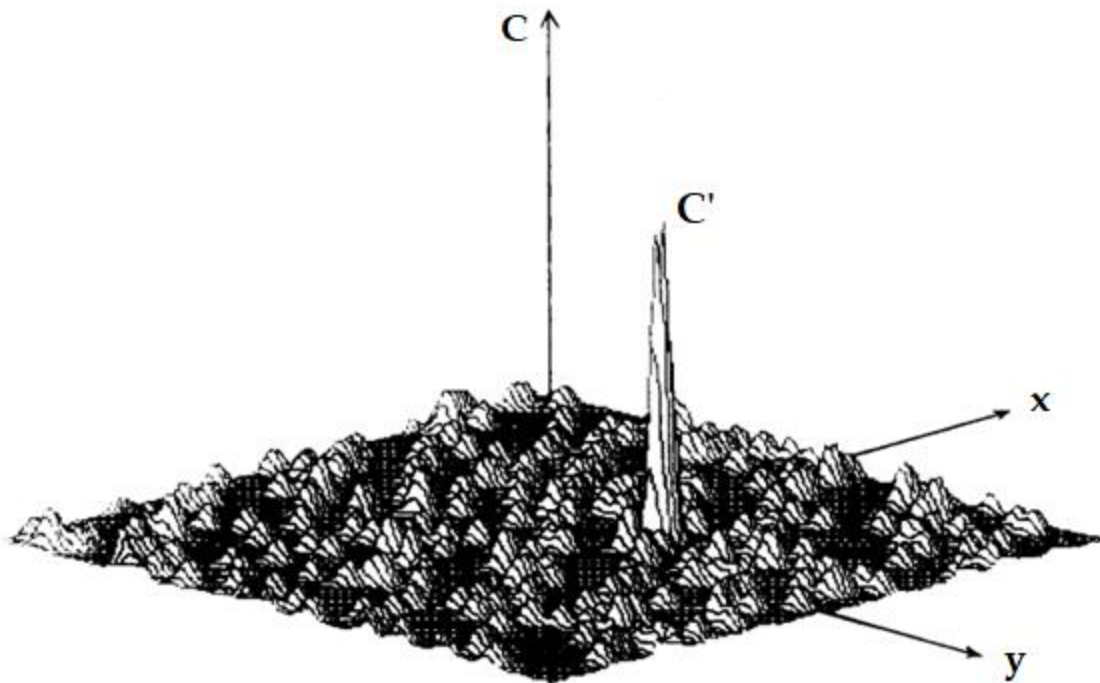


Ilustración 1: Ejemplo grafico del coeficiente de correlación cruzada C , donde se denota la posición con mayor coincidencia estadística C' de una imagen respecto de otra (figura editada extraída de Keane & Adrian, 1992).

Hacer seguimiento de las partículas empleando el coeficiente de correlación cruzada directamente puede requerir gran potencia de cálculo, dado que una determinada disposición de partículas debe ser buscada en un área de interrogación mayor. Esto a su vez debe hacerse para todas las regiones de una muestra de partículas en cada fotograma evaluado, requiriendo por lo tanto tiempos de procesamiento no menores. Por esta razón en vez trabajar directamente con las imágenes se suele utilizar el coeficiente de correlación cruzada en el dominio de la frecuencia, empleando la transformada de Fourier de las imágenes. Esto reduce la cantidad de operaciones necesarias, Al mismo tiempo se suelen utilizar algoritmos FFT (Fast Fourier Transformation) para optimizar aún más los cálculos (Raffel et al., 1998). Mediante el teorema de la convolución es posible expresar la función de correlación cruzada en el dominio espacial (1) al dominio de la frecuencia (2).

$$C = F^{-1}[F\{f\} \cdot F\{h\}] \quad (2)$$

Si bien en un comienzo la metodología PIV se desarrolló en ambientes de laboratorio bajo condiciones controladas, las propiedades del método permiten analizar sistemas fuera del laboratorio. Permitiendo hacer seguimiento al movimiento sobre distintos medios (p. ej., ríos, océano, etc.). Existen antecedentes que evidencian la eficacia de la metodología para obtener las velocidades superficiales en cursos fluviales. En un estudio realizado por Koutalakis et al. (2019) se logran obtener las velocidades superficiales del Rio Aggitis (Grecia) comparando distintos programas disponibles. Adicionalmente, Tauro et al. (2016) estudian el uso de drones en la obtención de velocidades superficiales en el Rio Cordon (Italia) concluyendo con la factibilidad de utilizar dichos medios, obteniendo resultados coincidentes con los de equipos de medición en terreno. En el presente estudio se hace uso del programa PIVlab, esta es una herramienta gratuita desarrollada por Thielicke y Stamhuis en el año 2014, ofrece una interfaz amigable con el usuario y tutoriales para su uso. Emplea la metodología PIV con las consideraciones anteriormente descritas en cuanto a que calcula los desplazamientos de las partículas empleando el coeficiente de correlación cruzada en el dominio de la frecuencia utilizando algoritmos FFT. A conveniencia del investigador PIVlab es adaptado como aplicación de MATLAB en el año 2021 por lo que se trabaja en esta plataforma. Mayor información puede ser encontrada en el documento publicado por los autores del programa (Thielicke, W. & Sonntag, 2021).

3.2 Geo rectificación de imágenes

Al operar con equipo aéreo basado en la toma de imágenes se debe tener en cuenta la distorsión de estas debido a la alteración que se produce entre el mundo real y la propia perspectiva del observador. Una cámara captura imágenes bidimensionales del mundo tridimensional, en este proceso las distancias capturadas cambian su proporción respecto al mundo real. Para la escala a la cual se lleva a cabo el presente estudio, la distorsión provendrá por una parte de las propiedades intrínsecas de la cámara, es decir, las propiedades propias referentes a las características de fabricación (p. ej., distancia focal lente, distorsión radial, etc.) y por otra parte debido a la perspectiva del observador O , en este caso el dron (Ilustración 2), la cual estará definida por los parámetros extrínsecos de este, es decir, los parámetros que definen su posición global en el espacio. Para realizar la corrección de las imágenes y obtener distancias de acuerdo con las proporciones reales de la zona de estudio se requiere georreferenciar las imágenes. Por esta razón se requiere establecer coordenadas geográficas precisas o puntos de referencia geográficos. Esto se hace para corregir la distorsión oblicua en la captura de imágenes, es decir, corregir el hecho de que las distancias capturadas en las imágenes son mayores o menores a las captadas por el lente a medida que se aleja del centro de la captura. La completa rectificación de las imágenes es realizada con el repositorio de código en MATLAB “CIRN Quantitative Coastal Imaging Toolbox” (Bruder & Brodie, 2020) considerando ambas fuentes de distorsión. Esta herramienta corrige la grilla de las imágenes según las coordenadas de georreferencia y corrige parámetros como la estabilidad de las imágenes y el encuadre. Además, ofrece una interfaz amigable con el usuario. De esta forma las imágenes quedan listas para su posterior procesamiento. Para determinar los parámetros intrínsecos de la cámara se utiliza el modelo descrito por Heikkila & Silvén (1997) empleando un set de scripts desarrollados en MATLAB por Bouguet, (2022).

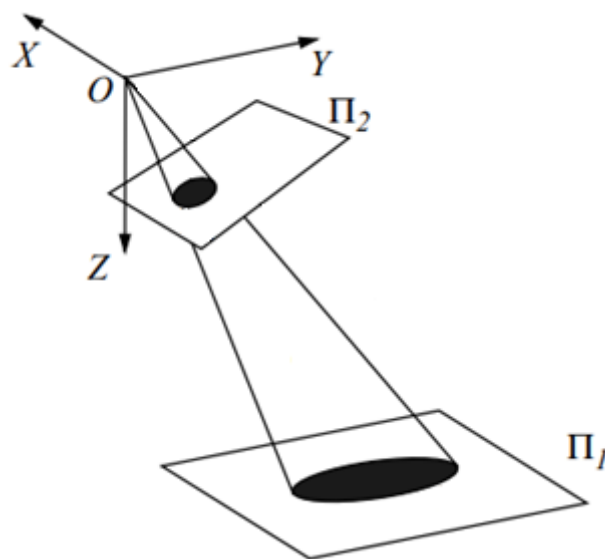


Ilustración 2: Distorsión de proporciones de acuerdo con la perspectiva al cambiar de un plano Π_1 a un plano Π_2 según observador O . Figura editada extraída de Heikkila & Silvén, (1997).

3.3 Condiciones estuarinas

Un estuario es donde se produce la unión entre el cauce de agua proveniente de un río con el agua del océano. Por la propia naturaleza de un estuario, en él se produce un intercambio entre agua dulce fluvial con agua salada marina, lo que genera un importante traspaso de nutrientes. Es un sistema complejo de modelar debido a que la circulación del agua depende de varios factores (MacCready & Geyer, 2010). Para efectos de este estudio, dentro de la física que describe el comportamiento del flujo en un estuario se remarcan tres fenómenos importantes. Si bien los procesos de mezcla son constantes debido a la recirculación del flujo, por acción de las mareas se generan periodos de entrada y salida de agua marina al estuario en un régimen oscilatorio, lo cual produce cambios en la dirección del flujo y en su densidad. Por otro lado, debido a la diferencia entre las concentraciones de salinidad de los volúmenes de agua se produce un gradiente de densidad a lo largo del estuario, con mayor concentración a medida que se está más cerca del océano. Por último, en las zonas de mezcla de los flujos, típicamente la parte superior del cauce está compuesta por el agua del río y la parte inferior por agua marina (Ilustración 3). Esto produce un gradiente de salinidad vertical con mayor concentración en el fondo (Simpson et al., 1990). Estos fenómenos son presentados con mayor detalle por MacCready & Geyer, (2010). Si bien existen otros factores (p. ej. viento, gradientes térmicos, etc.), los anteriormente mencionados producen estratificación de los perfiles de velocidad vertical (Ilustración 3). Esto debido a la propia inercia de las corrientes de agua oceánicas y fluviales, y corrientes producidas por los gradientes de densidad tanto verticales como horizontales. De esta forma en los ambientes estuarinos, dependiendo de la zona, es posible encontrar perfiles de velocidad estratificados inducidos por diversos factores. Por lo tanto, las velocidades medidas en el fondo del cauce pueden variar de manera importante tanto en sentido como en magnitud respecto a las medidas en su superficie. Particularmente en el estuario del Río Maipo, según las observaciones y mediciones en terreno se constata un estuario de tipo “salt wedge” o de “cuña de sal”, en donde por diferencias de densidad el agua marina predomina en el fondo del flujo mientras que el agua de río en la superficie.

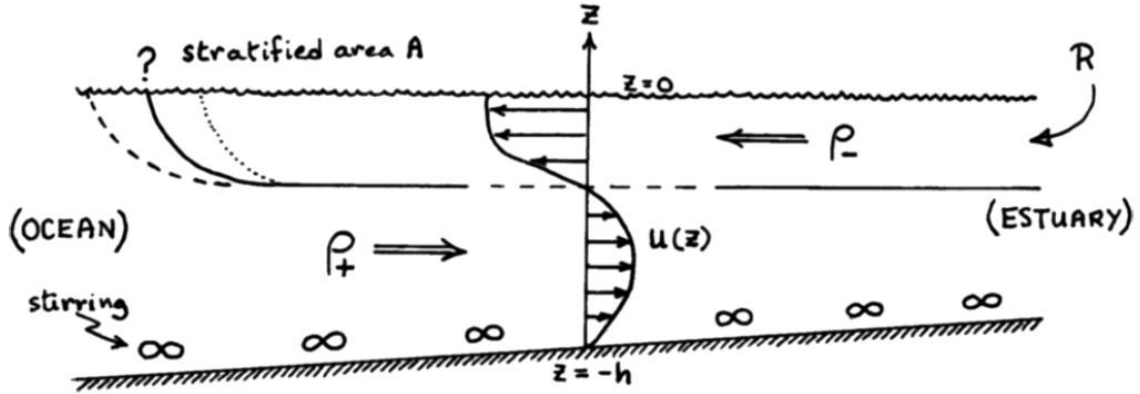


Ilustración 3: Diagrama que muestra la forma en que interactúan las corrientes fluviales y oceánicas generando estratificación del perfil de velocidades vertical $u(z)$ (Simpson et al., 1990).

3.4 Bandas espectrales

Como herramienta para destacar el movimiento de la superficie del flujo analizado, se prueba la factibilidad de emplear un análisis de bandas espectrales a las imágenes capturadas. Por las cualidades propias del equipo de medición, se cuenta con las bandas roja, verde y azul. Se usan estas para mejorar el seguimiento del movimiento intentando resaltar el sedimento y partículas en suspensión. Se prueba el índice espectral NDIT (Lacaux et al., 2007), correspondiente al índice de diferencia en turbiedad normalizado, analizando su factibilidad en el presente estudio. Este índice emplea las bandas roja y verde captadas por la cámara en el dron (3). Debido a los constantes procesos de mezcla en el estuario el flujo hacia el mar presenta una distinguible cantidad de materia en suspensión reflejada en forma de turbidez en el agua. Comprobar la utilidad de un índice de turbidez resulta prometedor para estudios posteriores.

$$NDIT = \frac{Red - Green}{Red + Green} \quad (3)$$

4 Zona de estudio

El presente estudio se realiza sobre el estuario del Río Maipo, este se ubica en la región de Valparaíso (Chile). Se encuentra situado entre la comuna de San Antonio al norte y Santo Domingo al sur. El Río Maipo traza un curso desde su origen en la Cordillera de los Andes hacia el oeste, de tal forma que el estuario se genera en su desembocadura al Océano Pacífico. En el lugar se establece un ecosistema de tipo humedal donde conviven diversas especies y confluyen una multitud de tipos de aves importantes para la región. En la zona se contabilizan 181 especies de aves y está declarada como un santuario natural (Ministerio del Medio Ambiente, 2020). Las mediciones se realizan en la costa sur del humedal (Ilustración 4a), de tal forma que en esta zona se posicionan los instrumentos que miden las variables en terreno y desde este lugar se opera el dron.

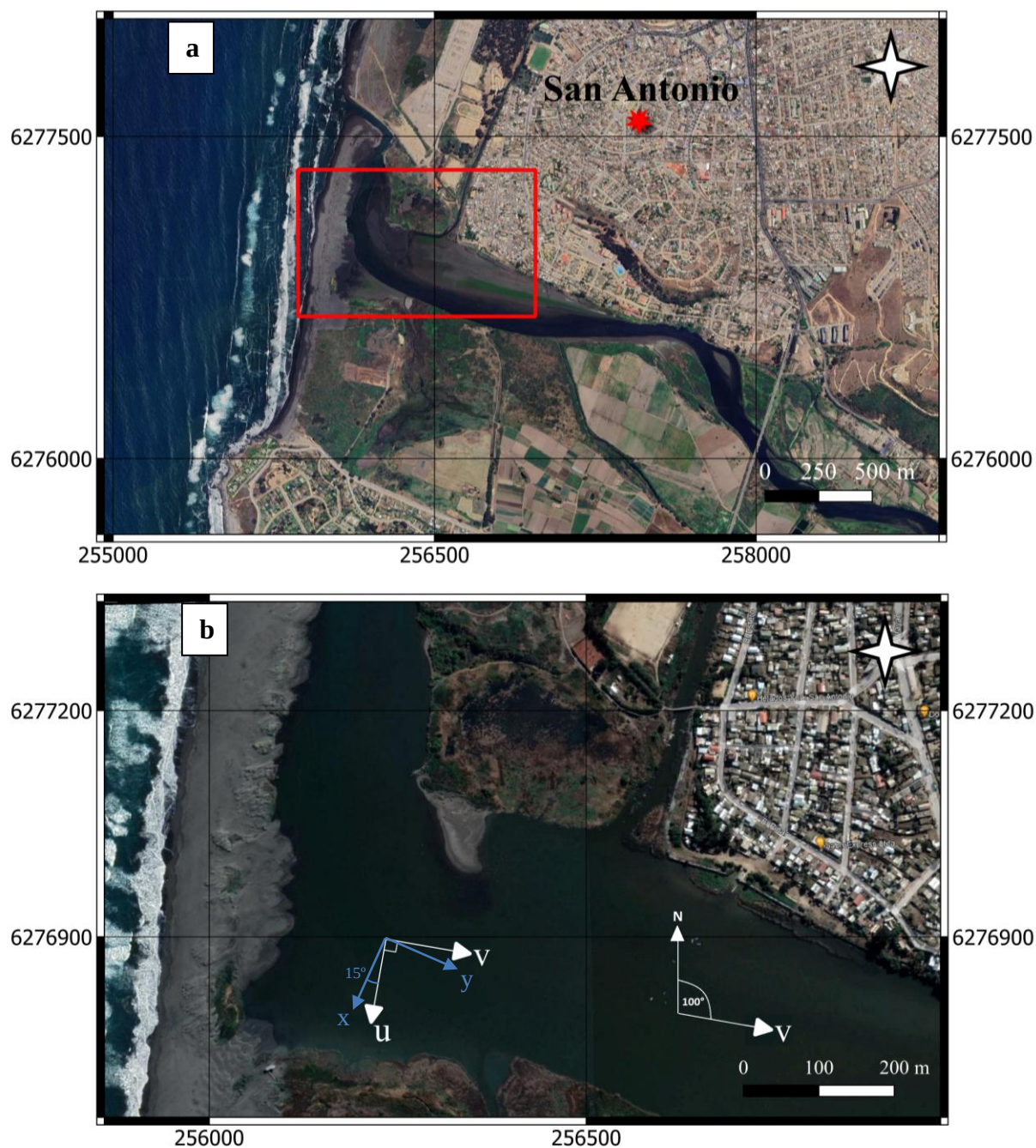


Ilustración 4: Vista georreferenciada a escala de la zona de estudio, en (a) se muestra el estuario y se remarca con un cuadrado rojo la posición sobre la cual se realizan las mediciones con el dron y por los instrumentos en terreno sobre datos de velocidad y presión in situ. Dentro de la zona remarcada, la zona de medición en concreto corresponde a la costa sur del humedal. (b) muestra el sistema de coordenadas utilizado uv y el sistema de referencia de los datos medidos en terreno xy . (a) y (b) tienen fechas de captura diferente (4/2022 y 5/2022 respectivamente) y son extraídas de Google Earth Pro.

Específicamente los instrumentos de medición físicos sobre el cauce del río se ubican en la coordenada UTM 19S 256219 6276813 y el punto sobre el cual se vuela el equipo aéreo tiene coordenadas UTM 19S 256174 6276725. Los instrumentos se encuentran fijos a 21 [cm] sobre el fondo del estuario y adheridos a una boya flotante para resaltar su posición (punto de control en tierra 3). Las tomas aéreas son realizadas en dos planos distintos, el primero (“plano 1”) enfoca una región cercana a la costa sobre la cual se toman las mediciones (Ilustración 5a) y el segundo (“plano 2”)

enfoca una vista alejada de la costa con una panorámica mirando al norte desde el punto de vuelo del dron (Ilustración 5b). En ambos planos se tiene a la vista el punto donde están los equipos de medición anclados a la boya (a) y (b) (Ilustración 5). También, en ambas vistas se establecen puntos de georreferencia o puntos de control en tierra. En referencia a lo mencionado anteriormente, se tienen 5 puntos en el primer plano (Ilustración 5a) y 3 puntos en el segundo plano (Ilustración 5b). La posición desde la cual el operador vuela el dron corresponde al punto de control 1, el punto 2 corresponde a un elemento de plástico negro sobre la arena, el punto 3 corresponde a la posición de los equipos en el agua, el punto 4 corresponde a un tronco semisumergido en el estuario, el punto 5 se ubica sobre un plástico rosa sobre la arena, el punto 6 se establece de manera aproximada sobre una región concentrada de vegetación y el punto 7 se establece de manera aproximada sobre una formación rocosa distinguible por su opacidad. Estos puntos son seleccionados de forma que pueden ser claramente visibles desde el aire, de modo que en las tomas hechas por el dron se logran apreciar. Los puntos de georreferencia mostrados en la Ilustración 5a son establecidos considerando elementos claramente definidos en terreno con coordenadas geográficas medidas en el lugar con un equipo GPS. Por contraparte, los puntos de control 6 y 7 mostrados en la Ilustración 5b se establecen de manera aproximada a partir de las referencias geográficas visibles en las imágenes con el programa Google Earth Pro. Esto se debe a que los registros del primer plano son utilizados para la validación de los datos, en cuanto a realizar una comparación de las velocidades medidas por los instrumentos en terreno con las obtenidas de los registros aéreos, requiriéndose por lo tanto precisión al establecer las coordenadas. Por otro lado, los registros del segundo plano son utilizados para poner a prueba la metodología planteada en la obtención de los campos de velocidades y la factibilidad de ocupar análisis de bandas espectrales para resaltar partículas en suspensión. En la Tabla 1 se muestran las coordenadas UTM de los puntos de georreferencia establecidos.

Para determinar claramente cuáles son las direcciones del flujo superficial en el agua, se establece un sistema de referencia alineado con la costa sur del estuario. De tal forma que el eje u denotara el movimiento en un sentido perpendicular a la costa y el eje v denotara el movimiento en un sentido horizontal respecto a la misma (Ilustración 4b). Esto se realiza con el propósito de poder identificar una corriente saliente o entrante en el estuario. El sistema de coordenadas establecido se traza de tal forma que v traza un ángulo en sentido horario de 100 grados respecto al norte (los ejes u y v son ortogonales). En este sentido, entre el sistema de referencia xy de los datos registrados y el sistema uv existe una diferencia de 15° (Ilustración 4b)

Tabla 1: Puntos de georreferencia establecidos, se muestran en unidades UTM. Se trabaja sobre la zona UTM 19 del hemisferio sur.

Punto	Este	Norte
1	256174.25	6276725.13
2	256211.04	6276738.94
3	256219.92	6276813.20
4	256130.85	6276788.74
5	256161.20	6276748.78
6	256367.00	6277091.00
7	256013.93	6277028.00

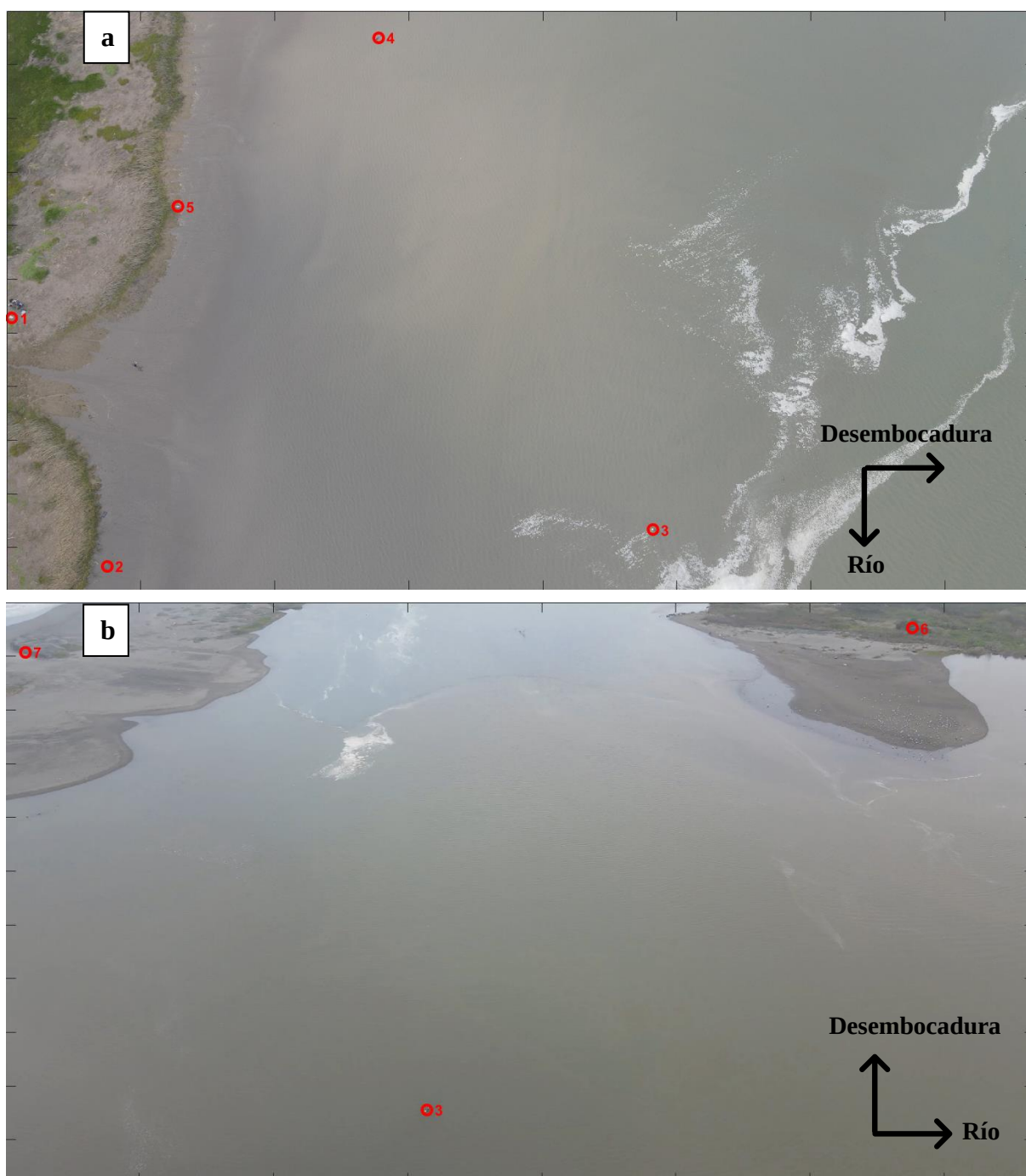


Ilustración 5: Puntos de control en tierra georreferenciados, en (a) se muestran los 5 puntos establecidos en terreno de acuerdo a elementos físicos claramente distinguibles, en (b) se muestran 3 puntos establecidos en donde el punto 3 es compartido por ambos planos y corresponde a la ubicación de los instrumentos de medición en el agua, siendo los puntos 6 y 7 establecidos a posterior con la herramienta Google Earth identificando elementos geográficos distinguibles. Adicionalmente, se indica la orientación de captura según la dirección de la desembocadura y el río.

5 Datos

En septiembre del año 2021 se realizó una campaña de recolección de datos con el objetivo de estudiar diferentes ámbitos sobre condiciones y comportamientos del estuario del Río Maipo. Específicamente durante la segunda semana de septiembre a lo largo de 5 días se capturan datos con distintos instrumentos de medición ubicados en el agua, estos se ubican en el punto de georreferencia 3 según Ilustración 5. Dentro de los datos tomados en el área se encuentra información sobre presión, turbidez, salinidad y velocidad del cauce del estuario. Por otro lado, utilizando drones, fueron capturados distintos registros visuales de la zona donde se encontraban los equipos de medición. Para aspectos de este estudio se capturan 5 registros útiles para la investigación, grabando 3 secuencias de tiempo distintas, esto debido a que 3 de los registros establecen una única secuencia. La elección de estos registros se debe a la estabilidad de captura en las imágenes y porque se tienen puntos de georreferencia de las zonas grabadas. Los registros capturados son nombrados de acuerdo con el orden interno propio del dron, cuyo modelo corresponde al “Mavic Air 2”. En la Ilustración 6 se muestran los datos de las secuencias y como es su agrupación de acuerdo con lo anteriormente detallado. Adicionalmente, las 3 secuencias capturan distintas perspectivas de la zona estudiada, de tal forma que la secuencia “537-538-539” graba de acuerdo con la orientación mostrada en Ilustración 5b; y las secuencias “550” y “551” graban de acuerdo con la orientación mostrada en Ilustración 5a.

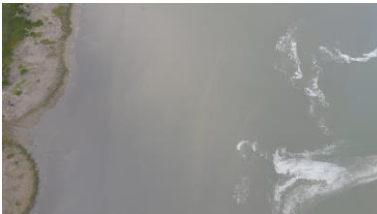
“537-538-539”	“550”	“551”
Hora Inicio: 15:34:51	Hora Inicio: 15:51:34	Hora Inicio: 15:57:36
		
Duración: 10:26 [min]	Duración: 03:41 [min]	Duración: 02:30 [min]

Ilustración 6: Información de secuencias de video utilizados, la secuencia “537-538-539” es la unión de 3 registros consecutivos. Los registros son grabados el 10/09/2021 y se muestra la hora de inicio respecto a la hora local UTC -4.

Los instrumentos adheridos a la boya flotante que proporcionan información relevante para este estudio son dos, el primero es el ADV (acoustic doppler velocimeter) y el segundo corresponde a un instrumento de monitoreo de aguas subterráneas “Solinst”. El equipo ADV mide las velocidades instantáneas en el tiempo en las tres componentes de los ejes espaciales; este está ubicado a 21 [cm] del fondo siendo la profundidad media aproximada de 1.08 [m]. El equipo Solinst registra los datos de presión, temperatura y conductividad. Adicionalmente, para obtener los datos de salinidad se emplea un programa desarrollado en Matlab por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (Oceanographic Commission, 2015). Los datos medidos por el ADV tienen un sistema de referencia xy distinto al utilizado uv , en donde el eje x traza un ángulo de 205 grados en sentido horario respecto al norte (Ilustración 4b). Tanto el equipo ADV como el Solinst, así como su configuración en terreno son mostrados en la Ilustración 7.

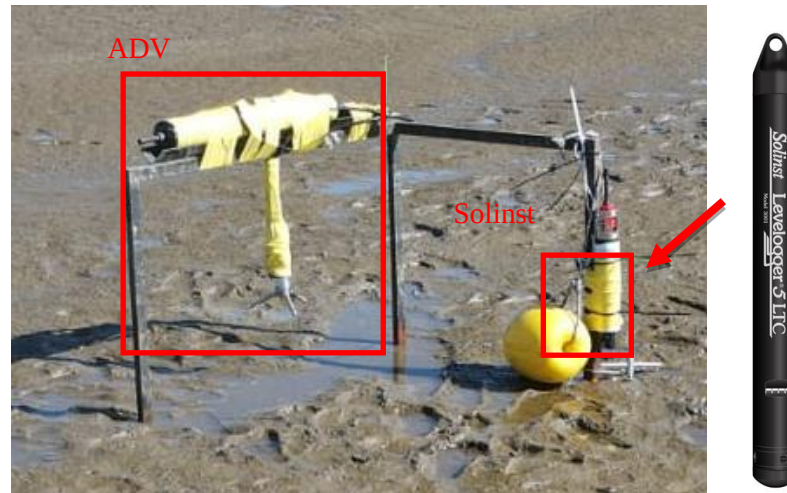


Ilustración 7: Configuración de equipos en terreno, a la izquierda equipo ADV y a la derecha Solinst, este último se encuentra por la parte trasera de la posición indicada según la imagen mostrada.

6 Metodología

En este apartado se detalla el plan de aplicación de herramientas en la obtención del campo de velocidades en la superficie del estuario. A grandes rasgos el proceso consta principalmente de dos etapas: la calibración de las imágenes, lo cual considera la corrección de la distorsión de captura y estabilización; y el análisis de movimiento en si para obtener las velocidades superficiales. A continuación, en la Ilustración 8 se muestra la metodología propuesta a realizar para el procesamiento de las imágenes y la obtención de los resultados de análisis, a la derecha se muestra la herramienta principal utilizada en cada etapa respectivamente.

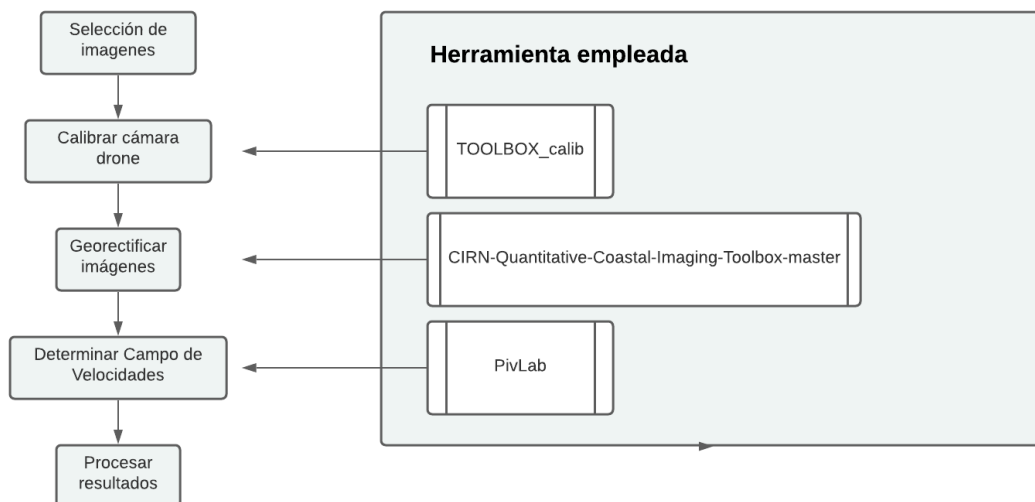


Ilustración 8: Metodología propuesta y aplicación de herramientas (Elaboración propia).

La medición del flujo mediante imágenes capturadas con drones es un método relativamente sencillo de llevar a cabo ya que requiere pocos elementos, en la Ilustración 9 se muestra la configuración modelo del equipo para la captura de imágenes en terreno. Si bien es ideal posicionar el equipo con láser, si el equipo es lo suficientemente estable y si las condiciones del viento son favorables se puede prescindir de esta herramienta, lo cual sucedió en el caso de este estudio. De esta forma la obtención de la información en forma de imágenes se realiza posicionando el dron a una altura fija en el espacio tridimensional enfocando la zona de estudio por un tiempo determinado, con el propósito de capturar el desplazamiento superficial del flujo en el tiempo.

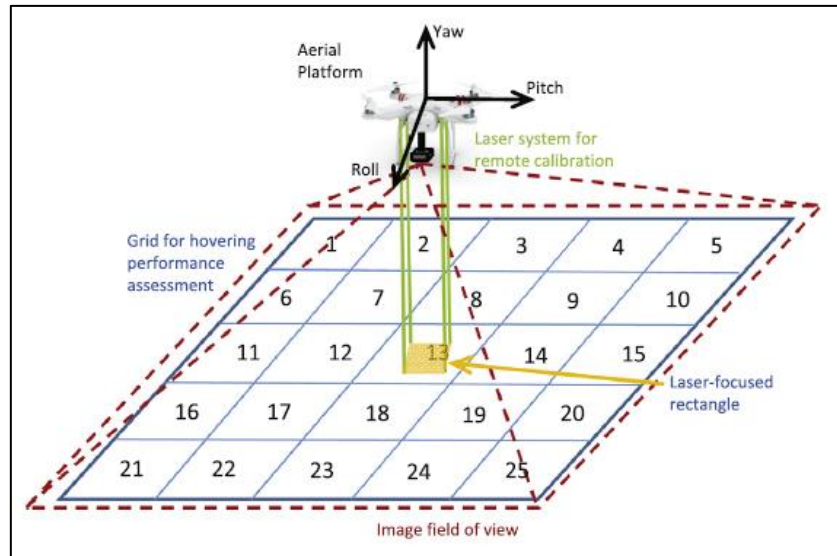


Ilustración 9: Modelo de captura de imágenes (Tauro et al., 2016).

6.1 Calibración imágenes

Este proceso es necesario para realizar una correcta medición del movimiento en los videos capturados por el dron, se corrigen las aberraciones propias del lente de la cámara y el movimiento del dron. De este modo se obtienen imágenes estables y con distancias proporcionales. El proceso de calibración se realiza con un set de programas en Matlab desarrollado para este propósito por Bruder & Brodie, (2020). Para realizar una total calibración se siguen 8 pasos a modo de subrutinas que establecen en su conjunto el algoritmo de rectificación de imágenes.

6.1.1 Imágenes a partir de videos

En primer lugar, se divide el video analizado en fotogramas independientes, se debe dividir en una cantidad de fotogramas por segundo en específico. Los videos están gravados a 30 fps (fotogramas por segundo).

6.1.2 Establecer parámetros intrínsecos de cámara

Para establecer los parámetros intrínsecos se emplea una herramienta previamente desarrollada (Bouguet, 2022) la cual utiliza como insumo imágenes de un tablero de ajedrez o en su defecto de un patrón constante. Las dimensiones del tablero deben estar claramente definidas y con la cámara del dron se realizan capturas del tablero en distintos ángulos y distintas posiciones (Ilustración 10). La herramienta utiliza estas imágenes y genera un modelo tridimensional del tablero en las distintas tomas (Ilustración 11), modelo que utiliza posteriormente para determinar los parámetros intrínsecos haciendo coincidir las esquinas del tablero en las imágenes con las esquinas del tablero reproyectado. Para una correcta obtención de los parámetros intrínsecos de la cámara se toman 37 capturas. En la Ilustración 11 se muestra el modelo tridimensional generado con las distintas vistas del tablero. En la Ilustración 12 se muestra el error obtenido entre las esquinas y sus reproyecciones de acuerdo con los parámetros intrínsecos encontrados. Este error corresponde a la diferencia en píxeles entre la esquina real y su reproyección, el cual está en el orden de los 10 píxeles; se considera aceptable. El resultado de la calibración se establece en forma de un vector, los parámetros intrínsecos de la cámara del dron obtenidos se muestran en la Tabla 2. Mayor información en cuanto a la descripción de los parámetros intrínsecos se puede encontrar en el manual de usuario de CIRC (Bruder & Brodie, 2020).



Ilustración 10: Tablero con patrón de ajedrez utilizado en la calibración de cámara dron Mavic Air 2, lado de cuadrado igual a 5 [cm]. Se muestran dos imágenes como ejemplo, en ellas se refleja la toma en distintas posiciones y orientaciones respecto del lente. Se muestran esquinas establecidas con “cruces” y las esquinas reproyectadas con “círculos”, las flechas denotan de diferencias entre los puntos reales y sus ubicaciones reproyectadas.

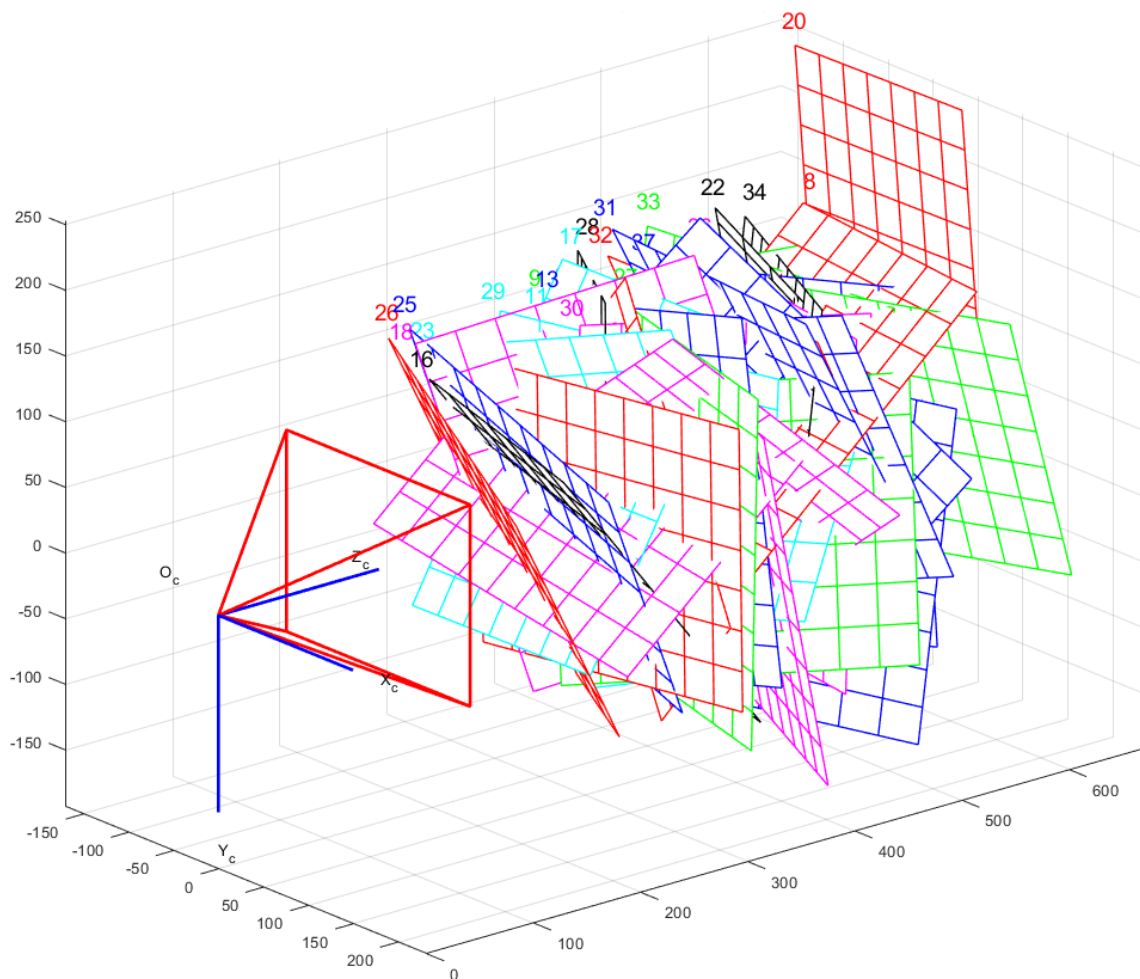


Ilustración 11: Modelo obtenido de la calibración. Se muestran las posiciones relativas de los tableros respecto al observador de manera tridimensional. Unidad de ejes en milímetros.

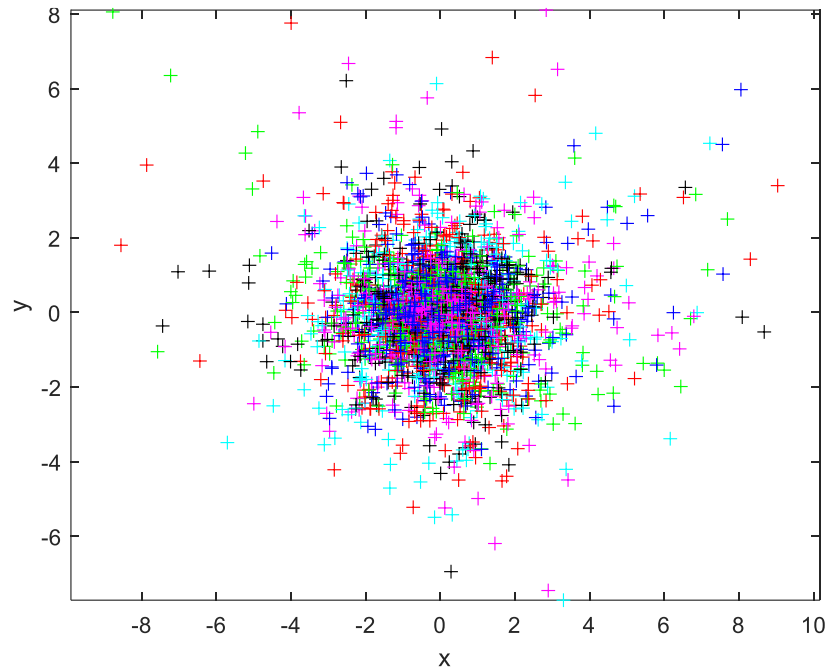


Ilustración 12: Proyección del error en píxeles. Se muestran los desfases de la esquina real respecto a la reprojectada, para todas las esquinas y todas las imágenes.

Tabla 2: Descripción y valores de parámetros intrínsecos obtenidos.

Variable Intrínseca	Símbolo	Descripción	Valor
1	n_x	Numero de columnas de píxeles	4000
2	n_y	Numero de filas de píxeles	3000
3	U_o	Componente U de punto principal, definido desde la esquina superior izquierda de la imagen	2012.75
4	V_o	Componente V de punto principal, definido desde la esquina superior izquierda de la imagen	1512.28
5	f_x	Componente U del lente focal (píxeles)	2932.68
6	f_y	Componente V del lente focal (píxeles)	2930.51
7	d_1	Coeficiente de distorsión radial	-0.017
8	d_2	Coeficiente de distorsión radial	0.082
9	d_3	Coeficiente de distorsión radial	0
10	t_1	Coeficiente de distorsión tangencial	-6.84×10^{-4}
11	t_2	Coeficiente de distorsión tangencial	-2.48×10^{-3}

6.1.3 Establecer puntos geográficos precisos

Se toman en terreno puntos de control claramente definidos a modo de tener referencias geográficas en tierra a la hora de realizar la calibración. En este caso se tendrán 7 puntos de control en total, como ya se explicó anteriormente. Se grabaron dos perspectivas, teniéndose 5 puntos en la primera (Ilustración 5a) y 3 puntos en la segunda (Ilustración 5b).

6.1.4 Establecer parámetros extrínsecos de la cámara

A partir de los puntos de control en tierra se re proyecta una solución objetivo a modo de buscar la superposición entre los puntos reales en tierra y la reproyección, de esta manera el programa encuentra los parámetros extrínsecos resolviendo un sistema de ecuaciones entregando el resultado más cercano. En la Ilustración 13 se muestra la solución encontrada para una muestra en particular y en la Tabla 3 se muestra el vector de parámetros extrínsecos de la cámara para un fotograma. El programa encuentra los parámetros extrínsecos con una determinada incertidumbre asociada, en general la posición de la cámara encontrada tiene un grado de error asociado de 10 metros en el eje horizontal y 20 metros en el eje vertical, lo cual se considera aceptable para la rectificación y la posterior resolución del campo de velocidades.

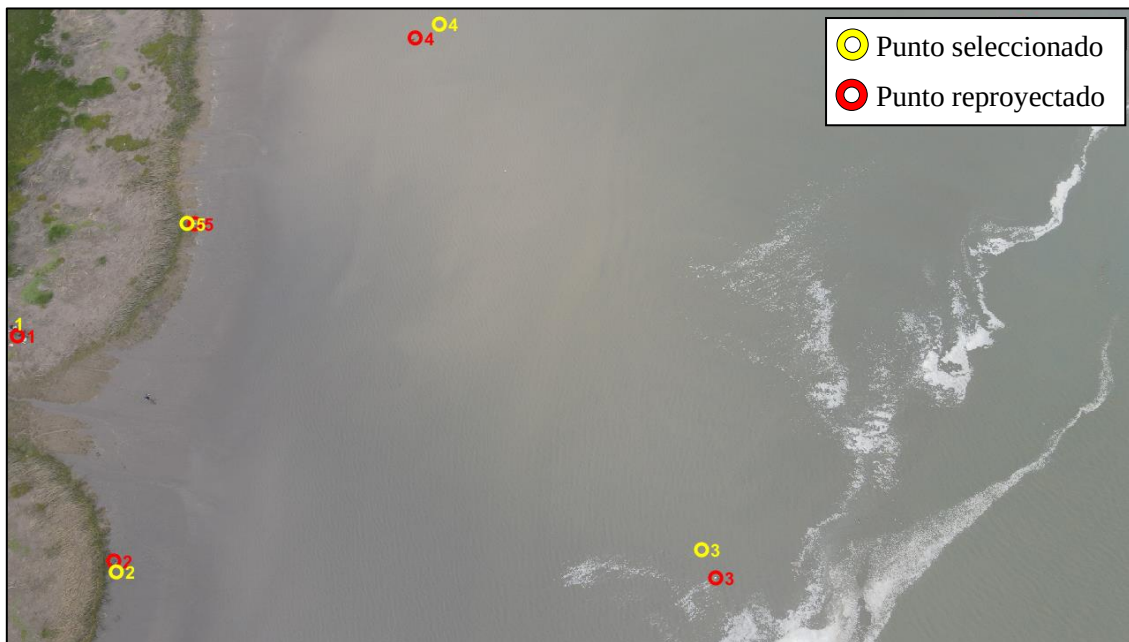


Ilustración 13: Ejemplo de proyección de solución extrínseca. En círculos rojos se muestra el punto de georreferencia y en amarillo su posición reproyectada.

Tabla 3: Descripción y valores de parámetros extrínsecos obtenidos en primer fotograma de registro 551.

Variable Extrínseca	Símbolo	Descripción	Valor
1	C_{xw}	Posición de la cámara, eje X en coordenadas globales del mundo (Coordenada UTM)	256238.015
2	C_{yw}	Posición de la cámara, eje Y en coordenadas globales del mundo (Coordenada UTM)	6276792.98
3	C_{zw}	Posición de la cámara, eje Z en coordenadas globales del mundo (Coordenada UTM)	114.003096
4	a	Azimut, giro en Z (Rad)	-1.30954974
5	t	Tilt, giro en X (Rad)	0.29660534
6	s	Swing, giro en Y (Rad)	0.09142089

6.1.5 Establecer grilla de rectificación

En esta etapa se establece la grilla que define la zona de interés y la rotación que se desea en las imágenes, se debe establecer una determinada discretización de la grilla y un determinado ángulo de rotación. Para el estudio se decide establecer la orilla de costa alineada con el eje vertical v y el cauce del estuario alineado con el eje horizontal u . En este paso se corregirá la distorsión en las imágenes y se corregirá el ángulo de captura de modo de pasar de una imagen oblicua a una completamente perpendicular con distancias correctamente proporcionadas (Ilustración 14). En la Ilustración 15 se muestran las regiones de captura de las distintas vistas según las distancias ya georreferenciadas.

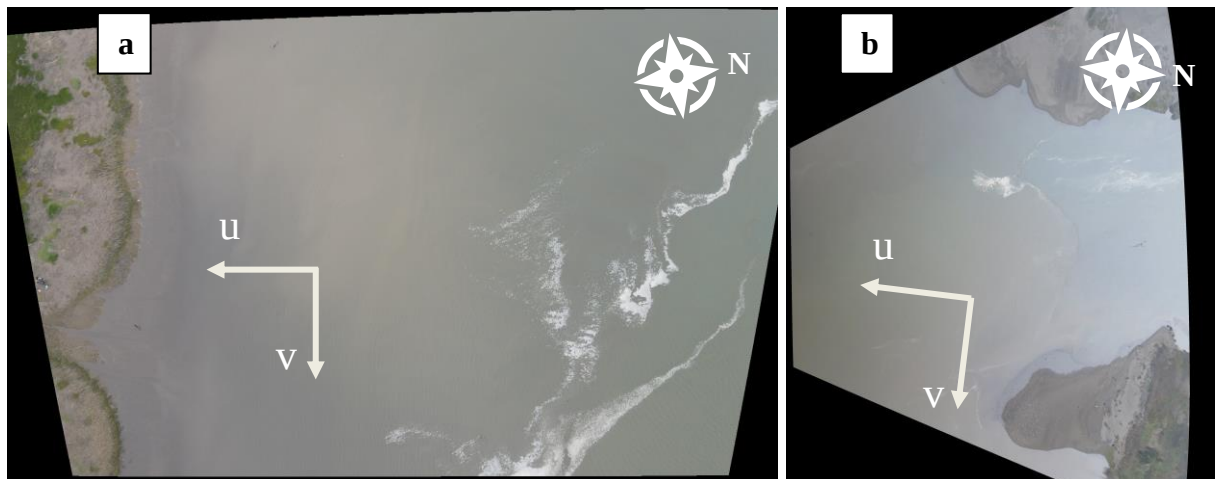


Ilustración 14: Vista corregida y orientada de acuerdo con los ejes establecidos. Las imágenes corresponden un fotograma en particular seleccionado de acuerdo con las dos perspectivas capturadas. (a) establece una corrección de acuerdo con la vista mostrada en Ilustración 5a y (b) con la vista mostrada en Ilustración 5b. Adicionalmente, se muestra la orientación del Norte en cada caso.

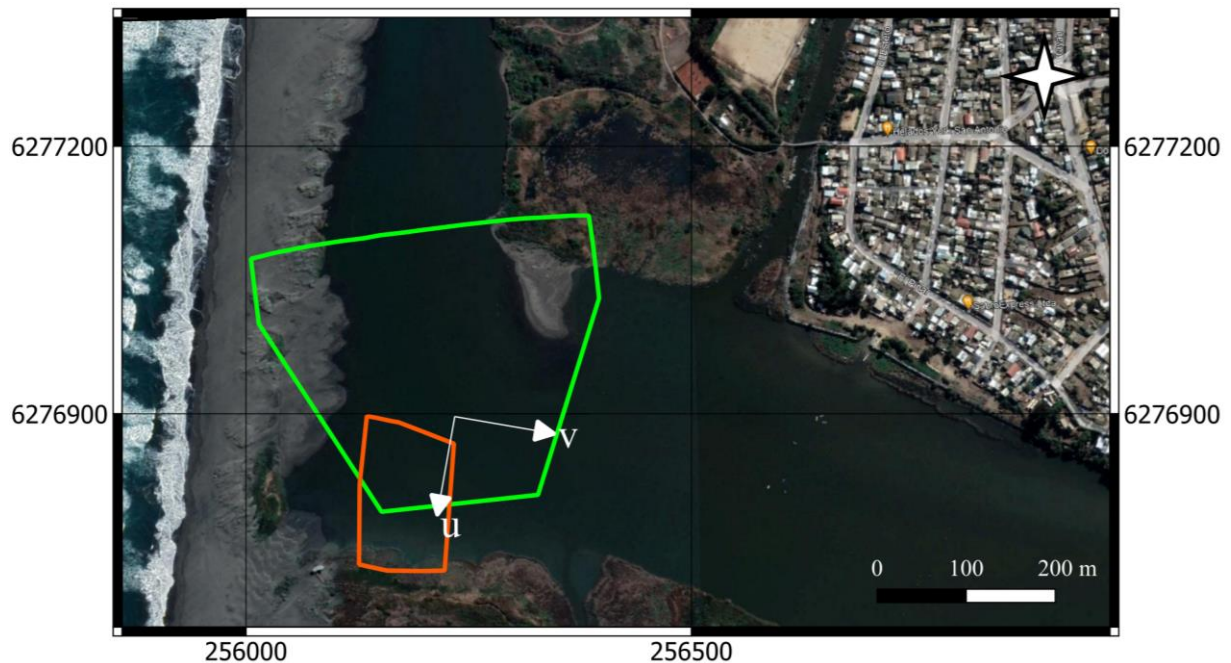


Ilustración 15: Regiones capturadas en cada vista, en naranja se denota la vista mostrada en Ilustración 5a de acuerdo con Ilustración 14a y en verde la vista mostrada en Ilustración 5b de acuerdo con Ilustración 14b.

6.1.6 Establecer puntos de estabilización

Se deben establecer los puntos de referencia y sus coordenadas respectivas en las imágenes a modo de corregir el movimiento del dron, por ejemplo, el producido por el viento o la vibración de las hélices. En este caso se utilizan los mismos puntos de control usados para obtener los parámetros extrínsecos, pero seleccionando aquellos que pueden ser claramente distinguibles de acuerdo con su brillo o su opacidad. El programa buscara estos puntos en el resto de las imágenes generando un umbral que calce con el resto de los fotogramas para corregir y estabilizar las tomas. Se debe establecer un determinado radio de búsqueda por lo que el movimiento del dron debe mantenerse dentro de un margen “razonable”. En la Ilustración 16 se muestra a modo de ejemplo como se establece un umbral de acuerdo con la intensidad de brillo en los puntos de georreferencia 1 y 3.

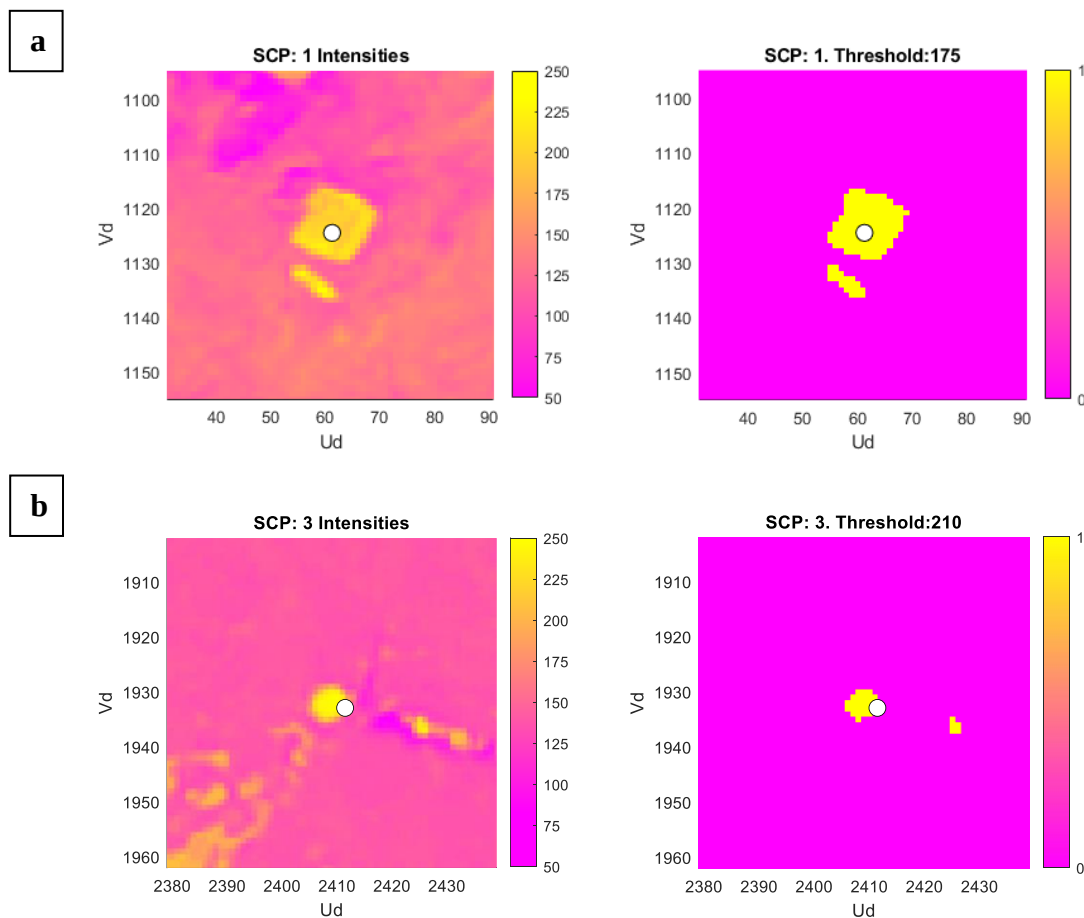


Ilustración 16: Muestra de la selección del umbral para reconocer puntos de estabilización en distintos fotogramas. (a) muestra el umbral para el punto de georreferencia 1 y (b) para el punto 3.

6.1.7 Corregir movimiento de la cámara

Con los puntos de estabilización fijados de acuerdo con un determinado umbral, el programa busca la posición de los puntos de control en tierra en todos los fotogramas de los registros analizados. De esta forma, se encuentran los parámetros extrínsecos en cada fotograma estudiado con el objetivo de mitigar los movimientos del dron. A continuación, se muestra la variación de los parámetros extrínsecos obtenidos en las tres secuencias de video analizadas (Ilustración 17, Ilustración 18 e Ilustración 19). Además, se muestra la desviación estándar de estos parámetros en cada secuencia (Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6). Para los datos mostrados, se tiene en cuenta una discretización de los videos a una tasa de 1 fotograma por segundo, de modo que en las secuencias “550”, “551” y “537-538-539” se analizan 150, 221 y 626 fotogramas respectivamente. De esta forma se conoce en todo instante la posición y orientación de la cámara en las coordenadas globales del mundo.

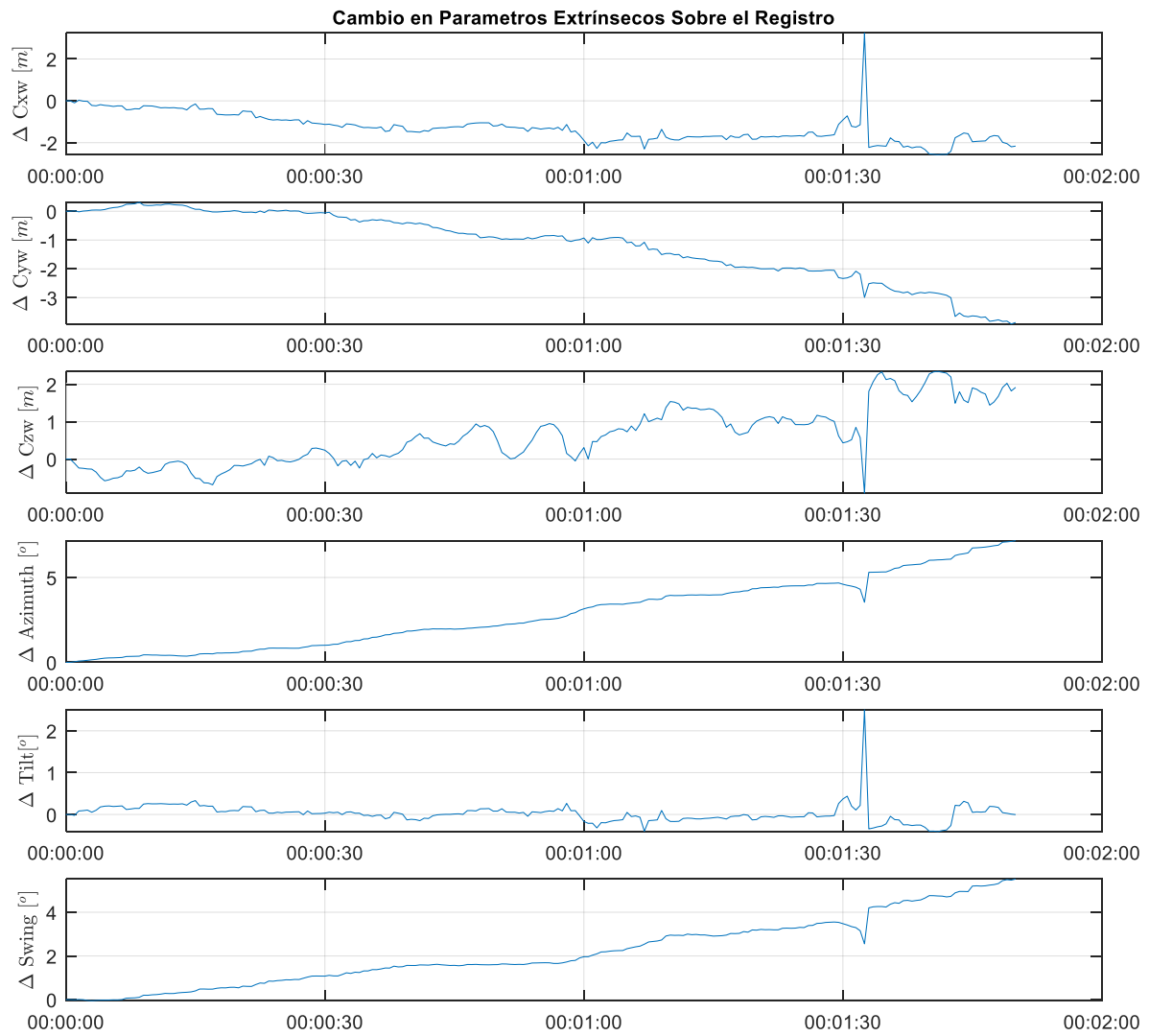


Ilustración 17: Variación de parámetros extrínsecos en el tiempo (hh:mm:ss) de la secuencia “550”, donde se muestra la variación respecto a la posición inicial en el instante de tiempo $t=0$. Las variables mostradas son representativas de la posición del Dron.

Tabla 4: Desviación estándar de extrínsecos en secuencia “550”.

Parámetro	Desviación Estándar
C_{xw}	0.6941 m
C_{yw}	1.1594 m
C_{zw}	0.7784 m
<i>Azimut</i>	2.0242 deg
<i>Tilt</i>	0.2298 deg
<i>Swing</i>	1.5354 deg

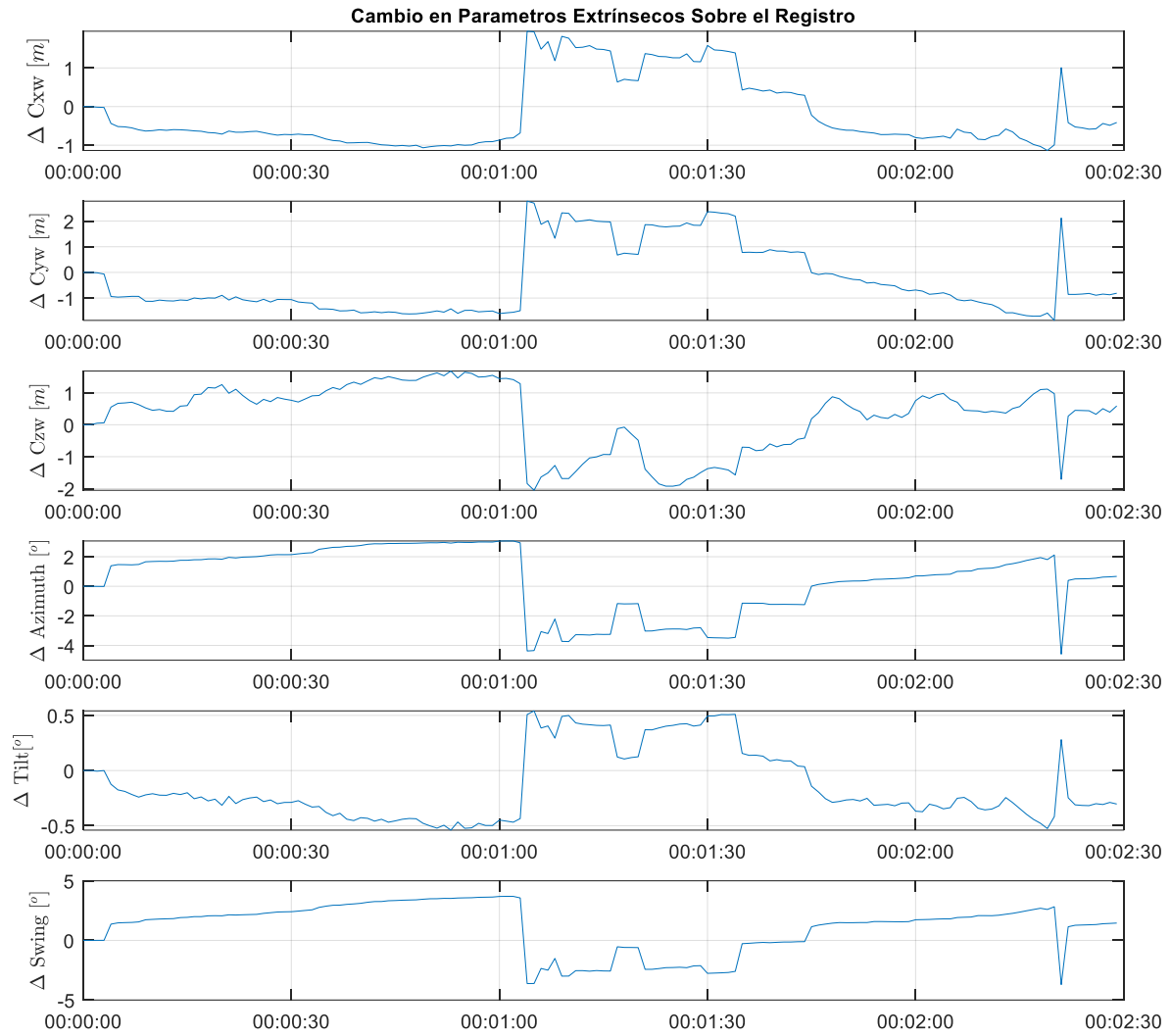


Ilustración 18: Variación de parámetros extrínsecos en el tiempo (hh:mm:ss) de la secuencia “551”, donde se muestra la variación respecto a la posición inicial en el instante de tiempo $t=0$. Las variables mostradas son representativas de la posición del Dron.

Tabla 5: Desviación estándar de extrínsecos en secuencia “551”.

Parámetro	Desviación Estándar
C_{xw}	0.894 m
C_{yw}	1.325 m
C_{zw}	1.028 m
<i>Azimuth</i>	2.1626 deg
<i>Tilt</i>	0.3184 deg
<i>Swing</i>	2.0607 deg

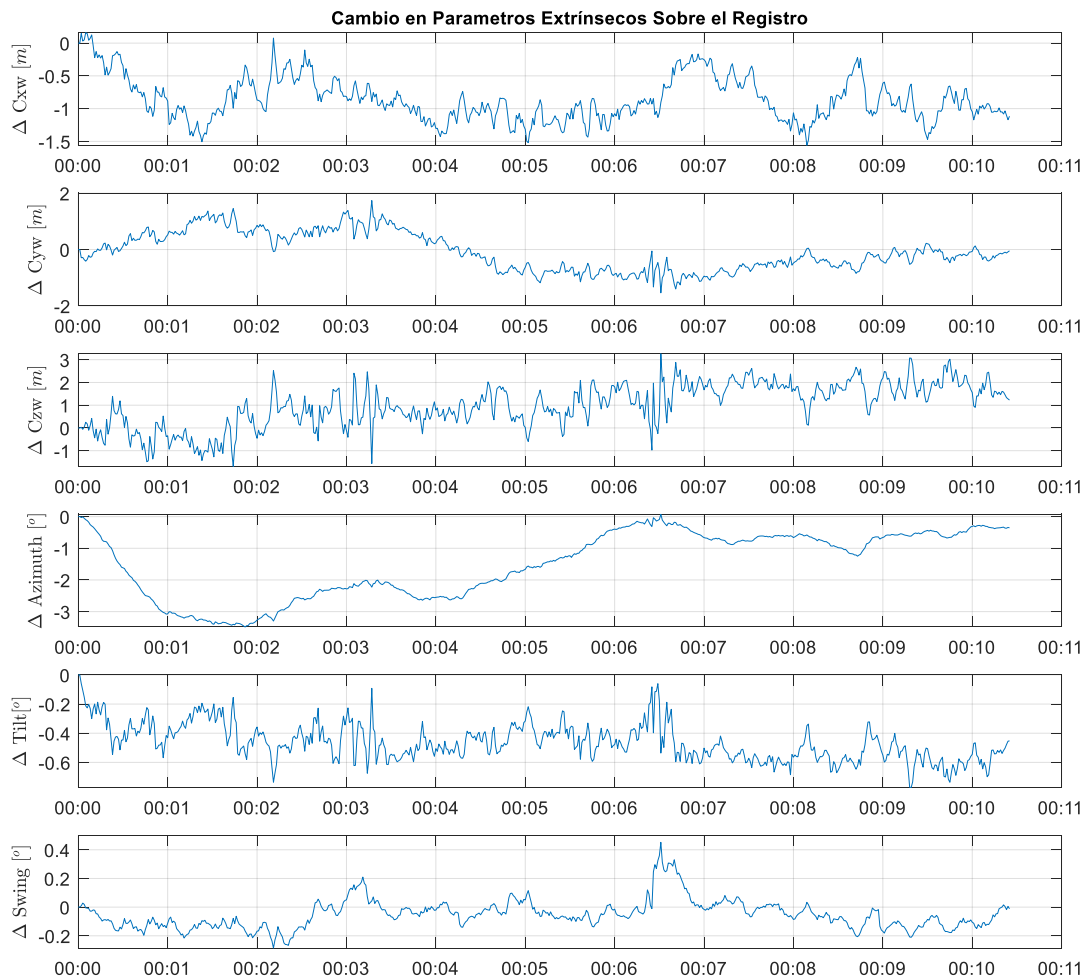


Ilustración 19: Variación de parámetros extrínsecos en el tiempo (hh:mm:ss) de la secuencia “537-538-539”, donde se muestra la variación respecto a la posición inicial en el instante de tiempo $t=0$. Las variables mostradas son representativas de la posición del Dron.

Tabla 6: Desviación estándar de extrínsecos en secuencia “537-538-539”.

Parámetro	Desviación Estándar
C_{xw}	0.1464 m
C_{yw}	0.3331 m
C_{zw}	0.29097 m
<i>Azimuth</i>	0.8475 deg
<i>Tilt</i>	0.0811 deg
<i>Swing</i>	0.2848 deg

6.1.8 Realizar para cada fotograma

Una vez realizados los pasos de calibración se debe repetir el proceso para cada fotograma, es decir, corregir las distancias y estabilizar considerando la variación de la posición. Este proceso es realizado por el algoritmo final del programa, generando así, las imágenes corregidas listas para el procesamiento de velocidades.

6.2 Obtención de velocidades

Para la obtención del campo de velocidades se emplea la aplicación de Matlab Pivlab (Thielicke, W. & Sonntag, 2021) la cual hace un seguimiento de los píxeles para establecer los vectores de desplazamiento. Como se explica anteriormente este proceso es desarrollado empleando el coeficiente de correlación cruzada en el dominio de la frecuencia utilizando algoritmos FFT. Es importante calibrar el análisis ingresando correctamente una distancia de referencia y un paso de tiempo entre los distintos fotogramas, este paso de tiempo será la diferencia en segundos entre fotogramas consecutivos dependiendo de que tasa de fotogramas se analice. Las distancias de referencia ingresadas son entre los puntos de control 4 y 5; para la primera vista (Ilustración 5a), y la distancia entre los puntos 1 y 3; para la segunda vista (Ilustración 5b), siendo estas respectivamente: $D_{45} = 50178.9[mm]$ y $D_{13} = 314333.21[mm]$. En la Ilustración 20 se muestran los vectores de velocidad encontrados para un determinado fotograma en ambas vistas estudiadas.

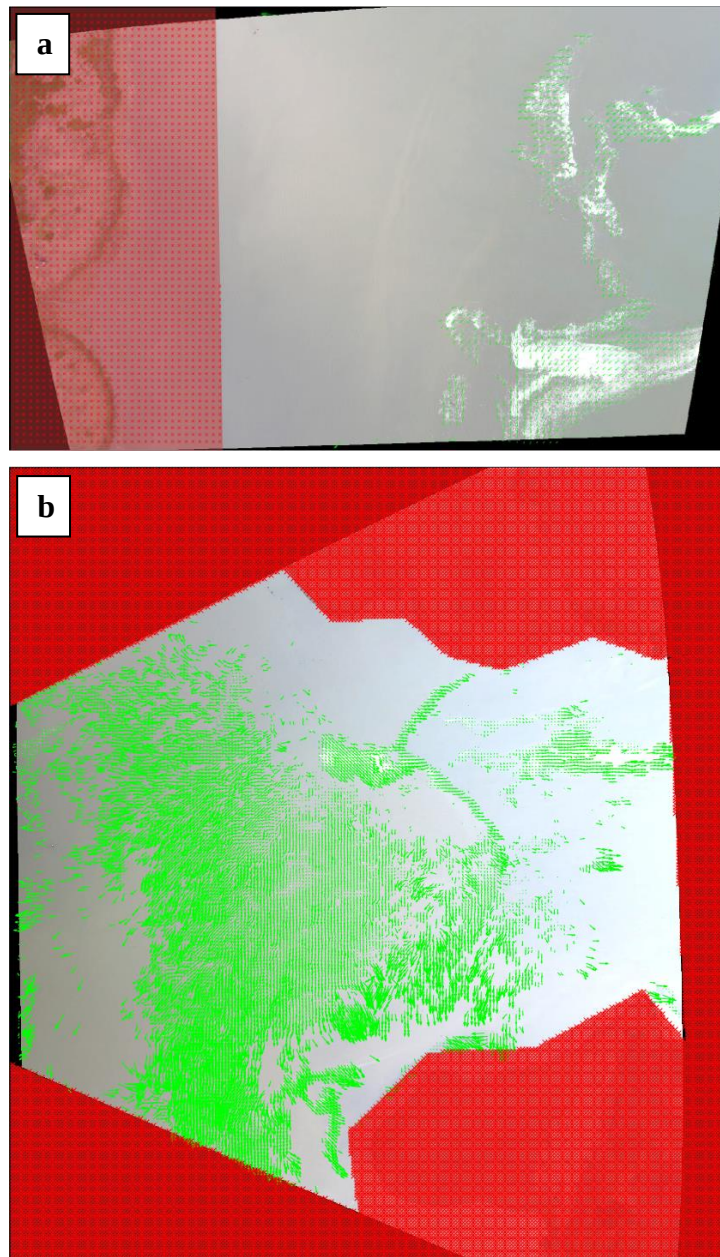


Ilustración 20: Campo de velocidades, se muestra tanto en (a) como en (b) una máscara en color rojo sobre área que no es de interés y en color verde los vectores de velocidad. (a) corresponde a la vista corregida de Ilustración 5a y (b) a la vista corregida de Ilustración 5b.

7 Resultados

Se extraen las velocidades de los registros visuales de manera que los resultados se dividen en dos partes, una por cada perspectiva tomada de la zona, siendo las secuencias “550” y “551” correspondientes al “plano 1” y la secuencia “537-538-539” correspondiente al “plano 2”. En primer lugar, se tiene que las velocidades obtenidas de la primera orientación de captura son utilizadas como datos de verificación del método. En segundo lugar, los vectores de velocidad obtenidos de la orientación dos son utilizados para determinar la factibilidad en realizar un análisis de bandas para mejorar las mediciones. Adicionalmente, solo se analizan las zonas con información sobre el flujo del estuario, es decir, solo donde existe presencia de agua. En este sentido no se analizan las zonas negras fuera del encuadre ni tampoco las zonas que muestren terreno sólido, este es cubierto por una máscara como se muestra en la Ilustración 20.

7.1 Velocidades de verificación

Para obtener las velocidades superficiales de las secuencias del “plano 1” se aplica un filtro para encontrar los desplazamientos de la espuma visible en los videos. Se analizan estas secuencias en primer lugar para generar información de validación del método, en específico se analizan las velocidades obtenidas en las cercanías del instrumento ADV con el objetivo de comparar ambas fuentes de información. En este sentido se obtienen los vectores de velocidad en un área aproximada de 16x16 [m] alrededor del punto de georreferencia 3 según se muestra en la Ilustración 5. Se analiza también los efectos de la resolución vectorial aplicada y la elección de una tasa de fotogramas en la obtención de velocidades. Por un lado, se analizan las velocidades obtenidas al variar la ventana de interrogación al aplicar la metodología; a mayor resolución mayor densidad de vectores, por lo tanto, en este caso se realiza un análisis para ventanas de interrogación de 16x16, 8x8 y 4x4 píxeles (Ilustración 24) fijando la tasa de fotogramas a 1 fps. Por otro lado, se revisan las velocidades obtenidas para distintas tasas de fotogramas (Ilustración 25) fijando la resolución vectorial a 16 píxeles; se analizan las siguientes tasas: 0.5fps, 1fps, 2fps, 3fps, 5fps, 10 fps y 30 fps, con el objetivo de estudiar su efecto en la precisión de los datos obtenidos y establecer referencias para delimitar el coste computacional. Estos dos análisis se realizan sobre una posición específica, a diferencia de los datos de validación.

Para extrapolar los datos de velocidad obtenidos en la superficie a los medidos por el ADV se asume una distribución simplificada del perfil de velocidades sin considerar los efectos de estratificación. En este sentido se establece una distribución logarítmica (4) de acuerdo a las expresiones planteadas por Von Kármán, (1930) (Ilustración 21), donde u corresponde a la velocidad media, u_* representa la velocidad de fricción, k es la constante de Von Kármán, z corresponde a altura en el flujo; siendo la variable independiente y z_0 representa la altura de rugosidad. Para establecer el perfil de velocidades se asume la constante $k = 0.4$ adoptando un enfoque conservador (Segalini et al., 2013), por otro lado, si bien se han propuesto métodos para estimar z_0 y u_* (Bergeron & Abrahams, 1992), en esta investigación no se profundiza en el análisis de estas variables. En este sentido, se tiene que la altura de rugosidad para arena del lecho de un río tiene un valor de alrededor de 0.005 [m] (Shi et al., 2006) y es un valor que se ha usado en el estudio de estuarios anteriormente (Shi et al., 2010). Por último, u_* es determinado a partir del despeje de la ecuación (4) con las condiciones de velocidad capturadas por el ADV en el tiempo. Se obtiene de este modo un factor igual a 0.69, en el sentido de que para comparar las velocidades medidas en la superficie con las del instrumento, se ponderan las primeras por el factor encontrado. Cabe señalar que si bien existe una variación en la altura del perfil del flujo (Ilustración 32) esta es pequeña y ocupando las alturas máxima (1.09[m]) y mínima (1.08[m]) alcanzadas se obtiene el mismo factor.

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4)$$

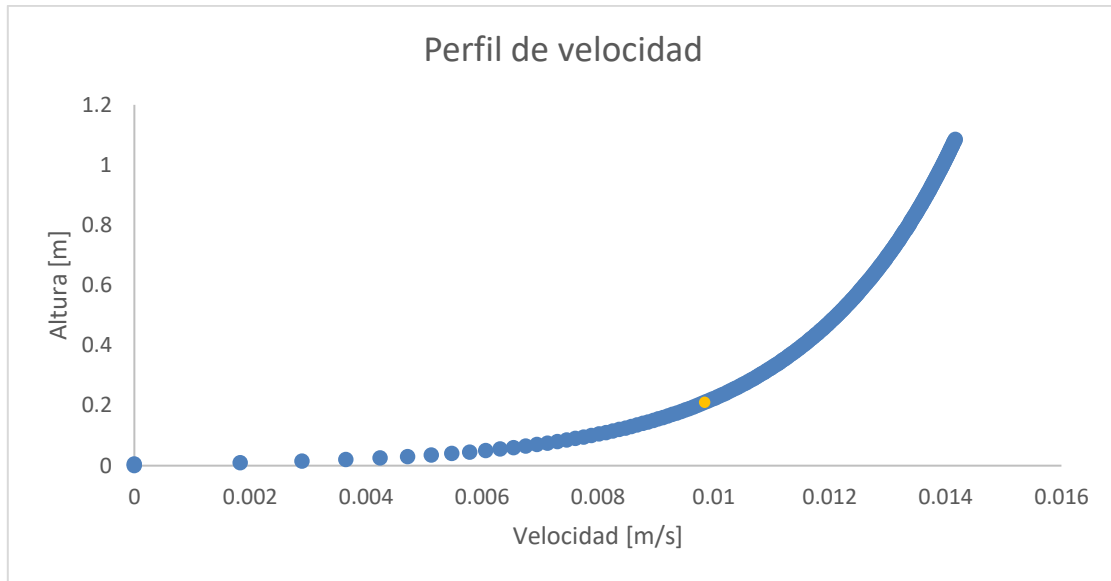


Ilustración 21: Perfil de velocidades utilizado en la extrapolación de los datos medidos en superficie hasta el nivel del ADV. En amarillo se destaca la posición vertical del ADV en donde se encuentra el instrumento de medición (21 cm desde el lecho).

Como se menciona anteriormente, las velocidades medidas por el instrumento ADV poseen un sistema de referencia distinto al utilizado, por esta razón estas velocidades son proyectadas al nuevo sistema de referencia, es decir del sistema xy al uv . En la Ilustración 22 se muestra la proyección de los datos de tal forma que se logra apreciar la diferencia en la orientación de 15° en forma de rotación de los datos. En la Ilustración 23 se muestra una comparación de las velocidades según los sistemas de referencia xy y uv .

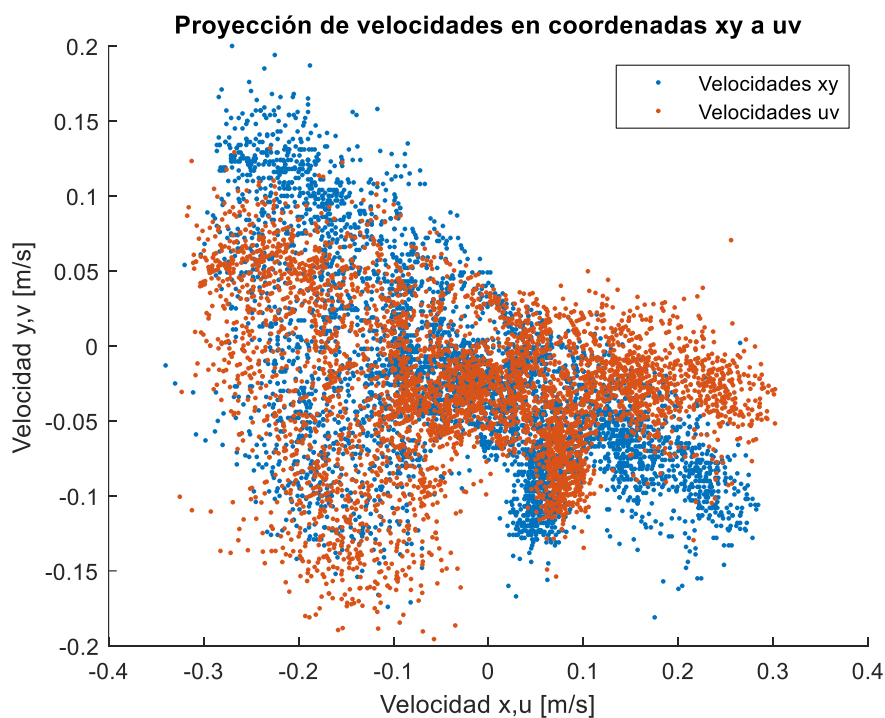


Ilustración 22: Proyección de velocidades a coordenadas uv , se denota un giro de 15° entre los datos representado la diferencia entre la orientación de los ejes. Para no saturar el gráfico de puntos se muestra una fracción de los datos de velocidades (datos entre 15:00 y 15:05 hrs.).

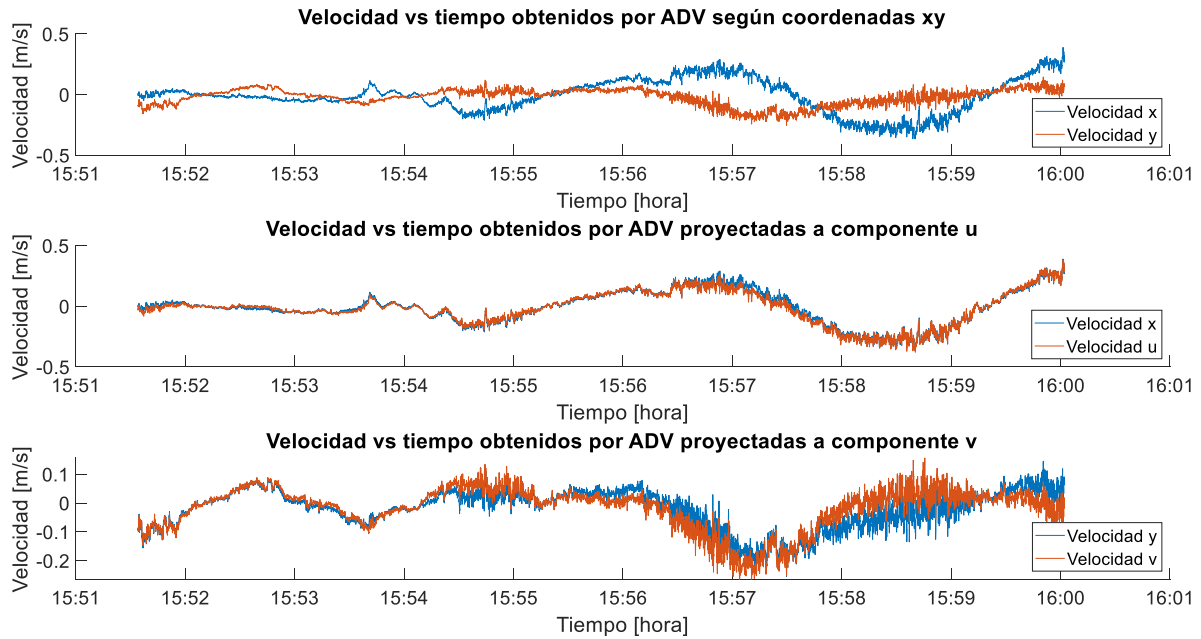


Ilustración 23: Comparación entre datos capturados en coordenadas xy con nuevas coordenadas uv .

Bajo estas consideraciones se determinan las velocidades para los distintos análisis realizados, en la Ilustración 26 se muestran las velocidades obtenidas en la superficie del ADV en magnitud y en los sentidos horizontal u y vertical v .

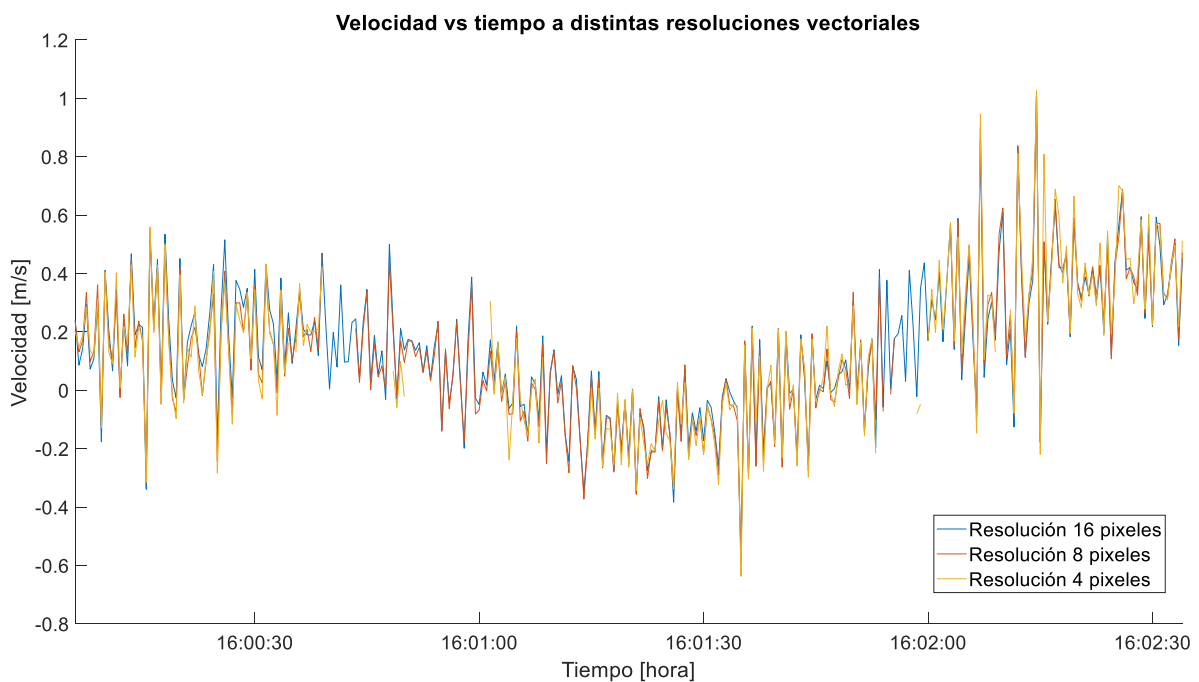


Ilustración 24: Velocidades obtenidas a distintas resoluciones vectoriales. Análisis realizado a secuencia "551" a una tasa de 1 fotograma por segundo.

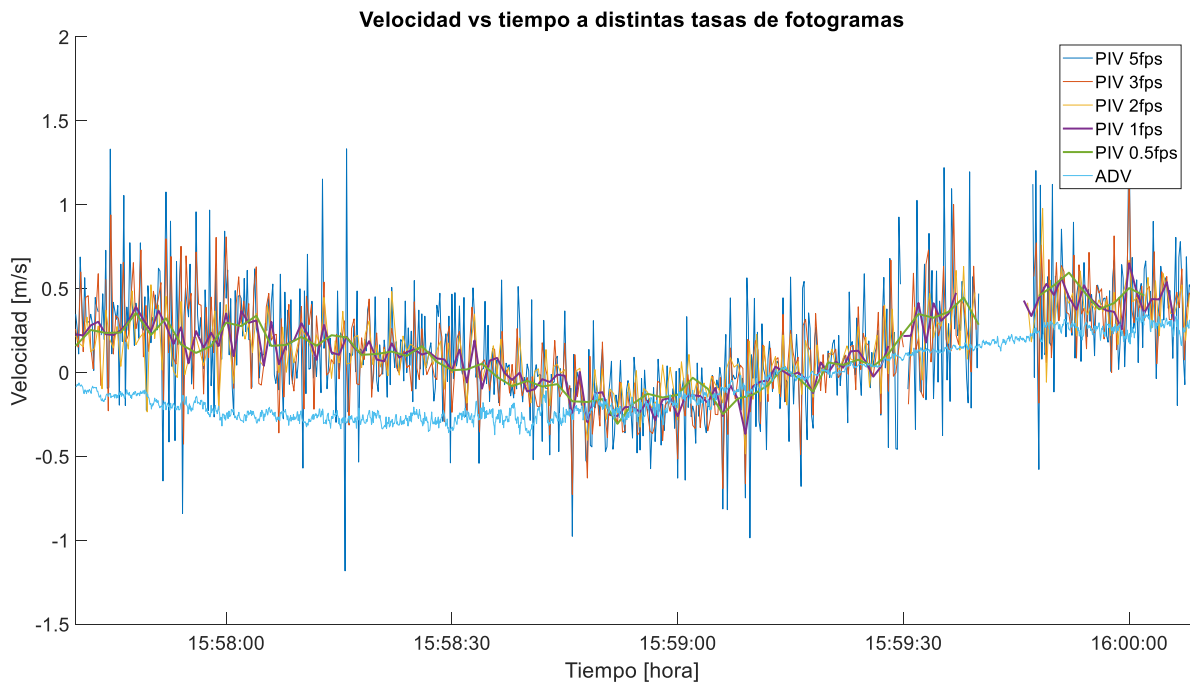


Ilustración 25: Velocidades obtenidas a distintas tasas de fotogramas. Análisis realizado a secuencia “551” a una resolución vectorial de 16 pixeles. Se muestra las velocidades capturadas por el ADV a modo de comparación y se dejan fuera las velocidades obtenidas para tasas superiores a 5 fps para no saturar el grafico de información.

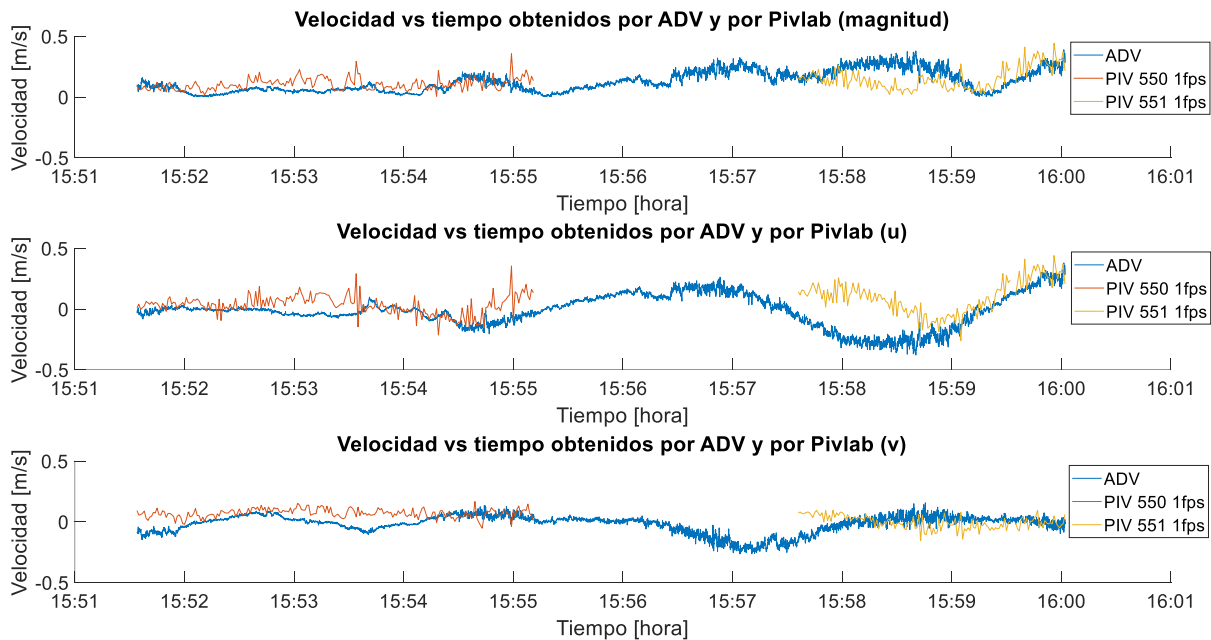


Ilustración 26: Velocidades obtenidas considerando una ventana de interrogación de 16x16 pixeles y una tasa de 1 fotograma por segundo, ajustado a la profundidad del ADV considerando el promedio de velocidades en un área de 16x16 [m] alrededor del instrumento.

7.2 Velocidades con análisis por bandas

Se estudia mediante un análisis por bandas la cantidad de vectores obtenidos en la secuencia “537-538-539” considerando una ventana de interrogación de 16x16 píxeles y una tasa de 1 fotograma por segundo. Se analizan 4 espectros adicionales al original; el cual se establece como el espectro RGB, de modo que respecto a este se compara el número de vectores obtenidos. En este sentido, se analiza el índice espectral NDTI y cada banda por separado del espectro RGB. En la Ilustración 27 se muestra un mismo fotograma procesado de acuerdo con las distintas configuraciones de bandas, para dar mayor contraste a las imágenes se hace uso de la función *caxis* en Matlab (límites [0.4 0.8]) y se dispone de un mapeado en escala de grises. Por otro lado, en el procesamiento de las distintas bandas y en la obtención de vectores se aplica la misma configuración, ajustando según un determinado umbral de brillo y nivel de correlación constantes en todos los análisis, fijando las variables no analizadas. En particular se remueven los vectores donde el contraste y la correlación son bajos, de esta forma los criterios son homologados y la única variable de estudio es la banda o espectro analizado. En la Ilustración 28 se muestra un resumen del análisis realizado en forma de diagramas de caja y bigotes, se muestran adicionalmente las medias en cada caso.

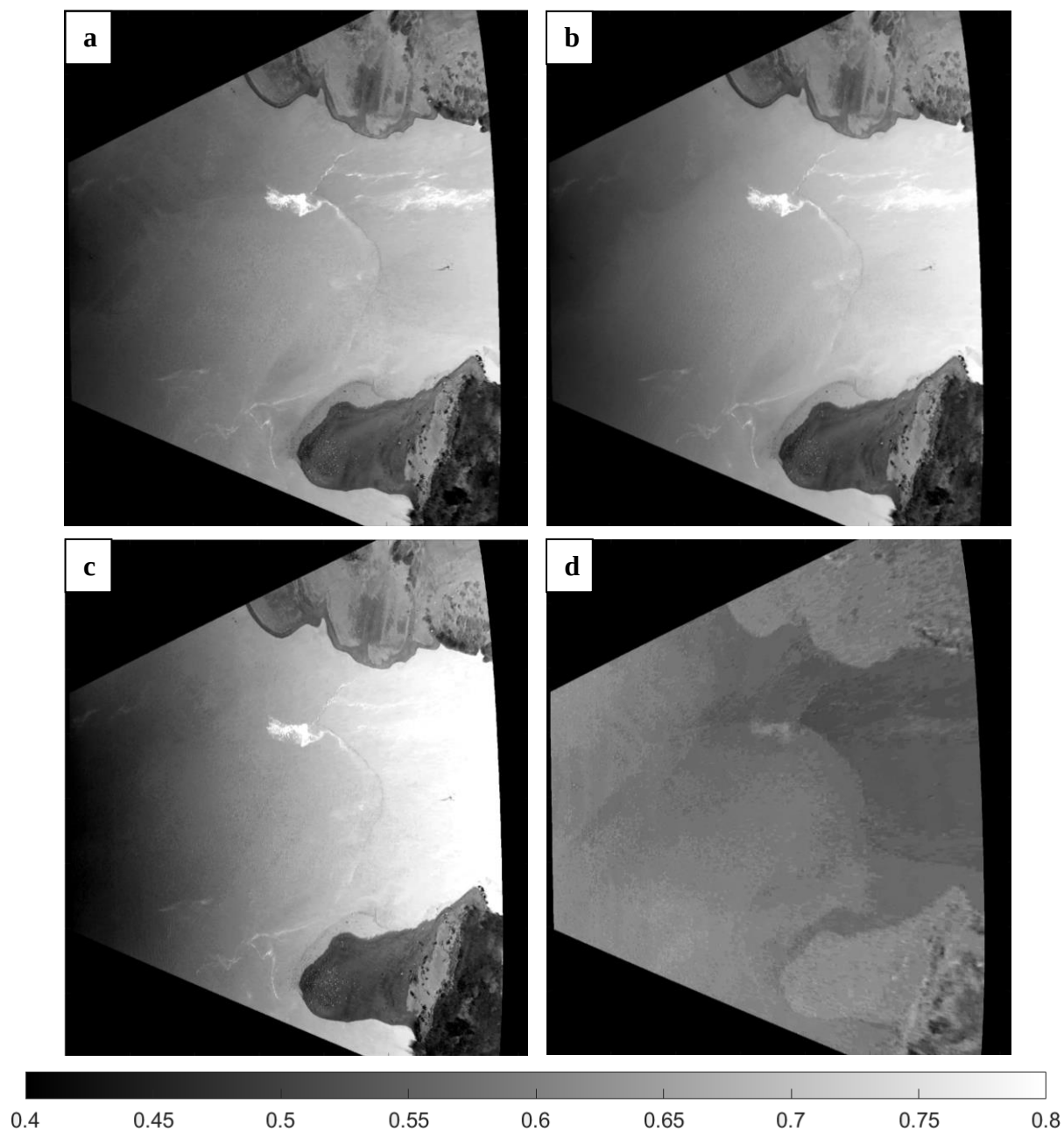


Ilustración 27: Primer fotograma de la secuencia “537-538-539” procesado de acuerdo con las distintas bandas estudiadas. (a) corresponde a la banda roja, (b) corresponde a la banda verde, (c) corresponde a la banda azul y (d) corresponde al índice ndti.

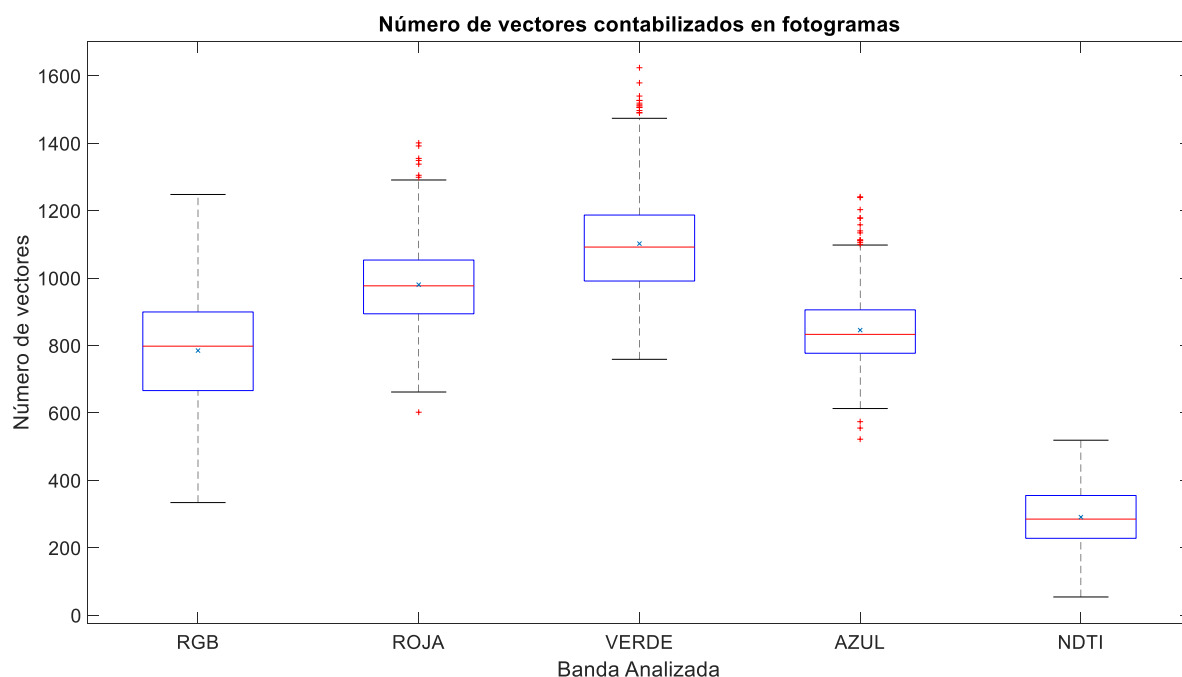


Ilustración 28: Numero de vectores obtenidos en cada fotograma de la secuencia “537-538-539” según el espectro o banda utilizada. Se muestra la media y la mediana en cada caso (la media es denotada por una x), para el espectro *rgb*; $\bar{x} = 785$ $M_e = 798$, banda *roja*; $\bar{x} = 980$ $M_e = 977$, banda *verde*; $\bar{x} = 1102$ $M_e = 1092$, banda *azul*; $\bar{x} = 846$ $M_e = 833$ y espectro *ndti*; $\bar{x} = 291$ $M_e = 285$.

8 Análisis y Discusión

Referente al proceso de geo rectificación, se establece que, si bien el proceso de calibración no es perfecto, los resultados son aceptables. El Dron se mantiene relativamente estable en la toma de imágenes lo que favorece el proceso, los puntos de georreferencia son visibles en todo momento y en general la perspectiva no cambia demasiado. En la Ilustración 17, Ilustración 18 e Ilustración 19 se aprecia según los parámetros extrínsecos calculados como el desplazamiento máximo es aproximadamente de 4 metros y los cambios en la rotación se mantienen bajo los 5 grados.

8.1 Coste computacional

Antes de ser procesadas las secuencias de video, se estudia el impacto en los resultados obtenidos de variables asociadas directamente al coste computacional, en particular la elección de distintas resoluciones vectoriales y tasas de fotogramas. La resolución vectorial elegida está asociada directamente con la cantidad de vectores obtenidos en las imágenes y representa la dimensión de la ventana de interrogación asociada al coeficiente de correlación. Por otro lado, la tasa de fotogramas dicta el nivel de discretización de los movimientos percibidos y el diferencial de tiempo para determinar las velocidades. La elección de estos parámetros no resulta trivial al momento de llevar a cabo el procesamiento de los videos, ya que tanto incrementar la resolución vectorial como la tasa de fotogramas implica un incremento en los cálculos necesarios por el ordenador y por lo tanto en el tiempo de procesamiento. Establecer criterios para estos parámetros es necesario ya que el orden en el tiempo de procesamiento puede establecerse en horas o en días dependiendo de su elección. De manera estimativa se extrapola a partir del análisis de una muestra, el tiempo de cálculo y la memoria del ordenador necesarios para procesar una secuencia de 10 minutos, considerando una tasa de 30 fotogramas por segundo y una resolución vectorial de acuerdo con una venta de interrogación de 4x4 píxeles. El tiempo estimado de esta tarea supera los 15 días de ejecución continua (considerando un procesador de 6 núcleos y una frecuencia de reloj de 3.9 GHz) y la memoria requerida supera el terabyte de información.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis para distintas resoluciones vectoriales mostrados en la Ilustración 24, se establece que los resultados no son dependientes de las resoluciones elegidas y la diferencia en las velocidades obtenidas son marginales. Por lo tanto, se elige una resolución de 16x16 píxeles para ahorrar recursos computacionales. La elección de esta resolución como la ventana de interrogación más grande analizada se debe a que corresponde al análisis que viene por defecto en el programa PIVlab y a criterio del investigador proporciona una discretización suficiente del espacio en cuanto a la obtención de vectores. Por otro lado, de acuerdo con los resultados obtenidos del análisis para distintas tasas de fotogramas, se observa que existen diferencias en los resultados obtenidos para distintas tasas. En la Ilustración 25 se puede ver como a medida que aumenta la tasa de fotogramas los resultados divergen cada vez más, lo que se puede notar claramente en los resultados obtenidos considerando 5 fps. Esto es debido a que, al aumentar la discretización en lugar de ganar exactitud, las mediciones conllevan mayor incertidumbre asociada. Se debe tener en cuenta que las distancias de calibración se seleccionan de manera aproximada a partir de una imagen y la geo rectificación no es perfecta. Adicionalmente, a pesar de que teóricamente se establezcan tasas de fotogramas fijas, en la realidad el tiempo entre cada fotograma puede presentar pequeñas variaciones. En este sentido, para tasas de fotogramas muy grandes la discretización de tiempo y las distancias medidas serán tan pequeñas que la inexactitud numérica asociada al error de medición y temporal cobran mayor peso en la obtención de las velocidades. El incremento en el módulo de las velocidades obtenidas a medida que se analizan más fotogramas posiblemente se deba a que una discretización temporal pequeña incrementa los valores obtenidos, en el sentido de que para obtener las velocidades se dividen las distancias medidas por el espaciamiento temporal; sin embargo, esto no fue comprobado en el presente estudio. A partir de los resultados obtenidos se nota como los resultados para tasas de 1 y 0.5 fotogramas por segundo convergen a los mismos valores en magnitud, es así como se establece para los análisis posteriores una tasa de 1 fotograma por segundo para tener una mayor cantidad de datos y una mayor discretización temporal.

Si bien se puede pensar que a mayor discretización los resultados serán de mejor calidad, en este caso se ve como los resultados indican que una ventana de interrogación de 16x16 píxeles y una tasa de 1 fotograma por segundo son suficientes para obtener resultados consistentes. De esta manera se acotan los recursos computacionales necesarios para el procesamiento, volviendo manejable en el volumen de datos en el corto plazo.

8.2 Validación de velocidades obtenidas

Observando los resultados obtenidos para los datos de validación mostrados en la Ilustración 26 en contraste con las velocidades medidas en terreno, en primer lugar, se destaca que de manera cualitativa el orden de magnitud de las velocidades obtenidas por la metodología PIV es adecuado. Por otro lado, las curvas parecen ajustarse en mayor o menor medida según la componente analizada. Para realizar un proceso de validación del método objetivo, se estudia la correlación entre las velocidades obtenidas con las medidas en terreno mediante el coeficiente de correlación de Spearman para evaluar relaciones monotónicas entre las variables, dado que las velocidades no siguen una distribución normal. La no normalidad de las variables es establecida mediante dos pruebas estadísticas considerando un nivel de significancia del 5%, en este sentido se realizan las pruebas Chi cuadrado y la prueba de bondad de Jarque-Bera. Si bien se analiza la correlación con el coeficiente de Spearman se estudia también la linealidad entre las variables y a modo de comparación se presenta también el coeficiente de Pearson (Ilustración 29). El coeficiente de correlación de Spearman r_s es calculado según (5) con n igual al número de puntos y d_i igual a la diferencia entre rangos, se establece como hipótesis nula la no relación de las variables.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

En la Tabla 7 se muestran los resultados de la prueba para distintas relaciones entre variables, se comparan las velocidades obtenidas con la metodología PIV y las medidas por el ADV considerando las distintas secuencias analizadas; siendo “all” la secuencia completa y “mag” la magnitud de velocidad. Al analizar los resultados obtenidos para la secuencia completa se observa en términos

generales la existencia de una relación baja, destacando la correlación en la componente u , la cual registra una correlación del 24%. Si bien en la componente v se aprecia una correlación, esta es marginal y de acuerdo con el p – *valor* no existe suficiente evidencia para establecer la presencia de alguna relación. Sucede lo mismo en el análisis particular de la secuencia 550 para ambas componentes analizadas y también la magnitud. Para el análisis de la secuencia 551 no se detecta correlación entre las magnitudes, pero si al segregar en sus componentes, en particular se detecta una correlación moderada en la componente u de 55% y en la componente v de 47%. Con esta información es posible establecer que, si bien se logra apreciar una relación al analizar la secuencia completa, esta es mayor en la secuencia 551 y por contraparte parece no haber correlación con los datos de la secuencia 550 o al menos no existe evidencia para ello. Adicionalmente, se destaca la mayor correlación observada en la secuencia 551 por sobre la secuencia 550. Por otro lado, a partir del análisis de linealidad entre las variables mostrado en la Ilustración 29, se nota como la correlación para las componentes u y v en la secuencia 551 refleja la mayor linealidad.

Tabla 7: Coeficiente de correlación de Spearman considerando una significancia del 5% ($\alpha = 0.05$).

Correlación	Coeficiente de Spearman	Valor P
<i>mag piv all vs mag adv all</i>	0.1973	$7.59E - 04$
<i>u piv all vs u adv all</i>	0.2416	$3.42E - 05$
<i>v piv all vs v adv all</i>	0.0821	0.1649
<i>mag piv 550 vs mag adv 550</i>	0.0143	0.8520
<i>u piv 550 vs u adv 550</i>	0.0562	0.4626
<i>v piv 550 vs v adv 550</i>	-0.1242	0.1036
<i>mag piv 551 vs mag adv 551</i>	-0.0094	0.9204
<i>u piv 551 vs u adv 551</i>	0.5454	$2.92E - 10$
<i>v piv 551 vs v adv 551</i>	0.4684	$1.30E - 07$

También se analiza la correlación para valores de velocidad positivos y negativos, esto se realiza para determinar si existe relación entre el sentido de la marea en el estuario y las velocidades obtenidas. El análisis es realizado a las secuencias completas considerando las distintas componentes estudiadas, en Ilustración 31 se muestran los rangos de datos utilizados. En este sentido se determina nuevamente el coeficiente de correlación de Spearman para velocidades mayores y menores a 0 (Tabla 8). Se debe mencionar que el análisis referente a la magnitud en este caso se lleva a cabo considerando ambas componentes positivas o negativas según cada caso, con el objetivo de diferenciar una corriente entrante o saliente en el estuario. Adicionalmente, se estudia nuevamente la linealidad entre las variables a modo de comparación con el coeficiente de Pearson (Ilustración 30). Se aprecia que el valor p indica que todas las relaciones satisfacen un nivel de confianza de la prueba estadística del 95% a excepción de la correlación entre las velocidades para valores negativos de la componente u . Se destacan los coeficientes de correlación obtenidos para las magnitudes y velocidades en la componente u mayores a 0 siendo de un 84% y 71% respectivamente, denotando una relación fuerte o muy fuerte según distintos autores (Akoglu, 2018). Por otro lado, la correlación obtenida para la componente v y para las velocidades menores a 0 son débiles y por la naturaleza de las variables estudiadas se puede decir que no están relacionadas. Respecto al análisis de linealidad mostrado en la Ilustración 30 se destaca como las velocidades para valores positivos alcanzan la mayor proporción lineal.

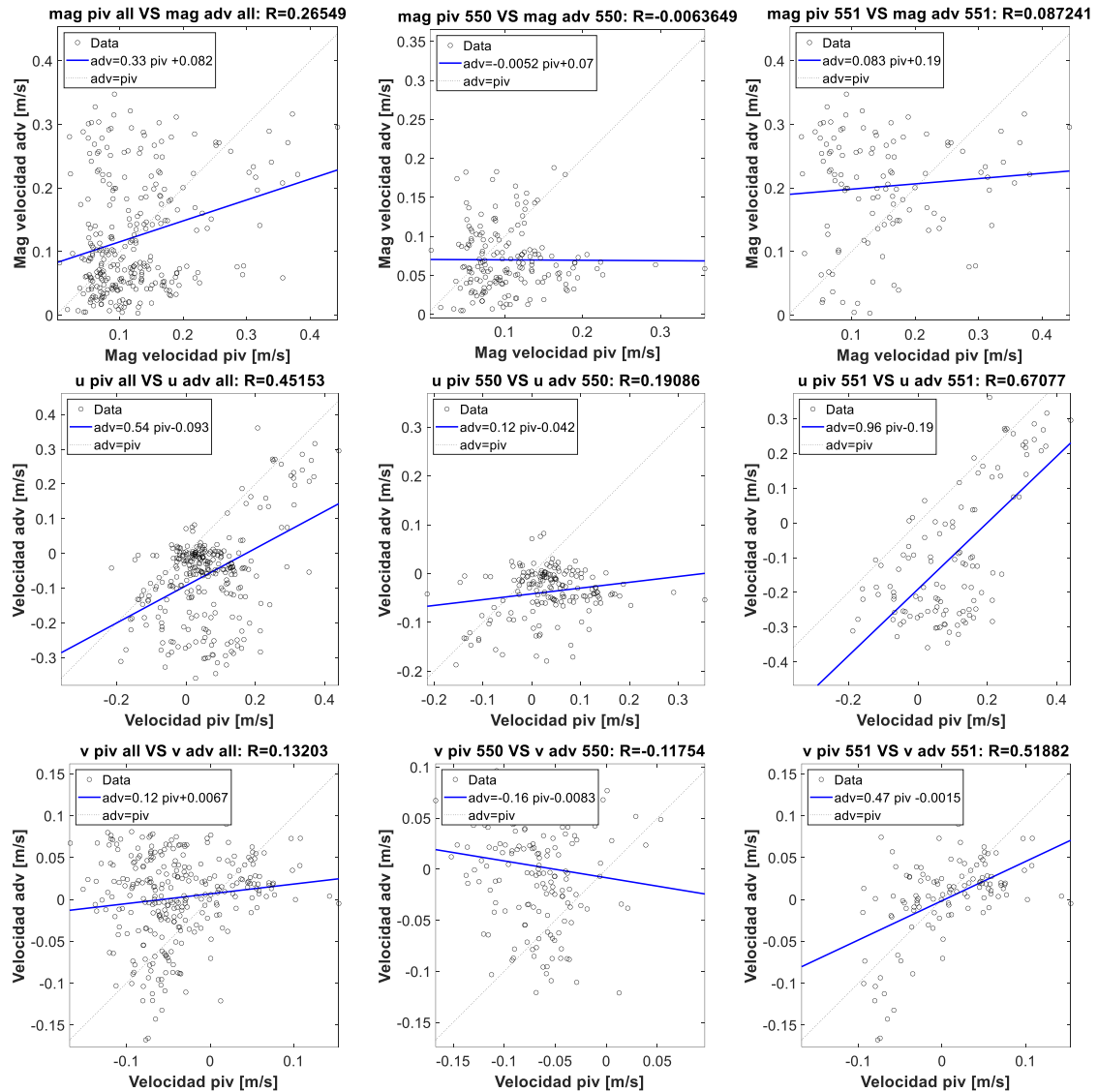


Ilustración 29: Correlación lineal entre velocidades medidas por metodología PIV y ADV. En cada caso se muestra el coeficiente de correlación de Pearson respectivo y la regresión lineal asociada a los datos. Adicionalmente, los gráficos se ordenan en columnas de acuerdo con las secuencias analizadas y en filas de acuerdo con la componente analizada.

Tabla 8: Coeficiente de correlación de Spearman considerando una significancia del 5% ($\alpha = 0.05$).

Correlación	Coeficiente de Spearman	Valor P
$mag\ piv > 0\ vs\ mag\ adv > 0$	0.8377	$2.09E - 06$
$u\ piv > 0\ vs\ u\ adv > 0$	0.7090	$1.33E - 11$
$v\ piv > 0\ vs\ v\ adv > 0$	-0.2116	0.0059
$mag\ piv < 0\ vs\ mag\ adv < 0$	0.2648	0.0199
$u\ piv < 0\ vs\ u\ adv < 0$	0.0084	0.9014
$v\ piv < 0\ vs\ v\ adv < 0$	0.2545	0.0050

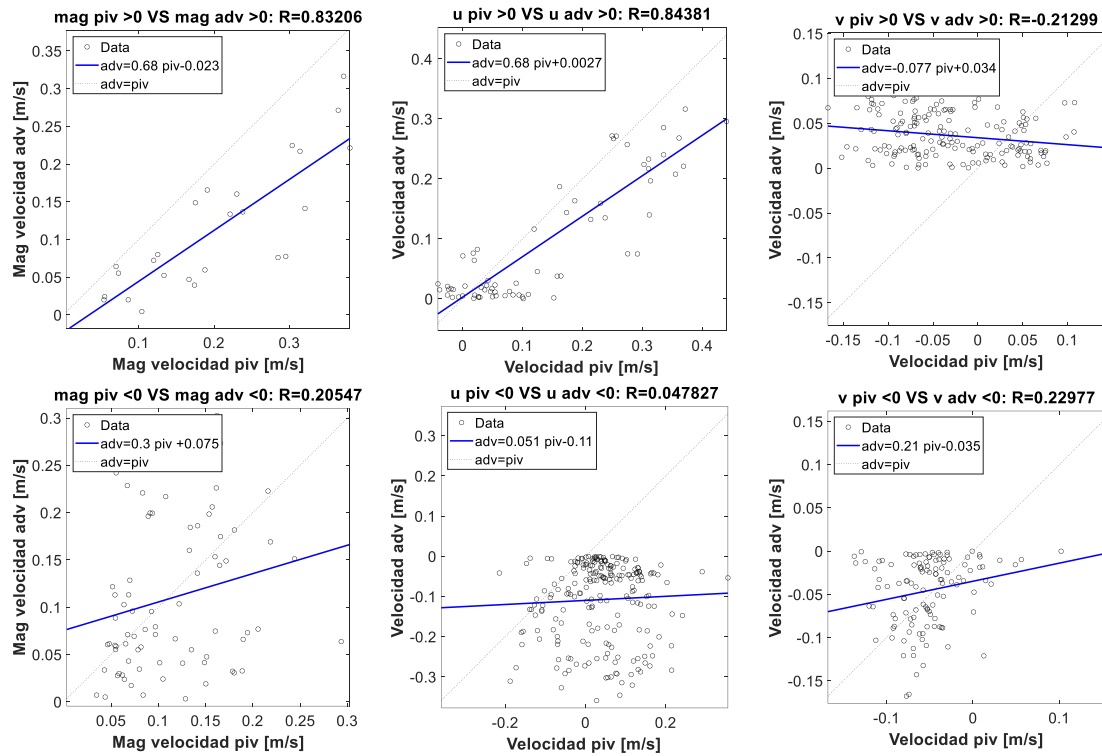


Ilustración 30: Correlación lineal entre velocidades medidas por metodología PIV y ADV. En cada caso se muestra el coeficiente de correlación de Pearson respectivo y la regresión lineal asociada a los datos. En la primera fila se presentan los análisis para velocidades mayores a 0 y en la segunda para velocidades menores a 0. Los datos mostrados como “mag” indican que se consideran las velocidades tanto en la dirección u como v positivas o negativas.

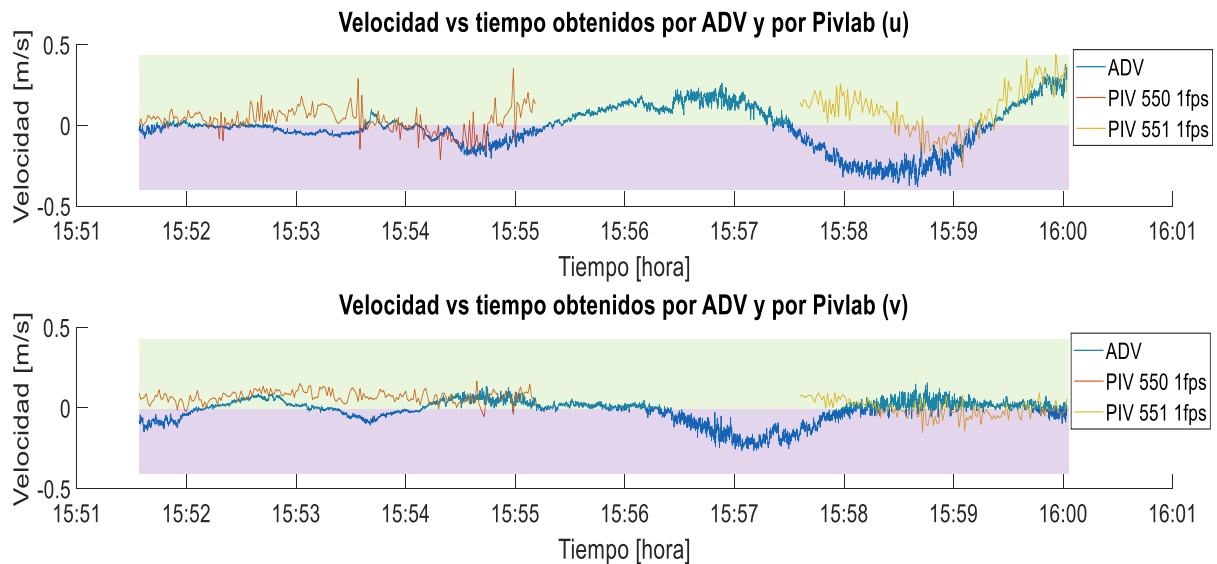


Ilustración 31: Rango de datos utilizados para obtener correlaciones mostradas en Ilustración 30, valores positivos mostrados en verde y valores negativos en morado. Para la correlación “mag” se utilizan ambas velocidades u y v positivas o negativas. Velocidades en las mismas franjas tendrán igual sentido.

De esta forma se establece que en general la mayor correlación se produce en los datos obtenidos de la secuencia 551 cuando el flujo es positivo, es decir, cuando el agua del mar está ingresando al humedal.

En la Ilustración 32 se muestra a la par de las velocidades en la componente u el registro temporal medido en terreno de la salinidad y profundidad del cauce en el punto de georreferencia 3. En particular con la información de salinidad y profundidad se puede ver como el flujo en el instante medido presenta dos comportamientos, en la primera mitad del registro el flujo permanece en su mayoría estático respecto a la concentración de sal y nivel del agua, y en la segunda mitad se produce una elevación de los niveles medidos. Esto indica que en un comienzo el flujo estaba bajo el régimen del río y posteriormente se genera una entrada del agua marina al estuario en la región analizada lo que eleva tanto la salinidad como la profundidad. En este sentido, se tiene que la secuencia 550 graba un momento en donde las corrientes permanecen dominadas por un régimen de interacción fluvial con el agua oceánica y la secuencia 551 graba el momento en donde la corriente oceánica entra al estuario. Esto resulta coincidente con la evidencia establecida puesto que, al entrar el agua del mar al estuario, se genera un frente homogéneo en densidad que estabiliza los perfiles de velocidad del cauce, a diferencia del régimen estuarino que en estado normal de mezcla son propensos a la estratificación. De este modo es posible explicar los resultados obtenidos, con la base de que el perfil de velocidades logarítmico utilizado se ajusta de mejor manera cuando el mar entra al estuario y no reflejando correctamente las velocidades cuando se generan interacciones de mezcla o regímenes turbulentos; ya que existen gradientes de densidad que estratifican el flujo. Así, se explica entonces la presencia de correlaciones para las velocidades de la secuencia 551 y aún más para las velocidades mayores a 0.

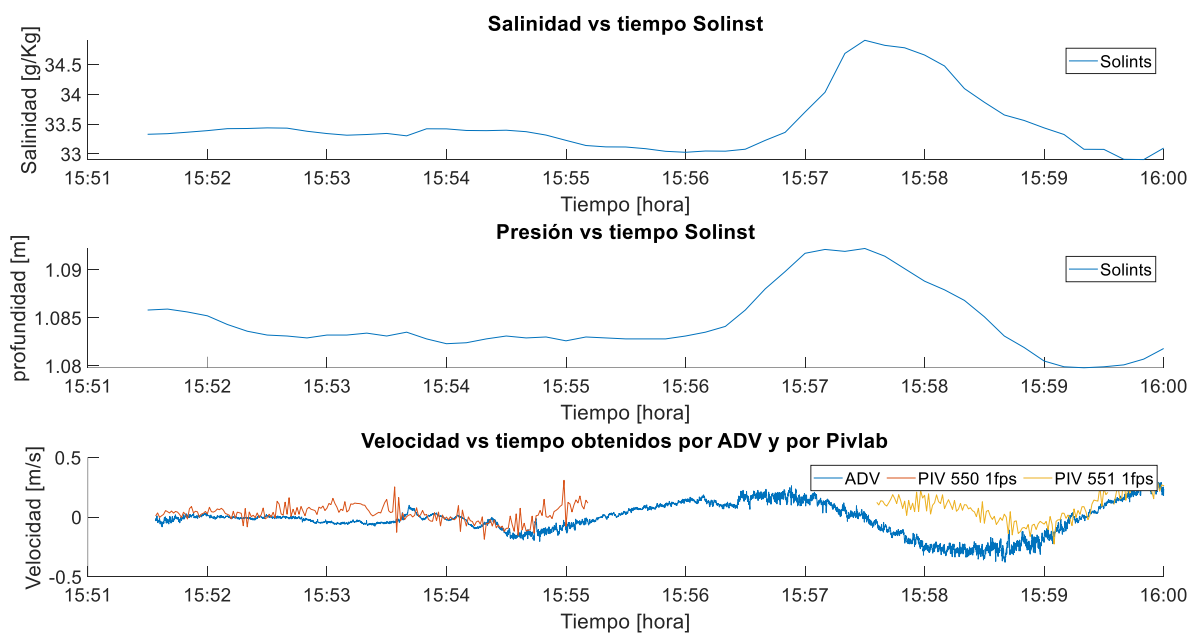


Ilustración 32: Datos de profundidad del cauce y salinidad comparados con las velocidades obtenidas en las cercanías de los instrumentos en el punto de georreferencia 3. Para velocidades capturadas en la componente horizontal u .

8.3 Análisis de bandas

A partir de los resultados obtenidos del análisis de bandas mostrados en la Ilustración 28, se observa como en general al segregar el espectro RGB aumenta el conteo de vectores, lo que se traduce en un mapeo del campo de velocidades más amplio. Sin embargo, el análisis realizado considerando la banda azul, no muestra una mejora notable respecto al espectro original. Las mayores mejoras en este sentido son al aplicar el análisis a las bandas roja y verde siendo esta última la más notable, en particular si se consideran las medias del espectro RGB y la banda verde se aprecia un incremento del 40% en la cantidad de vectores obtenidos; la mejora considerando la banda roja es de un 25%. Por otro lado, se observa que al considerar el índice NDTI el conteo de vectores disminuye drásticamente, esto

debido a que si bien se resalta el sedimento en suspensión no se logra establecer una correlación notable entre los distintos fotogramas. Dicho de otra forma, las imágenes pierden mucha resolución, en este sentido, el índice espectral demuestra no ser aplicable para mejorar las mediciones o al menos no en la escala trabajada.

9 Conclusiones y Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos se establece que la metodología PIV es adecuada para obtener el campo de vectores en el cuerpo estuarino estudiado y más aún el uso de drones como instrumento de medición. Los datos obtenidos son validados para velocidades mayores a 0 con una correlación superior al 80%, sin embargo, no para velocidades menores a 0 dado los posibles efectos de estratificación de los perfiles de velocidad. La evidencia muestra que esto es debido a que el perfil de velocidades logarítmico logra ajustarse correctamente cuando las corrientes de agua son positivas, es decir, cuando el mar entra al estuario, homogenizando el fluido en densidad y dirección a modo de disminuir los procesos de estratificación. Respecto al proceso de análisis, se debe tener en consideración el coste computacional, por lo que puede ser importante buscar la correlación entre la entrega de información y el volumen de datos analizados. Para desarrollar un análisis óptimo se deben establecer criterios sobre la cantidad de fotogramas por segundo analizados y la resolución vectorial requerida, a modo de que los resultados obtenidos sean representativos y un aumento en la discretización del análisis no tenga una mayor ganancia de resultados. En particular en este estudio se estableció como suficiente realizar un análisis para una tasa de 1 fotograma por segundo y una resolución vectorial de 16x16 píxeles. Como autor, en base a los estudios realizados, se recomienda que la tasa de fotogramas sea tal que el movimiento descrito sea claramente observable entre fotogramas consecutivos. A modo de criterio se establece que las distancias observables no superen un orden de magnitud respecto al orden en que se esté trabajando. Las distancias registradas en este estudio graban áreas en orden de metros y las distancias medidas entre fotogramas en este caso fueron aproximadamente de 60 centímetros entre cada imagen.

Es importante mencionar que la velocimetría de partículas en imágenes, requiere como su nombre lo indica, partículas a las cuales hacer seguimiento. Estas “partículas” pueden ser distintos elementos en suspensión en el agua o elementos a los cuales se pueda realizar seguimiento, por ejemplo; hojas, ramas o como en el presente estudio, espuma. En función de lo anterior, se debe decir que para la correcta aplicación del método debe existir suficiente correlación entre las imágenes analizadas. Una forma de incrementar los elementos a los cuales hacer seguimiento es emplear un análisis por bandas para resaltar partículas en suspensión. Se demuestra que empleando las bandas verde y roja es posible resaltar el sedimento en suspensión e incrementar el conteo de vectores obtenidos, trazando un campo de velocidades en áreas superiores, esto puede ser útil si no se tienen elementos bien definidos para hacer seguimiento. Por lo tanto, para estudios posteriores se recomienda hacer uso en particular de la banda verde por sobre la roja si se quiere hacer un seguimiento del sedimento en suspensión, al menos para escalas similares. En este sentido se observa que para la metodología aplicada el índice NDTI no tiene un desempeño positivo dado que se pierde correlación entre las distintas imágenes, por lo tanto, no se recomienda aplicar este espectro de manera segura o sin comprobar antes que exista una buena correlación entre fotogramas.

Finalmente, la metodología PIV se ajusta correctamente a la naturaleza de esta investigación y el programa PIVlab (Thielicke, W. & Sonntag, 2021) utilizado en el presente estudio es una herramienta capaz de obtener las velocidades en ambientes estuarinos, sin embargo, se debe tener presente que existen otros métodos basados en imágenes que no fueron probados en esta investigación (Koutalakis et al., 2019).

10 Referencias

- Adrian, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 39(2), 159–169. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0991-7>
- Akoglu, H. (2018). User's guide to correlation coefficients. *Turkish Journal of Emergency Medicine*, 18(3), 91–93.
- Bergeron, N. E., & Abrahams, A. D. (1992). Estimating shear velocity and roughness length from velocity profiles. *Water Resources Research*, 28(8), 2155–2158.
- Bouguet, J.-Y. (2022). *Camera Calibration Toolbox for Matlab (1.0)*. CaltechDATA. <https://doi.org/10.22002/D1.20164>
- Bruder, B. L., & Brodie, K. L. (2020). CIRN Quantitative Coastal Imaging Toolbox. *SoftwareX*, 12, 100582. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100582>
- Heikkila, J., & Silvén, O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, 1106–1112.
- Keane, R. D., & Adrian, R. J. (1992). Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied Scientific Research*, 49(3), 191–215. <https://doi.org/10.1007/BF00384623>
- Koutalakis, P., Tzoraki, O., & Zaimes, G. (2019). UAVs for Hydrologic Scopes: Application of a Low-Cost UAV to Estimate Surface Water Velocity by Using Three Different Image-Based Methods. *Drones*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/drones3010014>
- Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, C., Ndione, J. A., & Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
- MacCready, P., & Geyer, W. R. (2010). Advances in estuarine physics. *Annu. Rev. Mar. Sci*, 2(1), 35–58.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DECLARA SANTUARIO DE LA NATURALEZA HUMEDAL RÍO MAIPO. *Diario Oficial de la República de Chile*.
- Oceanographic Commission, I. (2015). *The International thermodynamic equation of seawater–2010: calculation and use of thermodynamic properties.[includes corrections up to 31st October 2015]*.
- Raffel, M., Willert, C. E., & Kompenhans, J. (1998). *Particle image velocimetry: a practical guide* (Vol. 2). Springer.
- Segalini, A., Örlü, R., & Alfredsson, P. H. (2013). Uncertainty analysis of the von Kármán constant. *Experiments in Fluids*, 54(2), 1–9.
- Shi, J. Z., Lu, L.-F., & Liu, Y.-N. (2010). The hydrodynamics of an idealized estuarine plume along a straight coast: a numerical study. *Environmental Modeling & Assessment*, 15(6), 487–502.

- Shi, J. Z., Luther, M. E., & Meyers, S. (2006). Modelling of wind wave-induced bottom processes during the slack water periods in Tampa Bay, Florida. *International journal for numerical methods in fluids*, 52(11), 1277–1292.
- Simpson, J. H., Brown, J., Matthews, J., & Allen, G. (1990). Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, 13(2), 125–132.
- Tauro, F., Porfiri, M., & Grimaldi, S. (2016). Surface flow measurements from drones. *Journal of Hydrology*, 540, 240–245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.012>
- Tazioli, A. (2011). Experimental methods for river discharge measurements: comparison among tracers and current meter. *Hydrological Sciences Journal*, 56(7), 1314–1324.
- Thielicke, W. & Sonntag, R. (2021). *Particle Image Velocimetry for MATLAB*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5334/jors.334>
- Von Kármán, T. (1930). Mechanische ähnlichkeit und turbulenz. *Math.-Phys. Klasse*.