

Elaboración de un método para levantamientos batimétricos en cuerpos de agua superficiales continentales mediante el uso de una ecosonda de bajo costo.

P. Salazar Hernández¹, D. Caamaño Avendaño², A. García-Lancaster³

Resumen

Los levantamientos batimétricos de alta calidad en aguas superficiales continentales son un requisito común para diferentes aplicaciones en ingeniería hidráulica. Por esto se han desarrollado métodos de teledetección mediante imágenes multiespectrales o LIDAR aéreos. Si bien estas tecnologías ofrecen alta densidad de datos con buena precisión, corresponden a alternativas de alto costo que hacen complejo su uso masivo. Por lo tanto, con el objetivo de buscar un método de bajo costo es que se indaga la oferta del mercado y se diferencian una serie de ecosondas con diferentes prestaciones adecuadas para un levantamiento batimétrico. Entre estos equipos se encuentra el Deeper, correspondiente a una ecosonda, diseñada para la pesca deportiva, que ofrece la batimetría en tiempo real en un formato de despliegue sencillo y de fácil uso. Se adquiere uno de estos sensores y se realizan diferentes levantamientos batimétricos con el fin de comparar la información recopilada con datos levantados mediante GPS-RTK. Los resultados muestran buenas aproximaciones del fondo del río en aquellas zonas donde el GPS integrado de la ecosonda puede captar buena señal, y en aquellos segmentos del río en que las velocidades del flujo no distorsionan la superficie del agua evitando los movimientos pendulares de la ecosonda. Los datos se utilizan para comparar modelaciones hidráulicas encontrándose diferencias poco significativas, menores al 2%, con lo cual es posible implementar un protocolo de medición con la ecosonda para levantamientos batimétricos, limitado a modelos unidimensionales de flujo estacionario.

Palabras claves: Batimetría, Aguas superficiales Continentales, Ecosonda

Abstract

High quality bathymetric surveys of inland surface waters are a common requirement for different applications in hydraulic engineering. For this reason, remote sensing methods using multispectral imaging or airborne LIDAR have been developed. Although these technologies offer high data density with good accuracy, they correspond to high-cost alternatives that make their massive use complex. Therefore, in order to find a low-cost method, the market offer was investigated and a series of echo sounders with different features suitable for a bathymetric survey were differentiated. Among this equipment is the Deeper, corresponding to an echo sounder, designed for sport fishing, which offers real-time bathymetry in a simple and easy to use deployment format. One of these sensors is acquired and different bathymetric surveys are carried out in order to compare the information collected with

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, psalazar@ing.ucsc.cl

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcamano@ucsc.cl

³ Gerente OITEC Hidráulica y Medio Ambiente, Concepción, Chile, agarcia@oitec.cl.

data collected in a traditional way using GPS-RTK. Results show good approximations of the river bottom in those areas where the integrated GPS of the echo sounder can pick up a good signal, and in those segments of the river where the flow velocities do not distort the water surface avoiding the pendular movements of the echo sounder. The data are used to compare hydraulic modeling, finding insignificant differences, less than 2%, making it possible to implement a measurement protocol with the echo sounder for bathymetric surveys, limited to one-dimensional models of stationary flow.

Keywords : Bathymetry, Inland surface waters, Echo sounding.

Introducción

La batimetría se define como la caracterización de las profundidades ya sean marinas, de cursos de aguas, de lagos o embalses, en el cual se realiza un levantamiento de relieve de superficies subacuáticas (Ferreira et al., 2022). La finalidad de la batimetría es la obtención de las coordenadas (x, y, z) de todos los puntos del fondo. Generalmente se trabaja con la ubicación geográfica de un punto en UTM Norte y Este, y la profundidad asociada a un nivel de referencia vertical (i.e. nivel medio del mar, nivel de reducción de sonda, plano topográfico local).

La ejecución de trabajos batimétricos e hidrográficos puede abordarse en estos momentos mediante una gran variedad de métodos. Los sistemas de adquisición de datos y, en consecuencia, los métodos de trabajo, han registrado recientemente importantes cambios, sobre todo derivados de cuanto se refiere al equipamiento electrónico. En función de los objetivos, determinados sistemas resultan más adecuados, sobre todo por la precisión y fiabilidad requeridas. La evolución y desarrollo del equipamiento electrónico está llevando a la integración de equipos, con la consiguiente simplificación de operaciones y reducción de los costos (Ferreira et al., 2022). Los costos asociados se indican en el anexo 1.

Los datos topográficos precisos del lecho del río y de la planicie de inundación son elementos cruciales en los modelos hidrodinámicos. Los mapas batimétricos detallados de las masas de agua superficiales continentales son esenciales para simular la dinámica de los flujos y evaluar el riesgo de inundaciones (Conner & Tonina, 2013; Gichamo et al., 2012), predecir el transporte de sedimentos y la evolución morfológica de los cauces (Manley & Singer, 2008; Nitsche et al., 2007; Snellen et al., 2011), y el seguimiento de los hábitats de los arroyos (C. J. Brown & Blondel, 2009; Strayer et al., 2006; Walker & Alford, 2016). Mientras que las áreas expuestas de la llanura de inundación pueden ser monitoreadas directamente desde los estudios aéreos, la topografía del lecho del río no es directamente observable por estos métodos aéreos o espaciales (Alsdorf et al., 2007). Por lo tanto, existe una deficiencia global generalizada en mediciones de batimetría de ríos y lagos. Dentro del espectro electromagnético, las longitudes de onda visibles tienen la mayor transmitancia atmosférica y la menor atenuación en el agua. Por lo tanto, las imágenes de teledetección de satélites, como Landsat (Liceaga-Correa & Euan-Avila, 2002), QuickBird (Lyons et al., 2011), WorldView-2 (Hamyton et al., 2015; Lee et al., 2011), y aviones (Carbonneau et al., 2006), se han utilizado para levantar la batimetría de las masas de agua interiores. Sin embargo, la batimetría sólo puede derivarse de imágenes ópticas cuando el agua es muy clara y poco profunda, el sedimento es comparativamente homogéneo, y las condiciones atmosféricas son favorables (Legleiter et al., 2009; Lyzenga, 1981; Lyzenga et al., 2006; Overstreet & Legleiter, 2017).

Por lo tanto, las aplicaciones de la teledetección se limitan a ríos poco profundos con lechos de grava, en los que la profundidad del agua es del orden de la profundidad de Secchi (profundidad a la que un disco de Secchi ya no es visible desde la superficie). Del mismo modo, los LiDAR aerotransportados que funcionan con una longitud de onda verde pueden aplicarse para obtener mapas de batimetría (Bailly et al., 2010; Legleiter, 2012), pero también este método está limitado por la turbidez del agua, que restringe severamente la profundidad máxima a generalmente 2-3 veces la profundidad de Secchi.

Debido a las limitaciones de la teledetección por satélite o por avión, para obtener secciones transversales batimétricas precisas de los canales fluviales se necesitan estudios de campo. Se han realizado algunas pruebas preliminares utilizando una longitud de onda verde ($\lambda = 532 \text{ nm}$) para el escaneo láser terrestre (TLS) para la exploración de zonas sumergidas (Smith et al., 2012; Smith y Vericat, 2014). Sin embargo, el TLS adolece de limitaciones similares a las del LIDAR. Además, los ángulos de exploración oblicuos del TLS hacen que los efectos de refracción sean más problemáticos (Woodget et al., 2015) y disminuyen los retornos desde el fondo mientras que aumentan los retornos de la superficie del agua (Bangen et al., 2014). Por lo tanto, los estudios de campo se realizan normalmente utilizando sonares de barrido de un solo haz o multihaz transportados en embarcaciones tripuladas o, más recientemente, en botes no tripulados (H. C. Brown et al., 2010; H. Ferreira et al., 2009; Giordano et al., 2015). Sin embargo, las embarcaciones no pueden emplearse a lo largo de ríos no navegables y requieren una profundidad de agua suficiente para la navegación. Para superar estas limitaciones, se evalúa un nuevo método operativo para estimar la batimetría fluvial en ríos. Esta nueva técnica consiste en el uso de una ecosonda flotante y de bajo costo (fabricada para la pesca deportiva), con el objetivo de elaborar y verificar una metodología para realizar levantamientos batimétricos en cuerpos de agua superficiales continentales y generar un correspondiente protocolo de medición.

El dispositivo usado para el levantamiento batimétrico es la ecosonda para la pesca, Deeper Smart Sonar (modelo CHIRP), desarrollado por la empresa Deeper UAB, tiene un coste en el mercado de 300 mil pesos chilenos aproximadamente. Sus características técnicas se comparan con otro dispositivo de la misma marca que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las ecosondas.

	Deeper Smart Sonar Pro	Deeper Smart Sonar CHIRP+
Tamaño (diámetro)	6,5 cm	6,5 cm
Peso	92g	90g
Conexión	Wi-Fi	Wi-Fi
Rango	100m	100 m
Temperatura	-20°C a 40°C	-20°C a 40°C
Batería	Li-Poly 3,7V recargable	Li-Poly 3,7V recargable
Frecuencia	290 kHz (15°), 90 kHz (55°)	675 kHz (7°), 240 kHz (20°), 100 kHz (47°)
Velocidad de Barrido	15 pulsaciones/s	15 pulsaciones/s

Se elige la ecosonda Deeper CHIRP+ ya que posee mayor precisión al tener un ángulo de haz menor (7°).

La ecosonda usa Wi-Fi para conectarse a un teléfono inteligente o tablet, lo que permite una conexión inalámbrica en rangos de hasta 100 - 120 m. Esta ecosonda viene integrada con tres frecuencias de 675 kHz, 240kHz, 100 kHz, con ángulos de haz de 7°, 20° y 47°, respectivamente y una mínima distancia de profundidad de sondaje de 30 cm.

Los datos recogidos por la sonda se van digitalizando en la aplicación proporcionada por el fabricante (www.fishdeeper.com) haciendo posible su visualización en tiempo real. En la Figura 1 se muestra un esquema del funcionamiento de la sonda.

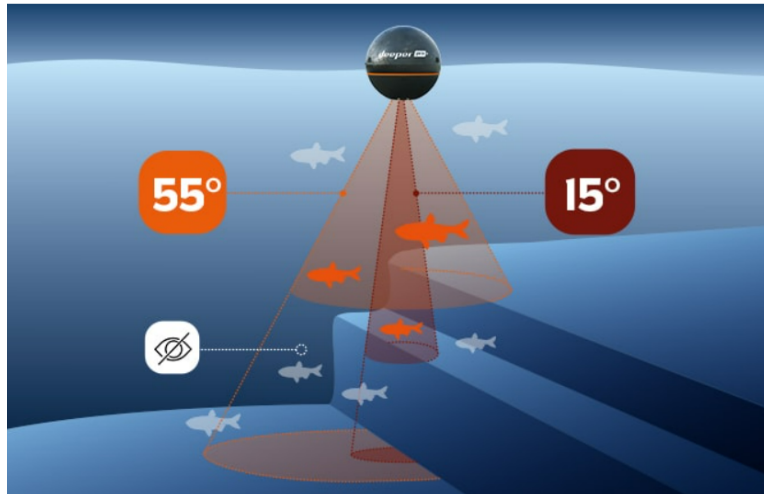


Figura 1. Esquema del funcionamiento del eco de la sonda (fuente www.fishdeeper.com)

La ecosonda registra el tiempo que transcurre desde que un impulso sonoro es emitido desde la sonda y recogido nuevamente por ella tras reflejar en el fondo. Se basa en el principio de que todo sonido producido cerca de la superficie del agua se refleja en el fondo y vuelve a la superficie como un eco. Como la velocidad del sonido es conocida (1483 m/s, dato proporcionado por el fabricante) el problema se reduce a medir el tiempo empleado en el doble recorrido.

Los sonares envían pulso de sonido para localizar objetos. El sonido viaja en ondas, y estas ondas se expanden en conos, haciéndose cada vez más amplias. Los sonares pueden controlar el rango del cono de onda de sonido cambiando la frecuencia de exploración. Esto es importante porque en la situación de escaneo serán más o menos efectivos. El escaneo amplio (generalmente de 40° a 60° de ángulo) es bueno para escanear rápidamente grandes áreas y obtener información general sobre la profundidad y la estructura del fondo, pero la precisión y los detalles serán menores, de la misma manera el escaneo de frecuencia baja es más adecuado para aguas más profundas. Esto significa que si se está escaneando con un ángulo de 47° a una profundidad de 3 m se verán objetos en un área que tiene un diámetro de 2,61 m, ver Figura 2.

El escaneo de frecuencia alta (alrededor de 7° a 20°) brinda una imagen más precisa, pero cubre un área más pequeña. Por lo tanto, la exploración de frecuencia alta también es más adecuada para aguas menos profundas, ya que el cono se extiende menos. Es por esto que para el levantamiento se utiliza el haz de frecuencia de 675 kHz (7°) ya que proporciona una mayor precisión batimétrica.

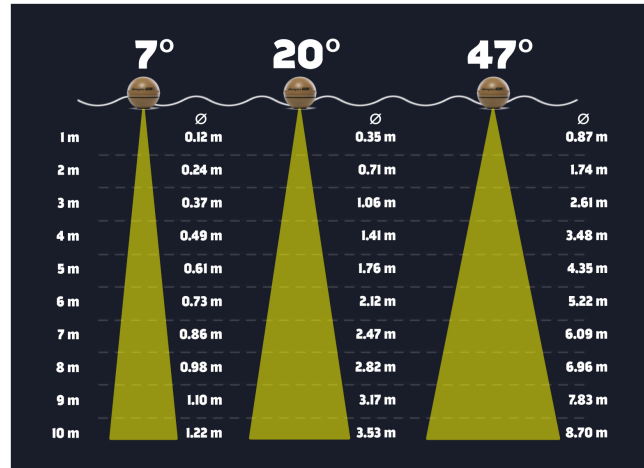


Figura 2. Área de sondeo con distintos ángulos de la ecosonda (fuente www.fishdeeper.com)

En cuanto al modelo CHIRP+ que es la abreviatura en inglés de "Impulso de radar de alta intensidad comprimido (Compressed High Intensity Radar Pulse)", se tiene que un sonar estándar emite una frecuencia individual. Debido a que la respuesta obtenida a partir de una frecuencia individual está limitada, la claridad y resolución de las imágenes del sonar también estarán limitadas. CHIRP envía un barrido continuo de frecuencias que abarca desde baja frecuencia hasta alta frecuencia, e interpreta estas frecuencias individualmente cuando se reciben las señales de retorno. Debido a este barrido continuo se proporciona un rango de información mucho más amplio, un sonar CHIRP+ puede crear imágenes claras y con resolución mayor producto de la combinación de las frecuencias.

Para verificar la precisión de la ecosonda (Deeper smart CHIRP+) y establecer un protocolo de medición se realizan levantamientos batimétricos de secciones transversales y una medición longitudinal, como se muestra en la Figura 3. La zona de estudio corresponde al Río Cruces en la localidad de Laraquete, comuna de Arauco, región del Bío Bío. Los datos batimétricos recogidos por la ecosonda se comparan con los obtenidos mediante el uso de un receptor GPS (Spectra Geospatial SP80 y SP60) generando dos geometrías a partir de las secciones transversales levantadas, para ser modeladas en el software HEC RAS, que corresponde a un software creado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers) disponible gratuitamente en el sitio del USACE. La herramienta posee una interfaz amigable para el usuario con módulos de geometría, flujo estacionario, no estacionario, mixto, transporte de sedimentos, calidad de agua, RAS Mapper y módulos para visualizar resultados (tablas y gráficos) (Manual HEC-RAS 6.3.1 1D, USACE 2022). En este estudio se comparan directamente las mediciones batimétricas y además los resultados de las modelaciones hidráulicas para ambos escenarios. Los cálculos de modelación se llevan a cabo en una dimensión de flujo estacionario para cada geometría cuyo caudal se obtiene de un fluviometro instalado en el río que proporciona un caudal de $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

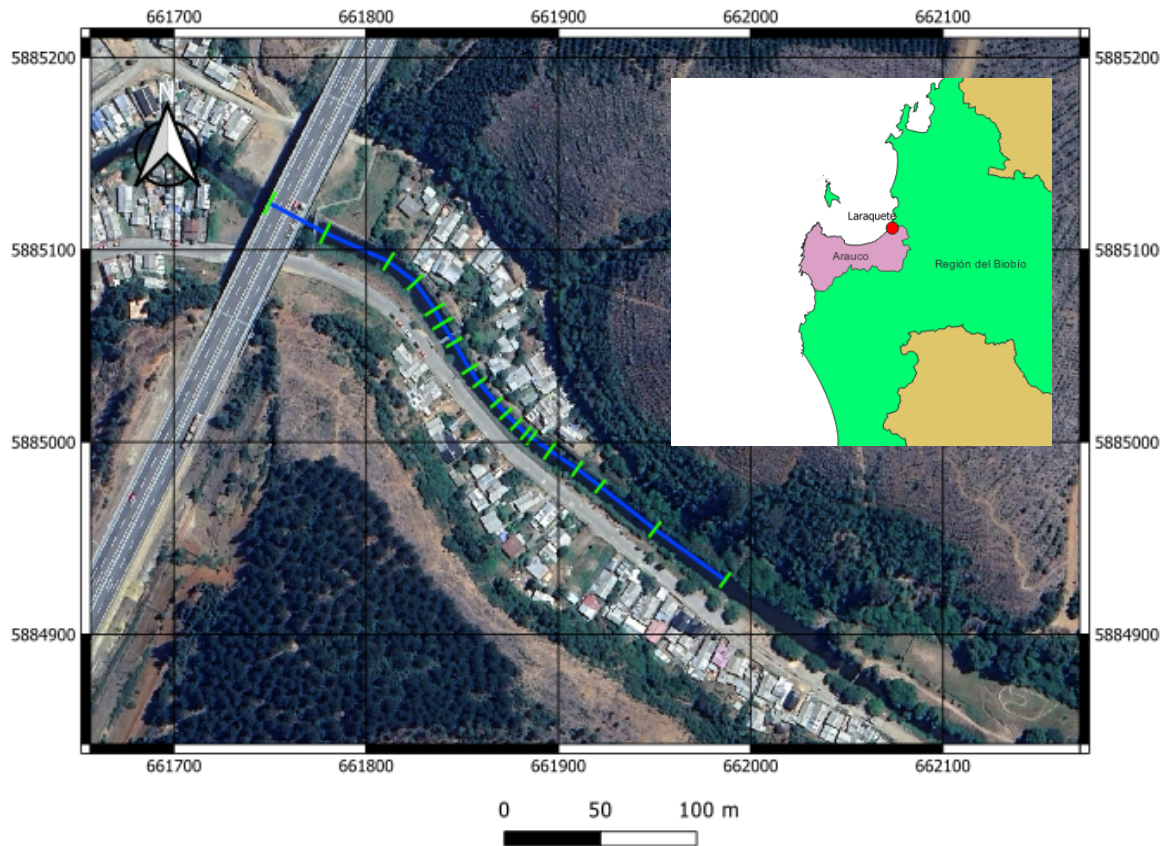


Figura 3. Zona de estudio y trazado de perfiles transversales en el Río Cruces, localidad de Laraquete, comuna de Arauco, Región del Bío Bío (fuente: elaboración propia).

Métodos

Levantamiento GPS

Para el levantamiento batimétrico se usó una base SP80 que transmite a una radio externa (Trimble Radio TDL 450H) conectada con una batería, con el fin de corregir la posición del receptor SP60 en tiempo real. Los datos del levantamiento se almacenan en la colectora para su posterior procesamiento por medio de la aplicación Survey Pro, luego los datos son exportados en formato .CSV a través de Bluetooth.

Protocolo de levantamiento

1. Se estaciona el receptor Base sobre un punto de coordenadas conocidas, este quedará fijo durante todo el proceso. El radio enlace que tiene transmite los datos captados de los satélites (datos de observación) por las ondas de radio al receptor móvil.
2. Una vez que el receptor Base se ha instalado y está transmitiendo datos mediante el radio enlace, se puede activar el móvil. El receptor móvil también tiene un radio enlace por donde

recibe la señal transmitida de la base, a la vez recibe los datos de los satélites directamente desde su propia antena.

3. Se empieza con el levantamiento, tomando la posición en los puntos de las secciones transversales del río. Todos los datos que recibe el Móvil se procesan en tiempo real para resolver las ambigüedades y obtener una posición muy precisa en relación con el receptor base. La precisión que indica la ficha técnica es en horizontal 8mm+ 1ppm, y vertical 15mm +1ppm

Ecosonda con GPS integrado

El levantamiento con la ecosonda consiste en hacer pasadas por las diferentes secciones transversales seleccionadas en el río (Figura 3), atada a una piola de polipropileno a una velocidad por debajo de los 1,6 m/s (como indica el fabricante) y programada con un ángulo de haz de 7° para mayor precisión. Con la aplicación Fish Deeper instalada en un celular, de sistema operativo Android, se registran y se suben a la nube, soportada por el mismo fabricante (www.fishdeeper.com), los datos obtenidos en el levantamiento batimétrico en el modo “pesca en la orilla”. Este modo implica que la planimetría (x, y) se obtiene a través del GPS integrado en la ecosonda. Para el escaneo del perfil longitudinal se usa el modo “barca”, el cual utiliza el GPS integrado en el celular. Los datos exportados aparecen en formato .CSV que contiene los valores de latitud, longitud, profundidad y una marca de tiempo. La marca de tiempo aparece en milisegundos que han transcurrido desde las 00:00:00 Tiempo Universal Coordinado (UTC) del jueves 1 de enero de 1970. (Hora UNIX) y es compatible con otras aplicaciones GIS. Por lo que es necesario en el post procesamiento de datos obtener las profundidades del rango de tiempo donde la ecosonda hace el recorrido por la sección transversal del río. Este rango se obtiene observando el tiempo en que la sonda parte el recorrido y luego es retirada del agua al terminar.

Protocolo de medición con ecosonda Deeper Smart CHIRP+

1. Materiales

Ecosonda Deeper smart CHIRP+
Piola de polipropileno o caña de pescar
Equipo para la pesca (wader y botas)

2. Procedimiento

- a) Elegir la zona de estudio a levantar, asegurándose que tenga profundidades de más de 30 cm
- b) Cargar previamente la sonda y el celular para asegurar su máximo tiempo de operatividad.
- c) En el smartphone: Programar el modo “pesca en la orilla” en la aplicación Fish Deeper con el haz de 7° y sensibilidad al 100%.
- d) Colocar la sonda atada con la piola en el agua y esperar a que el celular se conecte al GPS integrado en la sonda (el tiempo de espera es aproximadamente 30 segundos).
- e) Desde un extremo del río se procede a recoger la sonda para que complete el recorrido de la línea de la sección transversal a levantar.
- f) Al sacar la sonda del agua se debe desconectar la sonda del wifi integrado, para que el registro de la medición quede guardado en la aplicación.
- g) Se renombra y exporta la medición a la nube (www.fishdeeper.com).

- h) Se visualiza la batimetría en la aplicación o en la nube. Todos los gráficos son gratuitos y descargables, y todos los mapas se transfieren automáticamente al portal web Fish Deeper™
- i) Luego se exportan los archivos en formato .CSV para su visualización en Qgis para generar los perfiles transversales y longitudinales levantados con el GPS y la ecosonda.

Calibración y validación

El proceso de calibración en el modelo usando el software HECRAS considera el ajuste del parámetro de rugosidad de Manning con fines de mejorar la precisión de los resultados del modelo con respecto a la información medida en terreno. En este estudio se realizan varios modelos con n diferentes y se comparan los resultados de los modelos HEC-RAS con la cota de agua medida en terreno y se evalúan las diferencias entre lo medido y calculado para quedarse con el que entregue la menor diferencia promedio. Las variables de cálculo son: caudal, cota del agua, pendiente de energía, geometría del cauce, coeficiente de Manning.

Diferencias en las mediciones

Las métricas para evaluar la precisión de los equipos que se usan son el error de sesgo medio (MSE) (2), el error absoluto medio (MAE) (3) y el error cuadrático medio (RMSE) (4)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{f,i} - x_{o,i}) \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{f,i} - x_{o,i}| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{f,i} - x_{o,i})^2} \quad (4)$$

Donde $x_{f,i}$ y $x_{o,i}$ son el i -ésimo pronóstico (dato del gps) y la observación (dato de la ecosonda), respectivamente.

Resultados

En la Figura 4 y 5 se muestran los datos obtenidos de las coordenadas planimétricas (x, y) en coordenadas UTM WGS84 Zona 18 sur.



Figura 4. Puntos exportados de la pasada longitudinal con la ecosonda y proyectados en el software Qgis (Fuente: elaboración propia)

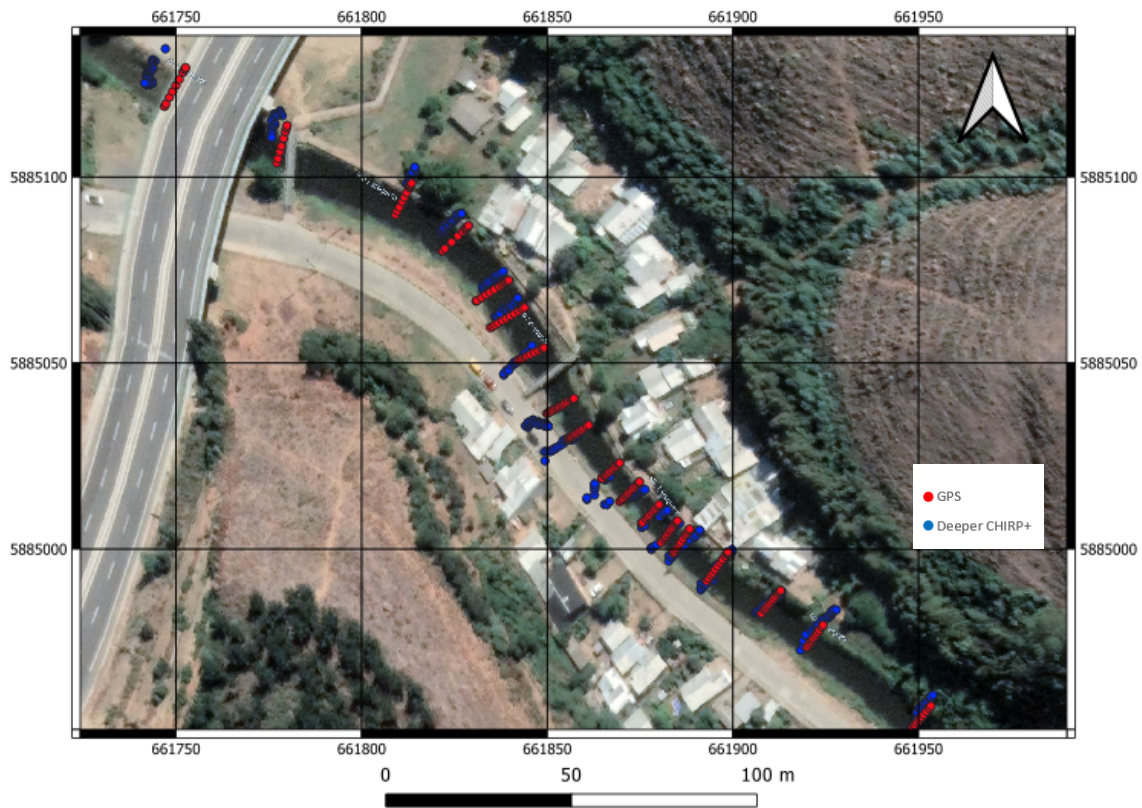
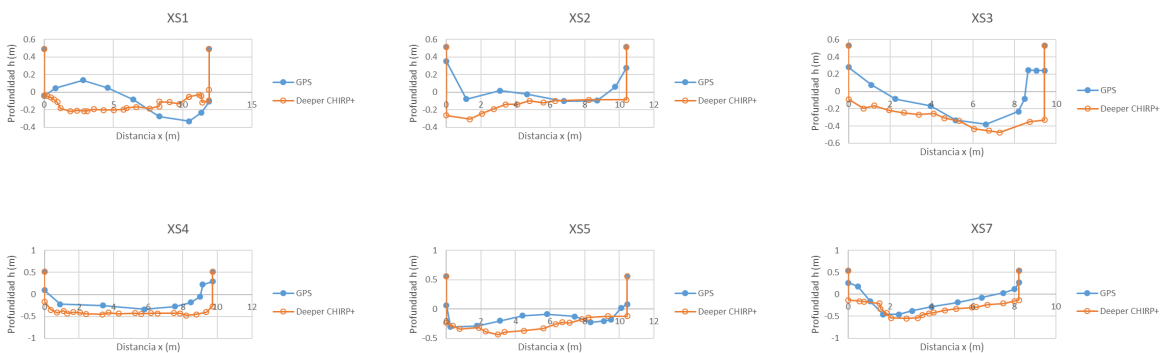


Figura 5. Puntos exportados de las secciones transversales de ambos métodos y proyectados en el software Qgis (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la Figura 5 se tiene un error asociado a la planimetría en los datos proporcionados por el GPS de la ecosonda (puntos azules) en comparación a los proporcionados por el método gps (puntos rojos). Para comparar la profundidad de cada sección transversal obtenida por ambos métodos, se realiza un ajuste en el software AUTOCAD CIVIL 3D donde se crea un ajuste óptimo con los puntos de la sonda y se procede a alinear y escalar en los ejes x, y con los datos ajustados obtenidos por el GPS, así se pueden obtener y graficar los perfiles transversales presentados en la Figura 6 para generar las geometrías en HEC RAS presentadas en la Figura 7.



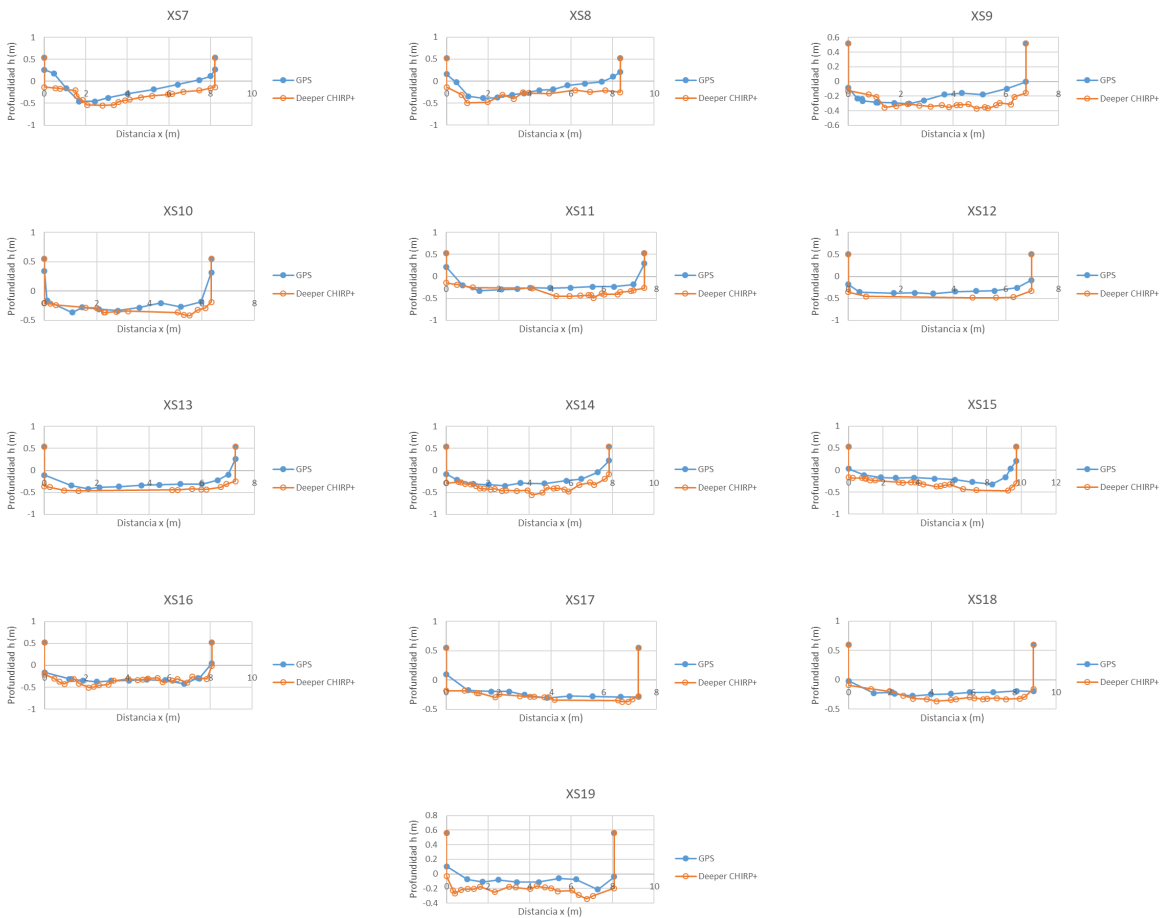


Figura 6. Perfiles transversales obtenidos con ambos métodos de levantamiento

Con los perfiles obtenidos de la Figura 6 se obtuvieron las siguientes diferencias presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Diferencias asociadas a los perfiles transversales entre ambos métodos de levantamiento.

Perfil	Ancho perfil (m)	Diferencia profundidad máxima (cm)	MSE (Error de sesgo medio)	MAE (Error absoluto medio)	RMSE (Error cuadrático medio)
XS1	11.9	9.2	5%	19%	21%
XS2	10.4	14.1	12%	12%	14%
XS3	9.4	13	17%	17%	23%
XS4	9.7	13.7	21%	21%	24%
XS5	10.4	9.6	10%	12%	15%
XS6	10.6	20.3	15%	15%	18%
XS7	8.2	11.4	16%	16%	21%
XS8	8.3	11.4	10%	11%	13%
XS9	6.8	6.6	11%	13%	15%
XS10	6.4	4.9	7%	8%	12%
XS11	7.5	16.1	15%	15%	16%
XS12	6.9	9	15%	15%	15%
XS13	7.3	4.2	15%	15%	16%
XS14	7.8	20.6	13%	13%	16%
XS15	9.7	14.2	14%	14%	15%
XS16	8.1	8.6	4%	7%	9%
XS17	7.3	6.6	4%	4%	5%
XS18	8.9	8.8	8%	9%	9%
XS19	8.1	12.9	14%	14%	16%
	Promedio	11.32			

De acuerdo a la Tabla 2 se observa que los perfiles donde existe mayor error en las mediciones son XS1, XS3, XS4, XS6 y XS7.



Figura 7. Geometría en software HEC RAS, obtenida a partir de las secciones transversales levantadas (Fuente: elaboración propia).

Con los datos obtenidos del colector GPS y de la ecosonda se generan ambas geometrías para alimentar un modelo 1D en el software HEC RAS para un flujo estacionario. Los datos del aforo realizado en el río proporcionaron un caudal de $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ que es utilizado como caudal de entrada. Para las condiciones de borde aguas abajo se considera una altura conocida correspondiente a la cota de agua medida en terreno con la estación GPS.

En la Figura 8 se comparan los perfiles longitudinales del tramo del río modelado obtenidos de ambos métodos de levantamiento batimétrico. Los datos del GPS y de la ecosonda son medidos desde el pelo del agua, ya que la ecosonda no entrega el dato del pelo del agua.

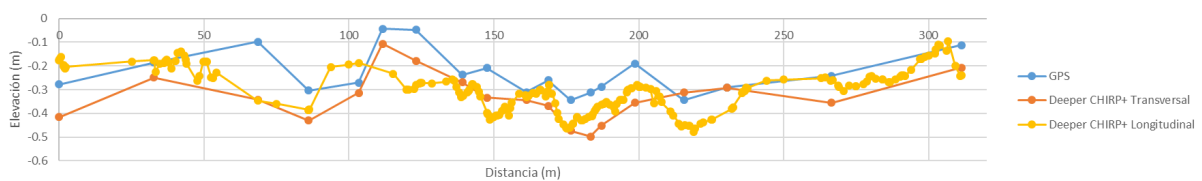


Figura 8. Comparación del perfil longitudinal entre el GPS y la ecosonda (Deeper CHIRP+) con la pasada transversal y longitudinal.

De la Figura 8 se obtienen los siguientes resultados de error presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Diferencias asociadas a los perfiles longitudinales entre ambos métodos de levantamiento.

Perfil	MBE	MAE	RMSE
Longitudinal gps celular (pasada longitudinal)	6%	8%	7%
Longitudinal gps ecosonda (pasada transversal)	10%	11%	12%

En la Tabla 4 se muestran las diferencias por cada perfil al comparar los resultados del eje hidráulico y velocidades entre ambos modelos de levantamiento batimétrico, los resultados del modelo generado con las geometrías por medio del gps y ecosonda están en el Anexo 2, Figuras 11 y 12, respectivamente. En la Figura 9 se muestran los perfiles hidráulicos obtenidos con ambos métodos.

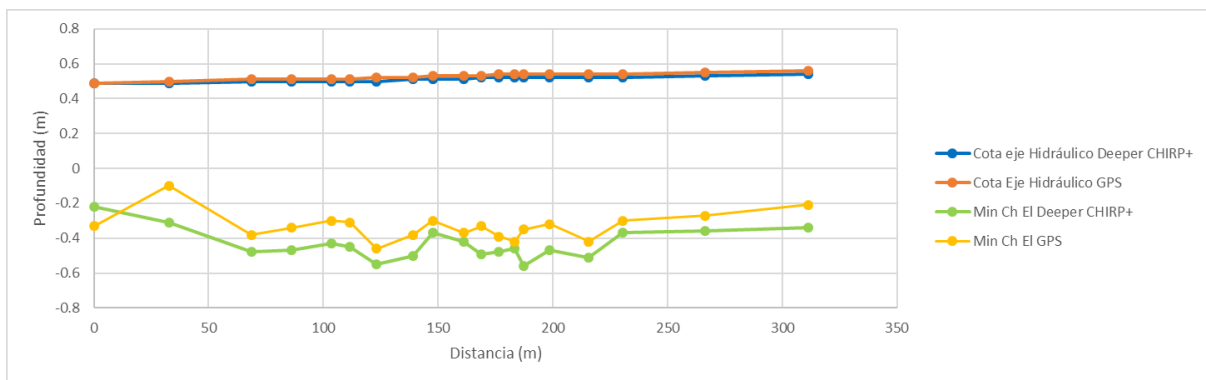


Figura 9. Diferencias de cota del eje hidráulico de ambos métodos de levantamiento.

Tabla 4. Diferencias entre ambos modelos.

Perfil	Diferencia Cota del Eje hidráulico (cm)	Diferencia velocidades (m/s)
XS1	2	0.04
XS2	2	0.01
XS3	2	0.01
XS4	2	0
XS5	2	0.03
XS6	2	0.04
XS7	2	0.02
XS8	2	0.03
XS9	1	0.02

XS10	2	0.01
XS11	2	0.03
XS12	1	0.04
XS13	2	0.04
XS14	1	0.03
XS15	1	0.02
XS16	1	0.04
XS17	1	0.05
XS18	1	0.05
XS19	0	0.02

Discusión

El problema de los levantamientos batimétricos es correlacionar la posición planimétrica y la determinación de la profundidad para no introducir errores en la determinación de la posición del punto situado por debajo de la superficie del agua, y que va a ser el que se represente en el modelo final.

Se debe considerar que la eco sonda envía ondas de ultrasonido aproximadamente 15 veces por segundo, mientras que las coordenadas del GPS se actualiza 1 vez por segundo. Esto significa que mientras se obtienen ~15 datos de profundidad, sólo se recibirá 1 dato GPS, que se mostrará en consecuencia en el archivo exportado. Entonces como solo se requieren los datos con coordenadas x, y, z se ignoran los datos con coordenadas (x, y) de valor 0 en el archivo exportado, ya que no contienen información de interés, filtrándose solo los que contienen coordenadas (x, y).

Analizando los resultados de las diferencias entre las secciones transversales de ambos modelos se tienen errores en promedio del 15% para secciones transversales y del 11% para los perfiles longitudinales. También se observa que el GPS integrado al celular arroja diferencias menores que el GPS integrado a la ecosonda.

Los errores en la medición pueden ser provocados por: i) el tipo de fondo del río, ii) las condiciones atmosféricas, iii) la topografía del lugar y la vegetación que puedan bloquear las señales del GPS.

También existe la posibilidad de obtener un registro erróneo al interponerse algún material en el camino de la onda, falseando el relieve del fondo.

En la Figura 8, se tiene un ejemplo de una sección transversal y de cómo el balanceo (i.e. movimiento pendular) de la sonda afecta la medición de la profundidad.

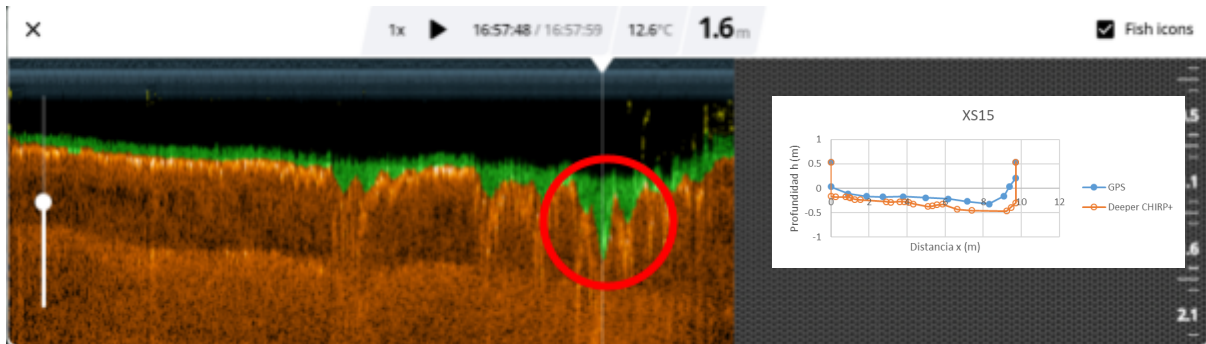


Figura 10. Perfil xs15 (fuente: www.fishdeeper.com).

Como se puede observar en la Figura 10, que corresponde al perfil transversal 15 (Figura 7), la ecosonda es susceptible a movimientos pendulares durante el recorrido de la línea de la sección transversal, estos pueden ser debidos a malas maniobras con la cuerda que está atada a la sonda produciéndose el balanceo de ésta, por este motivo durante el postprocesamiento de datos se deben corregir estos errores eliminando dicha medición. Esto dado a que la profundidad observada en terreno no corresponde a la observada en el output de la ecosonda.

En la Figura 10. se muestra también la estructura del fondo. La ecosonda mide el tiempo que tarda un pulso de sonido en regresar, así como también la fuerza de la señal que regresa. Esto permite mostrar cuán duros o blandos son los objetos bajo el agua. Los objetos blandos de baja densidad devuelven una señal más débil, mientras que los objetos duros de alta densidad devuelven una señal más fuerte, lo que se traduce en la imagen con colores más brillantes si es más duro el fondo. Las bandas verdes indican la vegetación.

También es posible que la sonda se balancee debido a la acción del flujo del río, para comprobar esto se realizó una prueba donde se verificó la velocidad de flujo para la cual la sonda tiende a inclinarse. Para verificar a qué velocidad de flujo se balancea la sonda se realiza una prueba en un canal de ancho 0,32 y un caudal de 493,43 (l/min). En la Tabla 7 se muestran los resultados de la prueba.

Tabla 7. Resultados de la prueba de balanceo de la ecosonda Deeper CHIRP+.

Largo de la cuerda	42 cm
Velocidad (m/s)	0,22
Caudal (l/min)	493,43
Área (m ²)	0,0368
Altura de flujo (m)	0,115
Ancho (m)	0,32

De la Tabla 7 se tiene que la sonda sufre un movimiento pendular cuando la velocidad es 0,22 m/s y el largo de cuerda es 42 cm.

Conclusiones

La ecosonda al ser inalámbrica, muy ligera, pequeña y no requerir una instalación compleja en un barco, es fácilmente transportable y se puede desplegar rápidamente.

La ecosonda corresponde a una solución económica en comparación con los sonares de grado industrial. Para aquellos levantamientos que requieren alta precisión, el sonar Deeper puede actuar como una gran herramienta para realizar levantamientos preliminares y programar mejor las campañas con equipos más sofisticados.

Como se pudo observar la precisión del GPS integrado en la ecosonda es de varios metros, por lo que se requiere adquirir localizaciones horizontales con una estación gps. La precisión de la sonda se puede mejorar usando un brazo flexible para apoyarlo en una embarcación (kayac o bait boat) para evitar posibles balanceos.

Se destaca que al realizar el levantamiento longitudinal del río con la ecosonda en el modo barca que usa el GPS integrado en el celular se tienen menores diferencias que con los del levantamiento realizado con el GPS integrado en la ecosonda, esto puede ser debido a que el celular tenga mejor recepción de las constelaciones de satélites que la ecosonda en el agua.

Al comparar ambos modelos por cada perfil levantado se tienen diferencias menores al 1% en cuanto al eje hidráulico y menores al 2% en cuanto a velocidades, lo que es poco significativo, por lo tanto, se pueden realizar levantamientos con la ecosonda para alimentar modelos 1D de flujo estacionario en el software HECRAS.

Anexo 1

Los costes relacionados para realizar levantamientos batimétricos son difíciles de calcular y comparar. Los costes incluyen un gasto inicial y gastos adicionales en función de la naturaleza de cada levantamiento. Éstos suelen depender de la duración del estudio, del tamaño de la zona a estudiar, de la precisión y resolución necesarias, del coste de la mano de obra y de las características de la masa de agua. En la Tabla 8 se comparan los costes aproximados de las técnicas más utilizadas para realizar levantamientos batimétricos (Bandini et al., 2017).

Tabla 8. Comparación de costes de distintos métodos de levantamiento batimétrico.

Técnica	Plataforma	Costo de la instrumentación	Costo por levantamiento
Firma espectral	Satélite	Costo soportado por la agencia espacial	Alta resolución: entre \$10000 y \$30000 por km ² Con un pedido mínimo de imágenes (25- 100 km ²)
	Avión tripulado	Cámaras multiespectrales: entre \$15 y \$200 millones	Coste mínimo: entre \$300000 y \$800000 por km ²
	UAV	Cámaras multiespectrales: entre \$15 y \$200 millones UAV mediano: \$3 a \$30 millones	Coste mínimo: entre \$100000 y \$300000 por hora
Fotogrametría	Avión tripulado	Cámaras: entre \$1 y \$30 millones	Coste mínimo: entre \$300000 y \$800000 km ²
	UAV	Cámaras: entre \$0,5 y \$10 millones UAV mediano: \$3 a \$30 millones	Coste mínimo: entre \$100000 y \$300000 por hora
LIDAR	UAV	Lidar: \$120 millones UAV grande: entre \$15 y \$30 millones	Coste mínimo: entre \$100000 y \$300000 por hectárea
	Avión tripulado	Lidar: entre \$100 y \$2500 millones	Coste mínimo: entre \$100000 y \$300000 por hectárea Post proceso adicional: entre \$150000 y \$300000 km ²
TLS	In situ	TLS: entre \$65 y \$225 millones	Coste mínimo: entre \$60000 y \$100000 por hora
GPS	In situ	GNSS spectra SP60: \$11,29 millones	
Ecosonda Deeper CHIRP+	In situ	Sonar: \$300000	

Anexo 2

Resultados software HECRAS de ambos modelos.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	19	PF 1	1.31	-0.21	0.56	0.04	0.56	0.000290	0.25	5.24	8.08	0.10
Reach 1	18	PF 1	1.31	-0.27	0.55	-0.08	0.55	0.000141	0.19	6.80	8.92	0.07
Reach 1	17	PF 1	1.31	-0.30	0.54	-0.09	0.55	0.000207	0.23	5.66	7.32	0.08
Reach 1	16	PF 1	1.31	-0.42	0.54	-0.19	0.54	0.000125	0.19	6.94	8.07	0.06
Reach 1	15	PF 1	1.31	-0.32	0.54	-0.06	0.54	0.000144	0.19	6.95	9.71	0.07
Reach 1	14	PF 1	1.31	-0.35	0.54	-0.12	0.54	0.000180	0.22	6.05	7.84	0.08
Reach 1	13	PF 1	1.31	-0.42	0.54	-0.16	0.54	0.000165	0.21	6.08	7.28	0.08
Reach 1	12	PF 1	1.31	-0.39	0.54	-0.19	0.54	0.000172	0.22	6.07	6.98	0.07
Reach 1	11	PF 1	1.31	-0.33	0.53	-0.10	0.54	0.000204	0.23	5.69	7.54	0.08
Reach 1	10	PF 1	1.31	-0.37	0.53	-0.10	0.54	0.000266	0.26	4.95	6.36	0.10
Reach 1	9	PF 1	1.31	-0.30	0.53	-0.05	0.53	0.000636	0.27	4.92	6.76	0.10
Reach 1	8	PF 1	1.31	-0.38	0.52	-0.09	0.53	0.000411	0.23	5.79	8.37	0.09
Reach 1	7	PF 1	1.31	-0.46	0.52	-0.12	0.52	0.000434	0.23	5.64	8.22	0.09
Reach 1	6	PF 1	1.31	-0.31	0.51	-0.07	0.52	0.000133	0.18	7.37	10.66	0.07
Reach 1	5	PF 1	1.31	-0.30	0.51	-0.05	0.51	0.000143	0.18	7.11	10.45	0.07
Reach 1	4	PF 1	1.31	-0.34	0.51	-0.12	0.51	0.000136	0.19	6.96	9.73	0.07
Reach 1	3	PF 1	1.31	-0.38	0.51	-0.08	0.51	0.000218	0.22	5.95	9.45	0.09
Reach 1	2	PF 1	1.31	-0.10	0.50	0.09	0.50	0.000350	0.25	5.30	10.41	0.11
Reach 1	1	PF 1	1.31	-0.33	0.49	-0.06	0.49	0.000192	0.19	6.82	11.90	0.08

Figura 11. Resultados del modelo levantado con gps.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	19	PF 1	1.31	-0.34	0.54	-0.08	0.54	0.000181	0.21	6.11	8.08	0.08
Reach 1	18	PF 1	1.31	-0.36	0.53	-0.14	0.53	0.000119	0.18	7.15	8.91	0.07
Reach 1	17	PF 1	1.31	-0.37	0.52	-0.14	0.53	0.000181	0.22	5.95	7.32	0.08
Reach 1	16	PF 1	1.31	-0.51	0.52	-0.21	0.52	0.000116	0.19	7.03	8.07	0.06
Reach 1	15	PF 1	1.31	-0.47	0.52	-0.22	0.52	0.000082	0.16	8.30	9.71	0.05
Reach 1	14	PF 1	1.31	-0.56	0.52	-0.25	0.52	0.000110	0.18	7.08	7.84	0.06
Reach 1	13	PF 1	1.31	-0.46	0.52	-0.27	0.52	0.000112	0.19	6.90	7.28	0.06
Reach 1	12	PF 1	1.31	-0.48	0.52	-0.31	0.52	0.000113	0.19	6.80	6.98	0.06
Reach 1	11	PF 1	1.31	-0.49	0.52	-0.18	0.52	0.000150	0.21	6.35	7.54	0.07
Reach 1	10	PF 1	1.31	-0.42	0.51	-0.16	0.52	0.000226	0.25	5.30	6.36	0.09
Reach 1	9	PF 1	1.31	-0.37	0.51	-0.14	0.51	0.000435	0.24	5.43	6.76	0.09
Reach 1	8	PF 1	1.31	-0.50	0.51	-0.17	0.51	0.000270	0.19	6.76	8.37	0.07
Reach 1	7	PF 1	1.31	-0.55	0.50	-0.22	0.51	0.000254	0.19	6.82	8.22	0.07
Reach 1	6	PF 1	1.31	-0.45	0.50	-0.19	0.50	0.000083	0.15	8.58	10.66	0.05
Reach 1	5	PF 1	1.31	-0.43	0.50	-0.18	0.50	0.000095	0.16	8.12	10.45	0.06
Reach 1	4	PF 1	1.31	-0.47	0.50	-0.30	0.50	0.000064	0.15	8.94	9.73	0.05
Reach 1	3	PF 1	1.31	-0.48	0.50	-0.20	0.50	0.000103	0.17	7.64	9.45	0.06
Reach 1	2	PF 1	1.31	-0.31	0.49	-0.02	0.50	0.000179	0.20	6.68	10.41	0.08
Reach 1	1	PF 1	1.31	-0.22	0.49	-0.05	0.49	0.000134	0.17	7.62	11.90	0.07

Figura 12. Resultados del modelo levantado con la ecosonda Deeper Smart CHIRP+.

Bibliografía

- Aldorf, D. E., Rodríguez, E., & Lettenmaier, D. P.** (2007). Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2002. <https://doi.org/10.1029/2006RG000197>
- Bailly, J.-S., Le Coarer, Y., Languille, P., Stigermark, C.-J., & Allouis, T.** (2010). Geostatistical estimations of bathymetric LiDAR errors on rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(10), 1199–1210. <https://doi.org/10.1002/esp.1991>
- Bandini, F., Olesen, D., Jakobsen, J., Kittel, C. M. M., Wang, S., García, M., & Bauer-Gottwein, P.** (2017). *Observaciones de batimetría de masas de agua interiores mediante un sonar de un solo haz atado y controlado por un vehículo aéreo no tripulado*. 34.
- Bangen, S. G., Wheaton, J. M., Bouwes, N., Bouwes, B., & Jordan, C.** (2014). A methodological intercomparison of topographic survey techniques for characterizing wadeable streams and rivers. *Geomorphology*, 206, 343–361. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.010>
- Brown, C. J., & Blondel, P.** (2009). Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping. *Applied Acoustics*, 70(10), 1242–1247. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2008.08.004>
- Brown, H. C., Jenkins, L. K., Meadows, G. A., & Shuchman, R. A.** (2010). *BathyBoat: An Autonomous Surface Vessel for Stand-alone Survey and Underwater Vehicle Network Supervision*. *Marine Technology Society Journal*, 44(4), 20–29. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.44.4.5>
- Carbonneau, P. E., Lane, S. N., & Bergeron, N.** (2006). Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(11), 1413–1423. <https://doi.org/10.1002/esp.1341>
- Conner, J. T., & Tonina, D.** (2013). *Effect of cross-section interpolated bathymetry on 2D hydrodynamic model results in a large river*. 13.
- Fernández de Córdoba Webster, Carlos Javier, León Méndez, Alcides J. F., Rodríguez López, Yakelín, Martínez Ramírez, Paul Geovanny, & Meneses Meneses, Diego Martín.** (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 17-31. Recuperado en 14 de diciembre de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100002&lng=es&tlng=es.
- Ferreira, H., Almeida, C., Martins, A., Almeida, J., Dias, N., Dias, A., & Silva, E.** (2009). Autonomous bathymetry for risk assessment with ROAZ robotic surface vehicle. *OCEANS 2009-EUROPE*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2009.5278235>
- Ferreira, I. O., Andrade, L. C. de, Teixeira, V. G., & Santos, F. C. M.** (2022). State of art of bathymetric surveys. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 28(1), e2022002. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702022000100002>
- Fish deeper.** (n.d.). Fishdeeper.com. Retrieved December 14, 2022, from <https://www.fishdeeper.com/en-ww/bathymetry>

- Gichamo, T. Z., Popescu, I., Jonoski, A., & Solomatine, D.** (2012). River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling. *Environmental Modelling & Software*, *31*, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.12.003>
- Giordano, F., Mattei, G., Parente, C., Peluso, F., & Santamaria, R.** (2015). Integrating Sensors into a Marine Drone for Bathymetric 3D Surveys in Shallow Waters. *Sensors*, *16*(1), 41. <https://doi.org/10.3390/s16010041>
- Hamylton, S., Hedley, J., & Beaman, R.** (2015). Derivation of High-Resolution Bathymetry from Multispectral Satellite Imagery: A Comparison of Empirical and Optimisation Methods through Geographical Error Analysis. *Remote Sensing*, *7*(12), 16257–16273. <https://doi.org/10.3390/rs71215829>
- US Army Corps of Engineers.** (2020). Hydraulic Reference Manual. HEC-RAS River Analysis System.
- Lee, K. R., Kim, A. M., Olsen, R. C., & Kruse, F. A.** (2011). *Using WorldView-2 to determine bottom-type and bathymetry* (W. W. Hou & R. Arnone, Eds.; p. 80300D). <https://doi.org/10.1117/12.883578>
- Legleiter, C. J.** (2012). Remote measurement of river morphology via fusion of LiDAR topography and spectrally based bathymetry: MEASURING RIVER MORPHOLOGY WITH LIDAR AND SPECTRAL BATHYMETRY. *Earth Surface Processes and Landforms*, *37*(5), 499–518. <https://doi.org/10.1002/esp.2262>
- Legleiter, C. J., Roberts, D. A., & Lawrence, R. L.** (2009). Spectrally based remote sensing of river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, *34*(8), 1039–1059. <https://doi.org/10.1002/esp.1787>
- Liceaga-Correa, M. A., & Euan-Avila, J. I.** (2002). Assessment of coral reef bathymetric mapping using visible Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, *23*(1), 3–14. <https://doi.org/10.1080/01431160010008573>
- Lyons, M., Phinn, S., & Roelfsema, C.** (2011). Integrating Quickbird Multi-Spectral Satellite and Field Data: Mapping Bathymetry, Seagrass Cover, Seagrass Species and Change in Moreton Bay, Australia in 2004 and 2007. *Remote Sensing*, *3*(1), 42–64. <https://doi.org/10.3390/rs3010042>
- Lyzenga, D. R.** (1981). Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, *2*(1), 71–82. <https://doi.org/10.1080/01431168108948342>
- Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., & Tanis, F. J.** (2006). Multispectral Bathymetry Using a Simple Physically Based Algorithm. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, *44*(8), 10.
- Manley, P. L., & Singer, J. K.** (2008). Assessment of sedimentation processes determined from side-scan sonar surveys in the Buffalo River, New York, USA. *Environmental Geology*, *55*(7), 1587–1599. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1109-8>

- Nitsche, F. O., Ryan, W. B. F., Carbotte, S. M., Bell, R. E., Slagle, A., Bertinado, C., Flood, R., Kenna, T., & McHugh, C.** (2007). Regional patterns and local variations of sediment distribution in the Hudson River Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(1–2), 259–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.07.021>
- Overstreet, B. T., & Legleiter, C. J.** (2017). Removing sun glint from optical remote sensing images of shallow rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(2), 318–333. <https://doi.org/10.1002/esp.4063>
- Smith, M., Vericat, D., and Gibbins, C.** (2012) Through-water terrestrial laser scanning of gravel beds at the patch scale, *Earth Surf. Proc. Land.*, 37, 411–421, <https://doi.org/10.1002/esp.2254>.
- Smith, M. W. and Vericat, D.** (2014): Evaluating shallow-water bathymetry from through-water terrestrial laser scanning under a range of hydraulic and physical water quality conditions, *River Res. Appl.*, 30, 905–924, <https://doi.org/10.1002/rra.2687>.
- Snellen, M., Siemes, K., & Simons, D. G.** (2011). Model-based sediment classification using single-beam echosounder signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(5), 2878–2888. <https://doi.org/10.1121/1.3569718>
- Strayer, D. L., Malcom, H. M., Bell, R. E., Carbotte, S. M., & Nitsche, F. O.** (2006). Using geophysical information to define benthic habitats in a large river. *Freshwater Biology*, 51(1), 25–38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01472.x>
- Walker, D. J., & Alford, J. B.** (2016). Mapping Lake Sturgeon Spawning Habitat in the Upper Tennessee River using Side-Scan Sonar. *North American Journal of Fisheries Management*, 36(5), 1097–1105. <https://doi.org/10.1080/02755947.2016.1198289>
- Woodget, A. S., Carbonneau, P. E., Visser, F., & Maddock, I. P.** (2015). Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry: SUBMERGED FLUVIAL TOPOGRAPHY FROM UAS IMAGERY AND SfM. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 47–64. <https://doi.org/10.1002/esp.3613>