

CUANTIFICACIÓN DE CAUDALES EN EL RÍO PISCO-PERÚ MEDIANTE MODERNAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Horacio Herrero^{1,2}, Antoine Patalano^{1,2}, José Manuel Díaz Lozada¹ C. Marcelo García^{1,2}

¹Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

Email.: hsherrero@yahoo.com.ar

RESUMEN

La cuenca del río Pisco es una importante cuenca superficial de 4434,6 km² ubicada en la región sur-central del Perú que pertenece a la vertiente pacífica del país. En la actualidad, el crecimiento de la región requiere una mayor disponibilidad de agua, para lo cual una alternativa existente es efectuar un transvase de volúmenes excedentes del río Pisco a los sectores donde sean requeridos. Para llevar a cabo este trabajo es necesario efectuar un estudio de balance hídrico en la cuenca, que requiere información hidrométrica de los caudales superficiales del río en diferentes épocas del año. Debido a esto, se decidió realizar una serie de aforos con el objeto de registrar la información de caudales necesaria para realizar el estudio. Las condiciones hidráulicas y sedimentológicas del escurrimiento en la zona de estudio representan un desafío para la implementación de las técnicas de medición disponibles en la actualidad. La cuantificación de caudales se realizó mediante el empleo de dos modernas técnicas de medición: perfilador de corriente acústico Doppler (o ADCP por sus siglas en inglés), y velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (o LS-PIV por sus siglas en inglés).

ABSTRACT

The Pisco river basin, located in the south-central region of Perú, is an important basin with an area of 4434.6 km² in the Pacific basin of the country. Currently due to the important growth of the region, more water availability is necessary. There is an alternative project to transfer the water excess volumes of Pisco River to regions where the water is required. In this regard, a water balance is being performed. The water balance requires hydrometric information of river flow in several times of the year. Hydraulic and sedimentological flow conditions existing in the study area represent a challenge to the implementation of the measurement techniques available nowadays to quantify flow discharge in rivers. Thus, measurement modern techniques were implemented in this work (i.e. Acoustic Doppler Current Profilers – ADCP and Large Scale Particle Image Velocimetry LS-PIV) to quantify the flow in different seasons of the year.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Pisco (figura 1) (ubicada en los paralelos $12^{\circ} 52'$ y $13^{\circ} 48'$ de latitud sur y los meridianos de $75^{\circ} 02'$ y $76^{\circ} 13'$ de longitud oeste), es una importante cuenca superficial de $4434,6 \text{ km}^2$ ubicada en la región sur-central del Perú (provincias de Pisco y Castrovirreyna) que pertenece a la vertiente del océano pacífico (la cuenca del pacífico ocupa 22% del área total del país). El río Pisco, principal río de la cuenca, presenta un régimen de caudales muy irregular, con importantes caudales en época estival y caudales muy bajos en época de estiaje. Es por ello que existen en la cuenca seis reservorios que permiten regular el caudal del río durante todo el año. En la actualidad, el crecimiento de la región requiere una mayor disponibilidad de agua, para lo cual una alternativa existente es efectuar un transvase de volúmenes excedentes del río Pisco a los sectores que sean necesarios. Es por ello, que se está llevando a cabo un estudio de balance hídrico en la cuenca, mediante el cual, conociendo la demanda existente y los volúmenes excedentes del río junto a su distribución temporal, se podrá definir el diseño del sistema de transvase para transvasar los caudales excedentes para su aprovechamiento en otras áreas de la región.

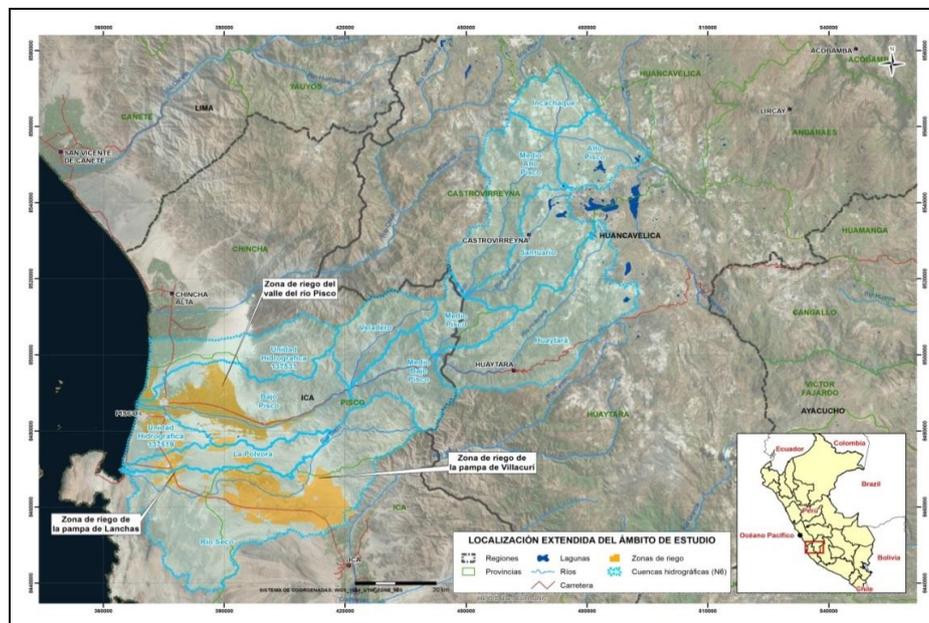


Figura 1.- Cuenca del río Pisco

Para llevar a cabo el estudio de balance hídrico se requiere información histórica de caudales. En la actualidad en la cuenca existen 4 secciones de aforos que son mantenidas por la ANA y el SEHNAMI (figura 2):

- Estación Letrayoc Puente La Quinga
- Estación Letrayoc Km 50
- Estación Letrayoc – San Vicente
- Estación Letrayoc – Junta de Usuarios

La estación del Puente La Quinga, en un inicio, estaba equipada con un limnógrafo y una regla/mira limnimétrica. Adicionalmente, en el año 2000 se implementó la estación con un sensor de niveles de agua marca SUTRON, sin embargo funcionó pocos años porque en el año

2004, la radio transmisión del equipo de sensor de niveles fue sustraída por desconocidos. De igual manera el limnógrafo dejó de funcionar en el año 2012, a causa de que una avenida golpeó el vaso reductor de tubo limnimétrico dejándolo inoperativo. El cauce central del río Pisco en esta ubicación cambia de posición con el pasar del tiempo, hay años que el curso de agua circula por el medio y otros años el agua circula por la derecha y a su vez trae abundantes gravas y piedras grandes. Actualmente el operador de la estación realiza lectura de nivel de agua en la mira que se encuentra en el tubo limnimétrico y con ayuda de una cinta métrica, registra el nivel de agua cuatro veces al día tanto en épocas de avenida como en épocas de estiaje. El aforo con correntómetro se realiza una vez al mes. La lectura del nivel de agua se envía semanalmente a la oficina de SENAMHI Ica (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) para su procesamiento con fines de obtener el caudal diario del río Pisco. A la altura del Km. 50 de la carretera Los Libertadores existía otra estación hidrométrica Letrayoc que funcionó hasta el año 1980. La estación fue destruida en el mes de febrero con la avenida del río Pisco a causa de la ocurrencia del fenómeno del Niño.

La estación San Vicente está ubicada aguas abajo del puente La Quinga y aguas arriba del centro poblado de Letrayoc, contigua a la carretera Los Libertadores Wari. Esta estación hidro-meteorológica está implementada con modernos equipos de medición, sin embargo el funcionamiento es parcial.

La estación en el poblado de Letrayoc inició su registro de mediciones en el año 1922, sin embargo no se conoce qué entidad inició la operación de la estación. Si bien es cierto hay datos de caudales medios diarios en formato digital en los archivos de la Junta de Usuarios de Pisco desde 1933, a la fecha no ha sido posible establecer con certeza si la estación estaba implementada con limnógrafo y/o regla.



Figura 2.- Estaciones de medición

A pesar de la existencia de registros históricos de caudales en estas estaciones, para llevar a cabo correctamente el estudio de balance hídrico, es necesario realizar una serie de aforos estacionales con el objetivo de incrementar la información hidrológica existente. Las condiciones hidráulicas y sedimentológicas del escurrimiento en la zona de estudio representan un desafío para la implementación de las técnicas de medición disponibles en la actualidad. Para realizar esta tarea se emplearon dos modernas técnicas de medición: perfilador de corriente acústico Doppler (o ADCP por sus siglas en inglés), y velocimetría por imágenes

de partículas a gran escala (o LS-PIV por sus siglas en inglés). Los instrumentos y metodologías utilizadas para los aforos referenciales.

OBJETIVO

El objetivo del trabajo experimental, que se presenta en este artículo es realizar una serie de aforos en el río Pisco utilizando modernas técnicas de medición (ADCP y LS-PIV) con el objetivo de incrementar la información hidrológica existente en el sistema.

INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS UTILIZADOS

Perfilador de Corriente Acústico Doppler

El instrumento utilizado en las mediciones es un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) “River Surveyour M9” (número de serie M903858) fabricado por la compañía YSI/Sontek. Las características técnicas de este instrumento se presentan en la tabla 1. Para su utilización, el instrumento se instaló en una plataforma móvil que se muestra en la figura 3.

Tabla 1. Características técnicas del instrumento utilizado

River Surveyour M9	
Medición de Velocidad	
- Rango de profundidad	6 cm a 40 m
- Rango de velocidad	± 20 m/seg
- Precisión	± 0.25%
- Resolución	0.001 m/seg
- Número de celdas	Hasta 128
- Tamaño de celda	2 cm a 4 m
Configuración del transductor	
	Nueve (9) transductores en total.
	- 8 haces (4 de 3.0MHz + 4 de 1.0MHz) Janus inclinados un ángulo de 25°.
	- 1 haz vertical de 0.5 MHz.
Medición de profundidad	
- Rango	20 cm a 80 m
- Precisión	1 %
- Resolución	0.001 m
Medición de caudal	
- Rango con seguimiento de fondo (Bottom Track)	30 cm a 40 m
- Cálculos	Internos



Figura 3. ADCP M9 montado en la plataforma móvil

Velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (LS-PIV)

Para la toma de imágenes necesaria en este ensayo, se ha utilizado una cámara de video comercial modelo GoPro Hero 4 Black Edition. No es necesario ningún otro equipo específico para la realización de este ensayo.

Metodología experimental utilizada

Metodología para la técnica ADCP

En los casos de mediciones de caudal desde plataformas móviles (como por ejemplo la utilizada en este estudio, ver figura 3, la estrategia de muestreo espacial y temporal actualmente recomendada por el Servicio geológico de los Estados Unidos - USGS para la determinación del caudal medio en ríos y canales, consiste en realizar múltiples transectas (cruces) en pares recíprocos. En cada transecta se obtienen datos en tiempo real vía bluetooth de la geometría de la sección (área, ancho de boca, profundidad media), de la distribución de la velocidad del flujo en la sección, y por lo tanto del caudal (ver figura 4). Los valores de caudales reportados en este informe corresponden al promedio de las transectas realizadas en cada sección. Para estimar los caudales en las regiones no medidas del flujo en la parte superior (debido a la sumergencia del instrumento) e inferior (citada anteriormente) se ajustó una ley potencial de velocidades sobre todo el perfil de velocidades (exponente = 1/6). Por otra parte los caudales no medidos en la margen derecha e izquierda se estimaron utilizando el método recomendado por el software para márgenes con pendientes.

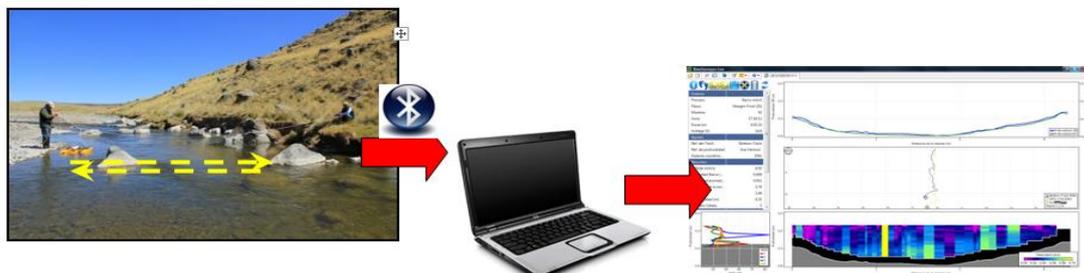


Figura 4. Metodología utilizada para la adquisición de datos.

En los casos que los niveles de turbulencia del río y la concentración de sedimentos lo permitieron, se utilizó como sistema de referencia para evaluar la posición de la plataforma móvil el método de seguimiento del fondo (“Bottom Track”). En condiciones con elevada carga de sedimentos en los que no fue posible implementar este sistema de referencia, la metodología adoptada para la determinación del caudal consistió en realizar mediciones puntuales de velocidad media y profundidad en distintas localizaciones a lo largo de la sección transversal (de manera similar al método de aforo por vadeo). El valor del caudal total se obtuvo sumando los valores parciales de caudales medidos en cada localización. La ubicación del instrumento en cada punto se determinó mediante el uso de una estación total. La ventaja de utilizar un ADCP es que con este instrumento se obtienen valores de velocidad a lo largo el perfil del flujo, a diferencia de instrumentos convencionales como es el caso del molinete hidrométrico en el cual se obtiene un solo valor puntual de velocidad en toda la profundidad.

Metodología para la técnica LS-PIV

La técnica remota de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV, por sus siglas en inglés) permite la cuantificación de caudal, preservando la seguridad del personal y la fiabilidad de las mediciones (Hauet et al. 2006 y Muste et al. 2008). La metodología experimental recomendada para la implementación de la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) convencional, requiere tres etapas: iluminación, grabación de imágenes y procesamiento de imágenes. Teniendo en cuenta que la técnica implementada a gran escala (LSPIV), cubre una mayor área grabando imágenes desde un ángulo oblicuo a la superficie, es necesario un paso adicional: la rectificación de los resultados (Patalano et al. 2014). La metodología experimental recomendada para la medición con LSPIV, es la siguiente:

- Visualización del flujo, iluminación y registro de videos: por definición la técnica de velocimetría se basa en la suposición que en el flujo de agua observado se encuentren partículas, “trazadores”, que se desplazan a la misma velocidad que el flujo. En el campo, los trazadores naturales en la superficie de los ríos pueden ser escombros, ramas de árboles, espuma, o como en este informe, las irregularidades de la superficie debidas a la eclosión de las estructuras coherentes. La ubicación de la cámara se elige de tal manera que se minimice la deformación de las imágenes a causa de su posición oblicua.
- Procesamiento de las imágenes: luego de extraer las imágenes a escala de grises del video, éstas se procesan con la herramienta de Matlab “PIVlab” (Thielicke and Stamhuis 2014) , que permite calcular el campo de velocidad a partir del procesamiento de pares de imágenes. El algoritmo utiliza correlación cruzada directa para determinar el desplazamiento de las irregularidades de la superficie entre una imagen y la siguiente.
- Pos-procesamiento: luego del procesamiento de toda la serie de imágenes, los resultados obtenidos son desplazamientos distorsionados en [pixel/par de imagen]. Para la rectificación de los resultados, los mismos son exportados al segundo programa “RIVeR” (Patalano et al. 2015). Para ello, se requieren las coordenadas de por lo menos 4 puntos de control en la zona de estudio. Con esto se puede rectificar, los resultados de desplazamientos instantáneos y promedios.

El caudal se obtiene integrando el producto de la velocidad del flujo por el área de escurrimiento

LOCALIZACIÓN DE LAS SECCIONES DE MEDICIÓN

Las mediciones con las técnicas mencionadas anteriormente se realizaron en los sitios de puente La Quinga, donde el SENAMHI realiza las mediciones de caudal y el poblado de Letrayoc en donde realiza aforos la ANA. De este modo se podrán comparar los resultados obtenidos con las diferentes series históricas.

RESULTADOS

Aforo del día 29/01/2015

Sección Puente La Quinga

En la sección de Puente la Quinga el día 29/01/2015 (ver figura 5) se realizó un aforo con ADCP, mediante mediciones puntuales de velocidad y profundidad en 11 localizaciones a lo largo de la sección transversal. Como resultado de estas mediciones, se observa en la figura 6,

la batimetría de la sección transversal y las velocidades medias del flujo en cada localización. Luego, integrando los valores de área y velocidad se obtiene un caudal de 57 m³/s. La lectura de la escala del nivel del río en Puente la Quinga fue 1.35m



Figura 5. Aforo de caudal en sección Puente la Quinga – 29/01/2015

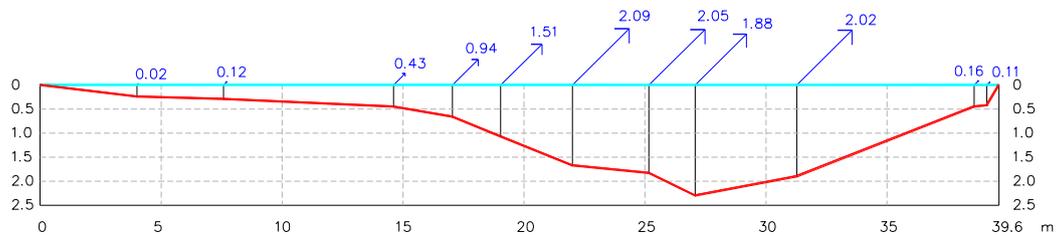


Figura 6. Sección transversal Puente La Quinga – 29/01/2015. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda del río

Sección Letrayoc

En la sección de Letrayoc el día 29/01/2015 (ver figura 7) se realizó, al igual que en Puente La Quinga, un aforo con ADCP mediante mediciones puntuales de velocidad y profundidad en 10 localizaciones a lo largo de la sección transversal. Como resultado de estas mediciones, se observa en la figura 8 la batimetría de la sección transversal y las velocidades medias del flujo en cada localización. Luego, integrando los valores de área y velocidad se obtiene un caudal de 47.2 m³/s.



Figura 7. Aforo de caudal en sección Letrayoc – 29/01/2015

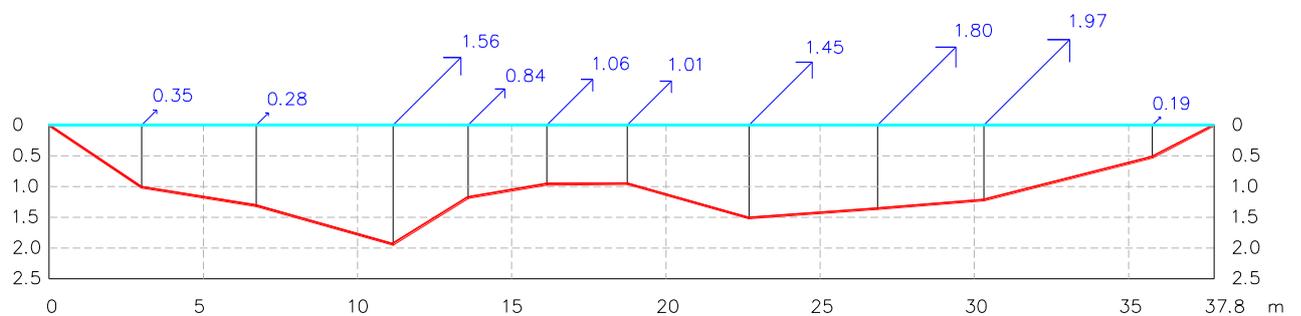


Figura 8. Sección transversal Letrayoc – 29/01/2015. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda del río.

Aforo del día 23/04/2015

Sección Puente La Quinga

En la sección de Puente la Quinga el día 23/04/2015 (ver Figura 9 se realizó un aforo con ADCP. Como resultado del procesamiento de los datos registrados por el ADCP, se observa en la Figura 10 la batimetría y el campo de velocidades de la sección aforada. Luego, el valor del caudal obtenido fue de 24.3 m³/s. La lectura de la escala del nivel del río en Puente la Quinga fue 0.55 m



Figura 9. Condición hidrológica en sección Puente La Quinga – 23/04/2015

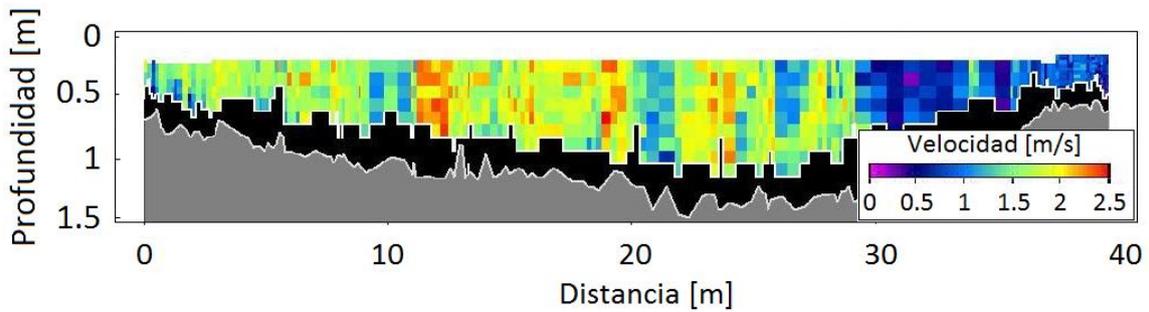


Figura 10. Batimetría y campo de velocidades en sección Puente La Quinga – 23/04/2015

Sección Letrayoc

En la sección de Letrayoc el día 23/04/2015 (ver Figura 11) se realizó un aforo con LS-PIV y con ADCP. La batimetría a lo largo de la línea de trazo rojo mostrada en la Figura 12, se obtuvo de los datos del día 23/04/2015, modificando la elevación del pelo de agua de acuerdo a la lectura del nivel del río registrada en la escala del puente. Como resultado del procesamiento de estas imágenes, se observa en la Figura 13 el campo de velocidades superficiales de la región capturada por el video. Luego, el valor del caudal obtenido fue de 20.3 m³/s.

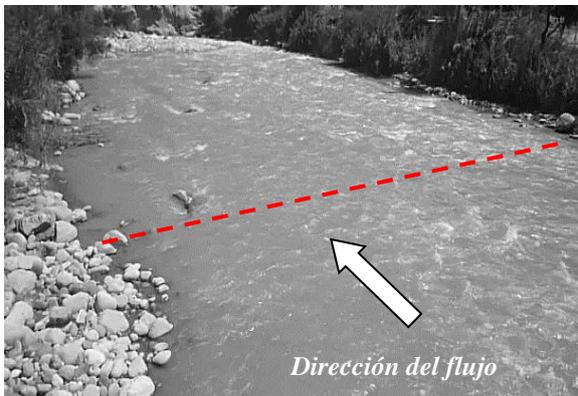


Figura 11. Condición hidrológica en sección Letrayoc – 23/04/2015

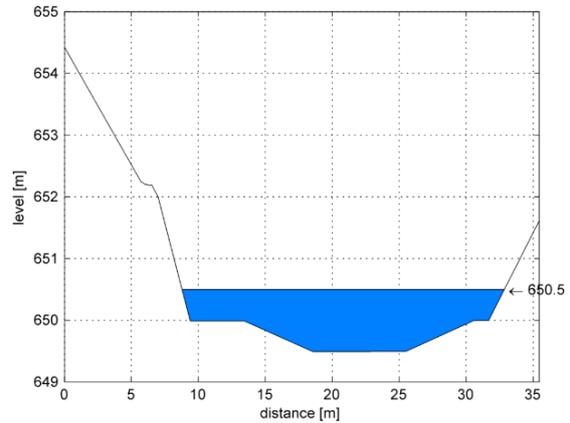


Figura 12. Batimetría y nivel del río en sección Letrayoc – 23/04/2015

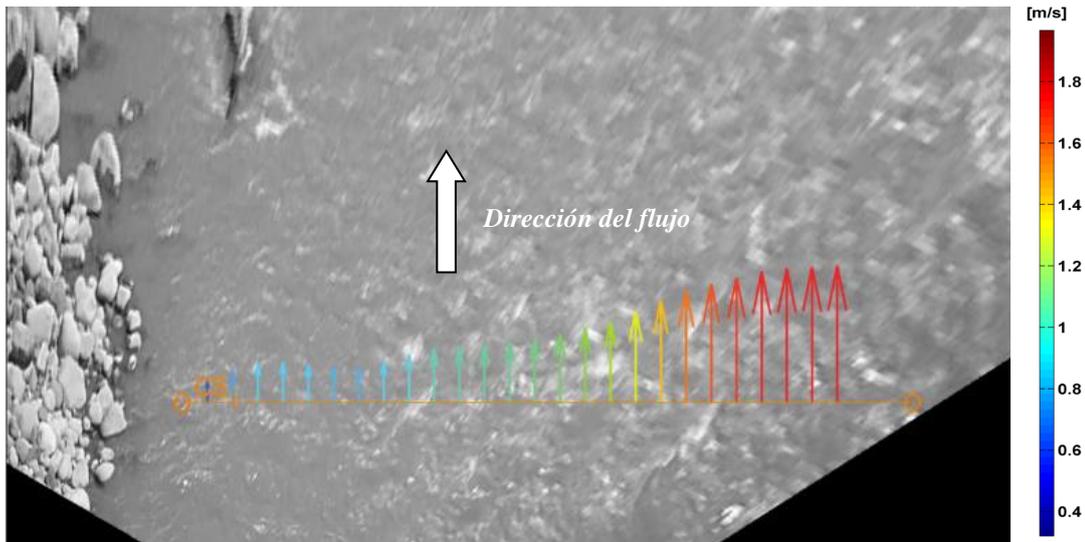


Figura 13. Imagen rectificada y velocidades superficiales en sección Letrayoc – 23/04/2015

Como resultado del procesamiento de los datos registrados por el ADCP, se observa en la Figura 14 la batimetría y el campo de velocidades de la sección aforada. Luego, el valor del caudal obtenido fue de 21.4 m³/s.

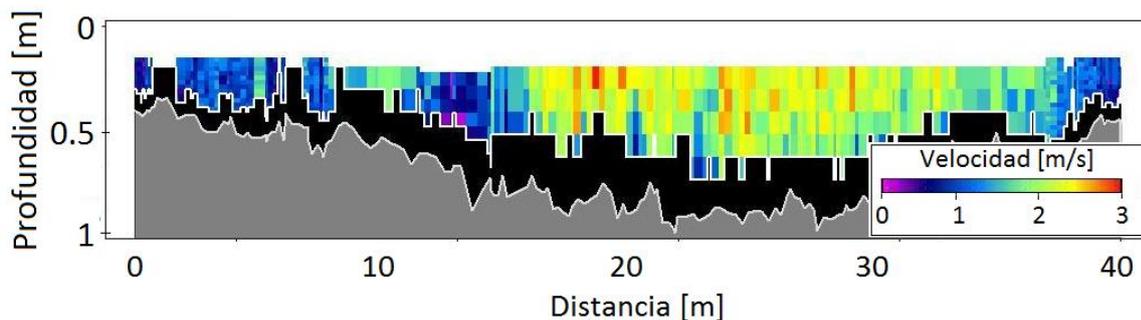


Figura 14. Batimetría y campo de velocidades en sección Letrayoc – 23/04/2015

CONCLUSIONES

La cuantificación de los caudales superficiales en el río Pisco mediante modernas técnicas de medición fue una tarea fundamental necesaria para poder llevar a cabo el balance hídrico. Las condiciones hidráulicas y sedimentológicas del escurrimiento en la zona de estudio representan un desafío para la implementación de las técnicas de medición disponibles en la actualidad. A pesar de que el ADCP presenta resultados muy precisos en la cuantificación de caudales, en ríos con alta carga de sedimentos el ADCP sin GPS presenta dificultades para realizar mediciones desde plataformas móviles. Es por ello que alternativamente, pueden realizarse aforos con ADCP de forma estacionaria, lo cual requiere conocer la posición exacta del ADCP en cada punto con el riesgo existente (en periodos de crecida) de que algún elemento (rama, roca, basura) golpee el equipo provocándole serios daños. La técnica LS-PIV se presenta como una alternativa innovadora de bajo costo con errores relativos bajos respecto a las mediciones con ADCP que permite realizar aforos de manera rápida y sencilla, presentando como única desventaja que debe relevarse posteriormente la batimetría del lecho para poder obtener el caudal.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a UNOPS (Oficina de las Naciones Unidas de Servicios para Proyecto), sin la cual este trabajo no hubiese sido posible

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hauet, A. (2006). “Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière Large-Scale Particle Image Velocimetry.” Institut National Polytechnique De Grenoble, LTHE, UMR 5564, CNRS-INPG-IRD-UJF.

Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A. (2008). “Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments.” *Water Resources Research*, 44, 1–14.

Patalano, A., García, C. M., Guillén, N., García, C., Díaz, É., Rodríguez, A., and Ravelo, A. (2014). “Evaluación Experimental De La Técnica De Velocimetría Por Seguimiento De Partículas A Gran Escala Para La Determinación De Caudales En Ríos Serranos.” *Aqua-LAC UNESCO*, 6, 17–24.

Patalano, A., García, C. M., Brevis, W., Guillén, F. N., Moreno, L., and Rodríguez, A. (2015). “Recent advances in Eulerian and Lagrangian Large-Scale Particle Image Velocimetry.” 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands.

Thielicke, W., and Stamhuis, E. J. (2014). “PIVlab – Towards User-friendly , Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB.”
