

Medición de parámetros hidráulicos in situ de cauces naturales.

Ravotti Nicolás, Weber Juan Francisco

Laboratorio de Hidráulica, Dpto. Ingeniería Civil, UTN Facultad Regional Córdoba.

E-mail: nicolas.ravotti@gmail.com / jweber@civil.frc.utn.edu.ar

RESUMEN

En gran parte de la región semiárida de la Argentina en general, y en las Sierras de Córdoba en particular, ocurren crecidas repentinas de los ríos y arroyos que producen inundaciones en sus áreas ribereñas. Un sistema de alerta temprana de crecidas contribuye a mejorar la seguridad de la población ubicada en los márgenes de los cauces naturales, pero los equipos que lo conforman son en general de origen extranjero, y tanto su mantenimiento como su actualización se tornan dificultosos.

La idea es crear un equipo que integre un pluviógrafo y un limnígrafo, de desarrollo íntegramente nacional, autónomo, de bajo costo, de sencilla reparación y/o actualización y que sea capaz de competir en el mercado (Sabbione N. C., 2015). El equipo debe además procesar y enviar mediciones a través de un módulo de comunicación GSM (Lopez E. P., 2012).

Debido a su versatilidad y bajo costo, se optó por utilizar la Plataforma libre Arduino para el desarrollo del hardware, y particularmente un sensor ultrasónico para la medición de niveles.

El sensor de niveles fue puesto a prueba frente diversas superficies y a distintas distancias. Primero frente a superficies sólidas y planas, logrando un buen patrón de corrección que permite un error por debajo del centímetro (con resolución de 1mm). Luego las mediciones se hacen frente a agua en reposo, sin notar diferencias con lo anterior. Por último se mide frente a agua agitada, donde es notable el aumento en la dispersión de las muestras sin alterar el error de la media.

Estos resultados alientan el desarrollo del equipo antes mencionado, objeto de este trabajo.

INTRODUCCION

Problemática

Por diversas causas, algunas producto del accionar del ser humano y otras naturales, como lluvias con suficiente intensidad y duración, los ríos y arroyos suelen crecer de forma intempestiva generando inundaciones extremadamente dañinas para los pobladores que habitan las zonas ribereñas (Barbeito O., 2014). Algunas veces las consecuencias son trágicas y generalmente las pérdidas materiales son elevadas.

Lamentablemente al momento de las crecidas no hay mucho por hacer para evitar las pérdidas materiales, pero es de extrema necesidad conocer los riesgos de inundación y estar alerta para poder evitar pérdidas humanas.

La opción más adecuada para suplir esta necesidad es un sistema de alerta de crecidas, que permita monitorear los niveles de los ríos y arroyos, y medir y registrar las precipitaciones ocurridas dentro de la cuenca en cuestión. Sin embargo estos sistemas son generalmente de origen extranjero, con un costo demasiado alto y de difícil mantenimiento, reparación y actualización.

Necesidad

Por ello surge la idea de diseñar y desarrollar equipos propios de medición, de buena calidad, competitivos y de bajo costo, para poder armar un sistema de monitoreo y alerta de fabricación propia. Básicamente se necesitan pluviógrafos y limnígrafos, que procesen y guarden los datos, y envíen de alguna forma una alerta en caso de ser necesario.

Años atrás se desarrolló, con buenos resultados, un equipo para tomar la señal de un pluviógrafo de cangilones volcables que formaba parte de una estación meteorológica de bajo costo. Estos datos se procesaban y almacenaban en una memoria para poder ser estudiados.

Objetivo

Ahora, en el presente trabajo, se propone el desarrollo de un limnígrafo de bajo costo, para acoplar al pluviógrafo y así crear una red de equipos de campo que permita generar un monitoreo en tiempo real de una cuenca.

DESARROLLO

Métodos tradicionales de medición

Existen varios métodos para poder medir el nivel de un río (Fatorelli y Fernández, 2011). Los más simples usan reglas y escalas graduadas, pero dependen de la presencia recurrente de una persona que tome las mediciones. Otros sistemas son mecánicos, contienen flotantes y requieren de desplazamientos para poder medir, lo que los vuelven inconvenientes por su alto mantenimiento. Otros miden indirectamente a través de la presión hidrostática o de la conductancia eléctrica del agua, pero son muy complejos y también requieren de excesivo mantenimiento.

Otra alternativa para la medición de niveles, y la que se empleó en este trabajo, es la reflectometría, y particularmente la reflectometría acústica. Básicamente lo que hace la reflectometría acústica es medir el tiempo que tarda una onda acústica en ir y volver desde un punto fijo donde está instalado el sensor hasta la superficie del agua.

Este método requiere menos mantenimiento que los nombrados anteriormente debido al nulo contacto con el agua y a que no contiene partes móviles. Además su hardware es extremadamente sencillo. Como contrapartida, cabe destacar que es necesaria alguna estructura, preexistente o no, donde montar el sensor, como por ejemplo un puente. También se requiere una fuente de energía eléctrica para mantener en funcionamiento el equipo y cargadas las baterías de respaldo.

Hardware y Plataforma de Desarrollo

Una vez que se optó por la utilización del método de reflectometría acústica, se comenzó con el desarrollo del hardware, usando como herramienta la plataforma de desarrollo Arduino, que es un sistema de hardware libre con dos características muy interesantes.

Primero, todos sus diseños de electrónica son abiertos y libres, con lo cual el acceso a los documentos relacionados con el desarrollo y fabricación de los circuitos impresos están al alcance de todos en Internet. Además, y como consecuencia de lo anterior, es posible adquirir a muy bajo costo cualquier placa, máscara (shield Arduino), sensor o actuador, armado y listo para usar.

Segundo, Arduino proporciona un entorno de desarrollo en forma gratuita, donde es posible desarrollar los programas que controlen las placas antes nombradas.

En la Figura 1 se detallan los componentes usados para el desarrollo del primer prototipo, donde se escogió trabajar con la placa Arduino MEGA, el sensor de proximidad ultrasónico HC-SR04 (Ultrasonic Sensor HC-SR04. Product User's Manual) y una placa para tarjetas SD. El sensor se montó en una estructura donde además se pueden montar sensores de referencia, como por ejemplo un medidor de distancias laser BOSCH (con error de 1,5mm) o un sensor de movimiento ultrasónico PASCO (Instruction Sheet 012-09625B. Motion Sensor PS-2103A) (con error de 1mm).



Figura 1.- *arr-izq* Arduino Mega. *arr-der* Sensor de ultrasonido HC-SR04. *abj-izq* Medidor de distancias Laser BOSCH DLE70. *abj-der* Medidor de proximidad ultrasónico PASCO PS-2103A.

Prototipo

El sensor de distancias de ultrasonido HC-SR04 envía una onda sonora y pone un pin de salida a 5v. Luego cuando la onda sonora llega al receptor vuelve a poner el pin de salida a 0v. De esta manera está entregando un pulso cuya duración es igual al tiempo de recorrido de la onda sonora, ida y vuelta. Entonces el programa de la placa Arduino debe medir ese tiempo y a partir de ese valor calcular la distancia considerando constante la velocidad del sonido en el aire en 343m/s (20°C) (Serway R. A. 2008).

Para este trabajo, el programa fue diseñado de tal forma que el valor que guarda en memoria sea una distancia en milímetros con una resolución de 1mm. Además se toman automáticamente en promedio unas 200 muestras para cada distancia con un Δt de 1 segundo. Al finalizar todas las muestras el programa puede entrar en reposo o calcular un promedio de las mediciones anteriores y comenzar a tomar otra serie de muestras.

MEDICIONES

Una vez armado el prototipo del limnógrafo ultrasónico se determinaron los pasos a seguir y las diferentes mediciones a ejecutar para poner a prueba el sensor HC-SR04.

Medición sobre superficies sólidas

Las primeras pruebas se realizaron sobre superficies sólidas, a distancias cortas sobre una madera de 1 m² con onda sonora en dirección vertical y a distancias largas sobre una pared con onda sonora en dirección horizontal. En ambos casos se utilizó como referencia el medidor de distancias laser BOSCH.

Las distancias menores a 20mm generan mediciones incoherentes que se pueden atribuir a la geometría del sensor, teniendo en cuenta que la distancia entre el emisor y el receptor es de 26mm y los transductores están inmersos dentro de un tubo metálico de 10mm de altura. Por otro lado, las distancias mayores a 5000mm también generan mediciones erróneas, pero que en este caso se pueden atribuir al hardware del sensor. Ya que estas mediciones no erran de forma reiterada ni creciente, se descarta que la fuente de error pueda surgir del medio en el que se mide sino que alguna particularidad del hardware del sensor está generando el error (por ejemplo para 5500mm surgieron algunas mediciones de 30000mm).

Con estos primeros datos se define el rango de medición del equipo entre 20mm y 5000mm y una resolución de 1mm.

Se hicieron un total de 12 mediciones (6 mediciones a distancias menores a 500mm y 6 mediciones a distancias de entre 500mm y 5000mm) de 300 muestras cada una. Para cada medición se calcula la media aritmética o promedio (Raghumath H. M., 2006)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

,donde n es el numero de muestras, la desviación estándar (Raghumath H. M., 2006)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

y el error absoluto o simplemente error

$$error = \bar{x} - x_{ref} \quad (3)$$

donde x_{ref} es la medición de referencia.

En ningún caso el error de la media supera los 25mm, como se ve en la Tabla 1. Los resultados muestran baja dispersión de las muestras para distancias cortas (Figura 2) y un aumento de la dispersión a medida que aumenta la distancia (Figura 3). Luego se corrigen los valores según la recta de regresión (Raghumath H. M., 2006) obtenida de la Figura 4

$$\bar{x}_{corregida} = \frac{(\bar{x} - a)}{b} \quad (4)$$

donde a es el término independiente y b es la pendiente de la recta de regresión, y se reducen los errores de la media por debajo de los 12mm (Tabla 1).

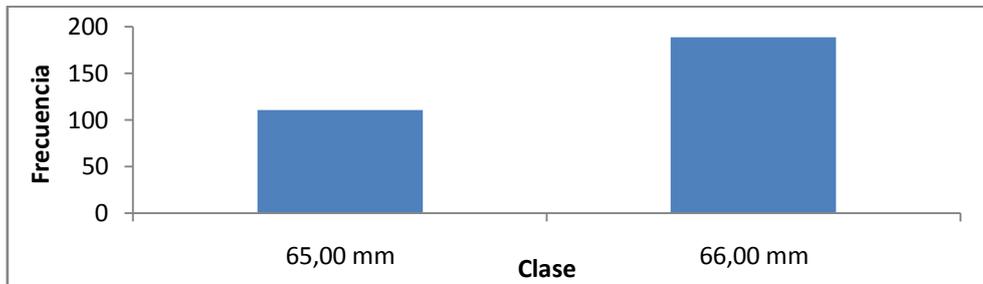


Figura 2.- Histograma de las muestras a 77mm. Medición sobre superficies sólidas.

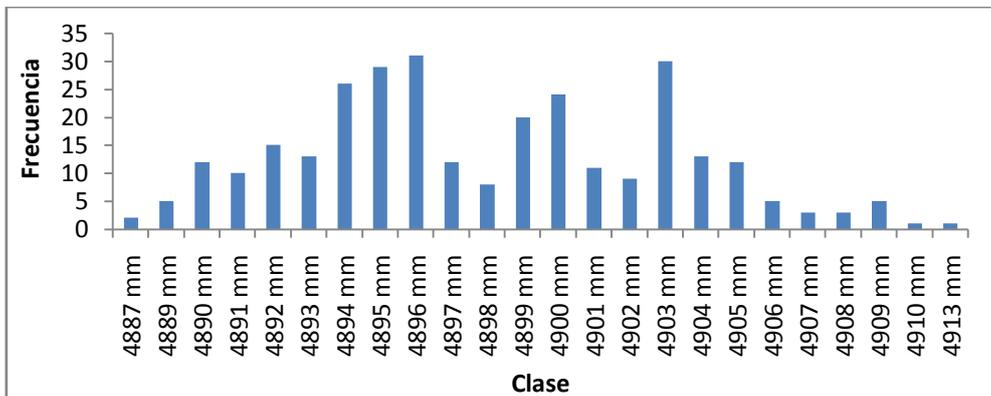


Figura3.- Histograma de las muestras a 4912mm. Medición sobre superficies sólidas.

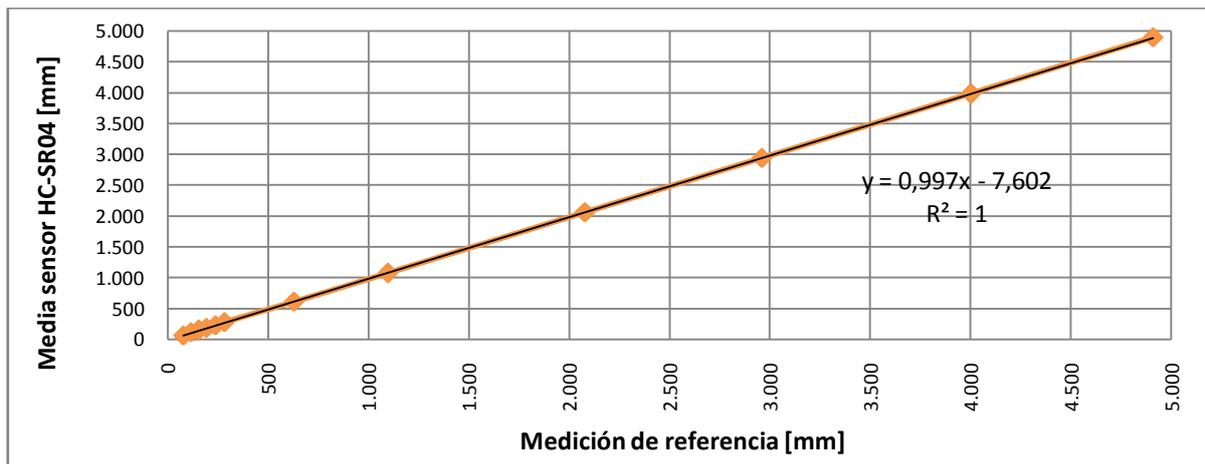


Figura 4.- Regresión lineal. Medición sobre superficies sólidas.

Tabla 1.- Medición sobre superficies sólidas.

MEDICION	MEDIDA REFERENCIA (mm)	SENSOR (300 muestras)		ERROR (mm)	CORRECCION	
		Media (mm)	Desv. Estándar (mm)		Media corregida (mm)	Error (mm)
DC 1	77	65,63	0,48	-11,37	73,44	-3,56
DC 2	118	114,33	0,47	-3,67	122,28	4,28
DC 3	156	153,11	0,33	-2,89	161,18	5,18
DC 4	193	189,00	0,33	-4,00	197,17	4,17
DC 5	238	233,66	0,47	-4,34	241,96	3,96
DC 6	283	279,34	0,57	-3,66	287,78	4,78
DL 1	630	617,12	2,16	-12,88	626,54	-3,46
DL 2	1097	1074,26	2,30	-22,74	1085,01	-11,99
DL 3	2081	2060,93	3,29	-20,07	2074,54	-6,46
DL 4	2961	2939,49	3,39	-21,51	2955,67	-5,33
DL 5	4003	3983,92	4,69	-19,08	4003,13	0,13
DL 6	4912	4897,92	5,04	-14,08	4919,79	7,79

Medición sobre agua en reposo

Luego se midió sobre la superficie del agua, en una fuente, usando como referencia el sensor de proximidad PASCO, como se ve en la Figura 5. El cambio de sensor de referencia se hace debido a que el medidor de distancias laser falla cuando se mide sobre la superficie del agua.

Se hacen 8 mediciones de 140 muestras cada una, desde 250mm hasta 2170mm. Se calcula los promedios con la Ec. (1) y como resultado se obtienen mediciones con errores menores a 20mm (Tabla 2). Se corrigen las mediciones medias de la misma forma que para superficies sólidas, con la recta de regresión de la Figura 4, y se logra reducir el error por debajo de los 6mm, como se indica en la Tabla 2. Cabe destacar que la dispersión de las muestras es parecida a la medición a superficies sólidas, como se espera, debido a que el agua está en reposo.

En la Figura 6 se observan en celeste los errores a diferentes distancias, en verde la desviación estándar y en rojo los errores de las medias corregidas.



Figura 5.- Montaje. Medición sobre agua en reposo.

Tabla 2.- Medición sobre agua en reposo.

MEDICION	MEDIDA REFERENCIA (mm)	SENSOR (140 muestras)		ERROR (mm)	CORRECCION	
		Media (mm)	Desv. Estándar (mm)		Media corregida (mm)	Error (mm)
1	250,00	242,34	1,90	-7,66	250,67	0,67
2	517,00	507,94	2,08	-9,06	517,04	0,04
3	834,00	823,57	1,93	-10,43	833,59	-0,41
4	1052,00	1040,12	3,54	-11,88	1050,77	-1,23
5	1364,00	1352,12	1,93	-11,88	1363,68	-0,32
6	1607,00	1589,64	2,29	-17,36	1601,88	-5,12
7	1898,00	1879,94	2,43	-18,06	1893,03	-4,97
8	2170,00	2150,64	2,80	-19,36	2164,51	-5,49

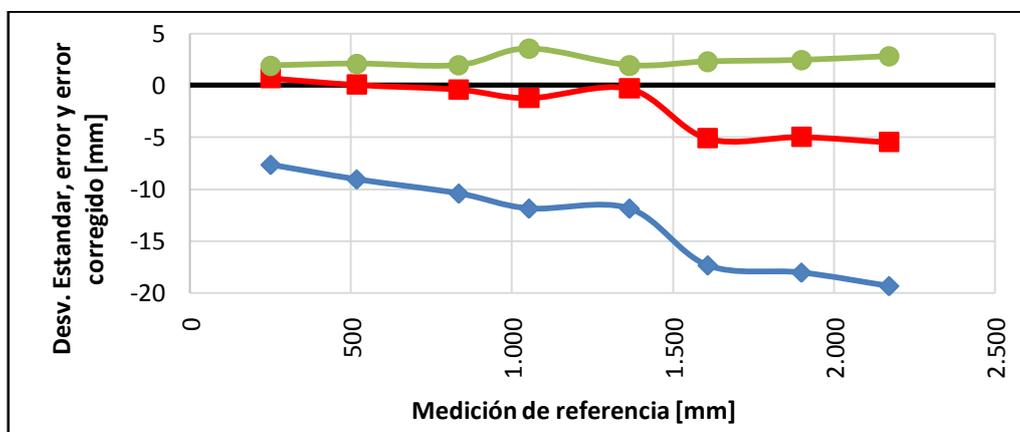


Figura 6.- Desviación Estándar, error y error corregido. Medición sobre agua en reposo.

Medición sobre agua agitada

La tercer prueba se hizo sobre la superficie de agua de una pileta con el sistema de filtrado encendido, lo que genera cierta agitación de la superficie con un flujo neto muy bajo. Se montó el sensor de ultrasonido junto al sensor de proximidad PASCO (Figura 7), y se hicieron 6 mediciones de 250 muestras cada una a distancias de entre 295mm y 1660mm.

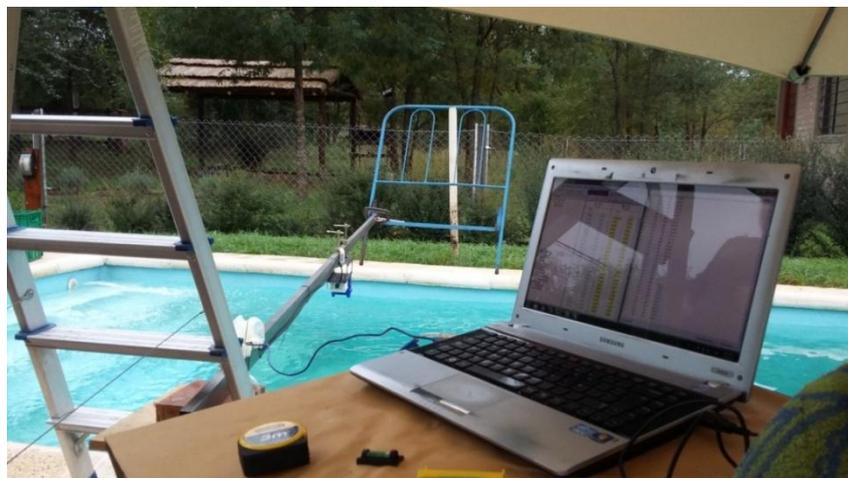


Figura 7.- Montaje. Medición sobre agua agitada.

Si se comparan los resultados de esta medición con respecto a la de agua en reposo, se observan dos diferencias importantes (Tabla 3). Primero, si bien aumenta la dispersión de las muestras notablemente para todas las distancias, la curva de la desviación estándar con respecto a la media es de menor pendiente con respecto a las mediciones anteriores. Y segundo, el error de la media con respecto a la medición de referencia disminuye notablemente, por debajo de 7mm. Esto se puede deber a que en esta medición se tomaron también 200 muestras de referencia para cada distancia y luego se calculó una media de referencia.

Obviamente, y por lo expresado en el párrafo anterior, si se corrigen estos valores con los criterios usados en las primeras dos mediciones, los errores aumentan y la corrección se vuelve errónea. Sin embargo, se puede corregir con los valores indicados por la recta de regresión de la Figura 8, correspondiente a la curva de valores medios de esta medición sobre agua agitada (ver correcciones en Tabla 3).

Tabla 3.- Medición sobre agua agitada.

MEDICION	MEDIDA REFERENCIAL (mm)	SENSOR (250 muestras)		ERROR (mm)	CORRECCION	
		Media (mm)	Desv. Estándar (mm)		Media corregida (mm)	Error (mm)
1	294,09	295,91	6,18	1,81	294,54	0,45
2	436,65	438,29	5,59	1,63	436,54	-0,12
3	675,22	679,68	7,74	4,46	677,28	2,06
4	885,21	886,40	6,50	1,20	883,45	-1,76
5	1084,28	1085,68	7,09	1,39	1082,18	-2,10
6	1654,22	1660,62	8,39	6,40	1655,57	1,35

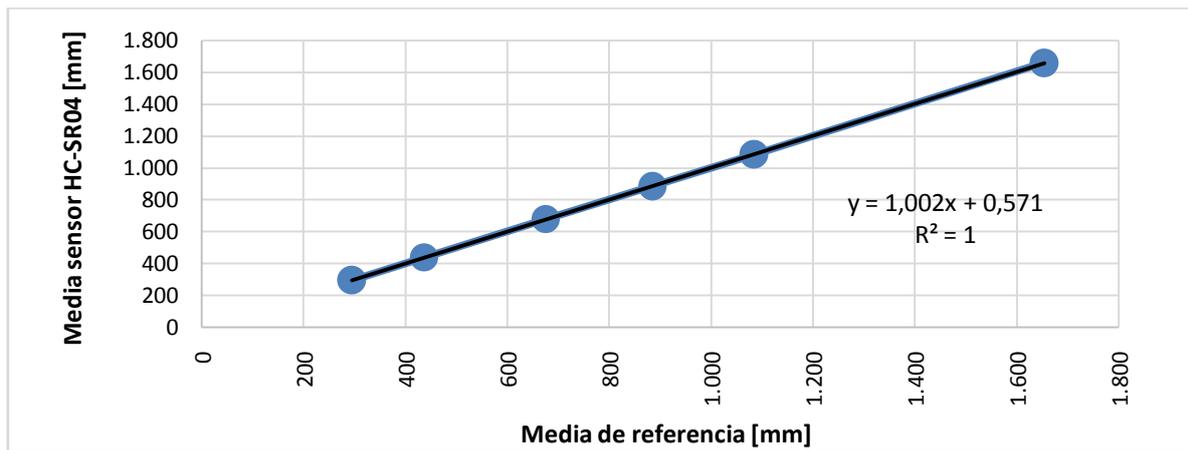


Figura 8.- Regresión lineal. Medición sobre agua agitada.

Medición sobre río

Por último, la cuarta prueba fue sobre la superficie del Río Santa Rosa, a la altura del Puente San Ignacio, sobre la Ruta Provincial 23, indicado en la Figura 9. El montaje del sensor fue el mismo que para la prueba anterior pero con un soporte de 5 metros de hierro estructural para poder llegar más cerca de la superficie del agua desde el puente (Figura 10).

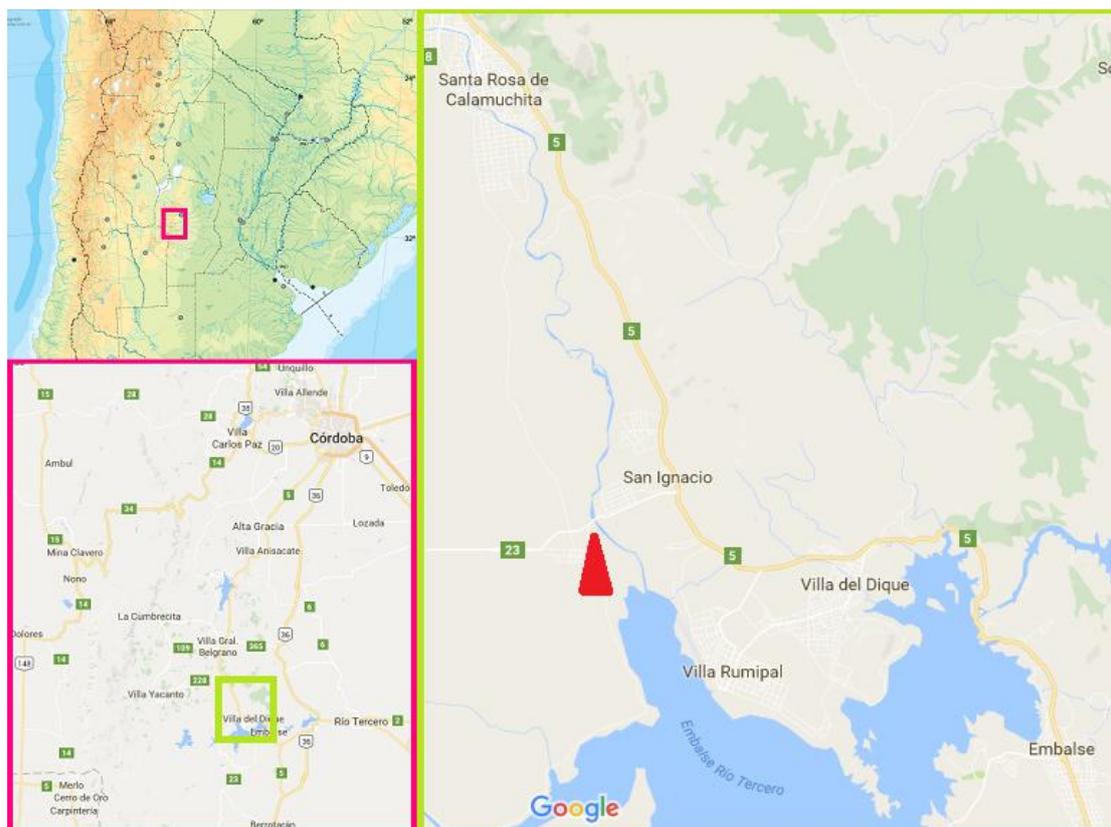


Figura 9.- Ubicación geográfica del puente San Ignacio sobre el Río Santa Rosa (32°09'30.4"Latitud Sur 64°30'43.6" Longitud Oeste).

La medición se hizo sobre 5 distancias distintas desde 1079mm hasta 4167mm con 150 muestras cada una. Los resultados muestran un comportamiento similar a las mediciones en la pileta, con una reducción de la

desviación estándar que se puede deber a que el día de la medición el río estaba calmo (Tabla 4). Los valores se corrigen de la misma forma que para la medición de agua agitada, según la recta de regresión de la Figura 11.

Tabla 4.- Medición sobre el Río Santa Rosa.

MEDICION	MEDIDA REFERENCIA (mm)	SENSOR (150 muestras)		ERROR (mm)	CORRECCION	
		Media (mm)	Desv. Estándar (mm)		Media corregida (mm)	Error (mm)
1	1079,33	1079,09	2,09	-0,24	1080,36	1,03
2	1540,88	1538,75	2,29	-2,14	1539,09	-1,79
3	2198,91	2203,48	3,31	4,57	2202,50	3,59
4	3356,47	3356,87	4,51	0,40	3353,59	-2,88
5	4167,73	4175,44	5,89	7,71	4170,52	2,79



Figura 10.- Montaje. Medición sobre el Río Santa Rosa.

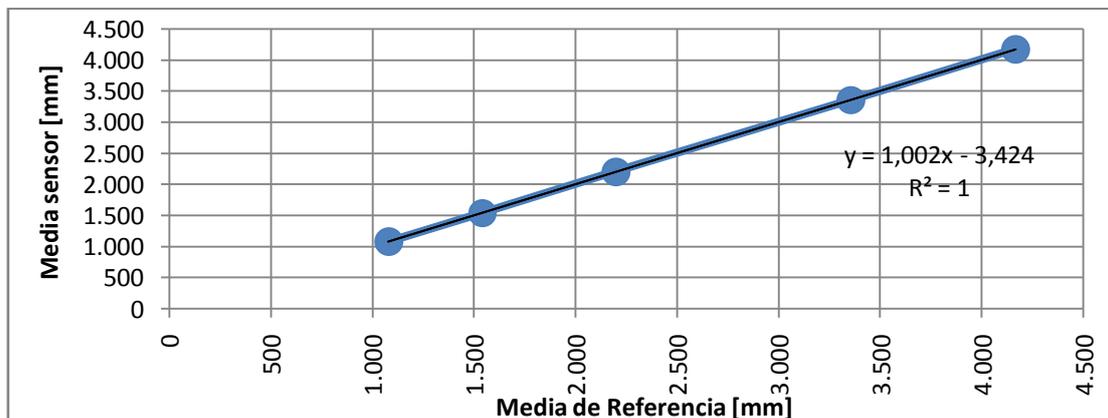


Figura 11.- Regresión lineal. Medición sobre el Río Santa Rosa.

CONCLUSIONES

Es notable la disminución del error en las mediciones cuando se usó como referencia el medidor de distancias de ultrasonido PASCO. Una posible causa es el método de medición. El medidor de distancias laser emite un haz de luz coherente que no asegura que la recta recorrida por la luz entre el emisor laser y la superficie reflectante, y que representa la distancia medida, sea exactamente perpendicular al plano de la superficie antes mencionada, aun cuando se tomen las medidas para lograrlo, generando un error extra en la medición de referencia. En cambio, el medidor de ultrasonido emite una onda sonora que al desplazarse genera un cono de 30°, que se refleja en el plano y regresa hacia el receptor para medir el tiempo de recorrido. La señal que llega al receptor (que se puede considerar que está en el mismo punto que el emisor) es la que recorrió la menor distancia ida y vuelta hacia la superficie reflectante, y por ende recorrió la trayectoria representada por la recta perpendicular al plano.

Otro criterio que disminuyó el error de las mediciones, fue el de mejorar la medida de referencia, tomando muchas muestras con el medidor de distancias de ultrasonido PASCO y promediándolas. Estas disminuciones del error se aprecian en la Figura 12, donde claramente disminuye para las últimas dos mediciones.

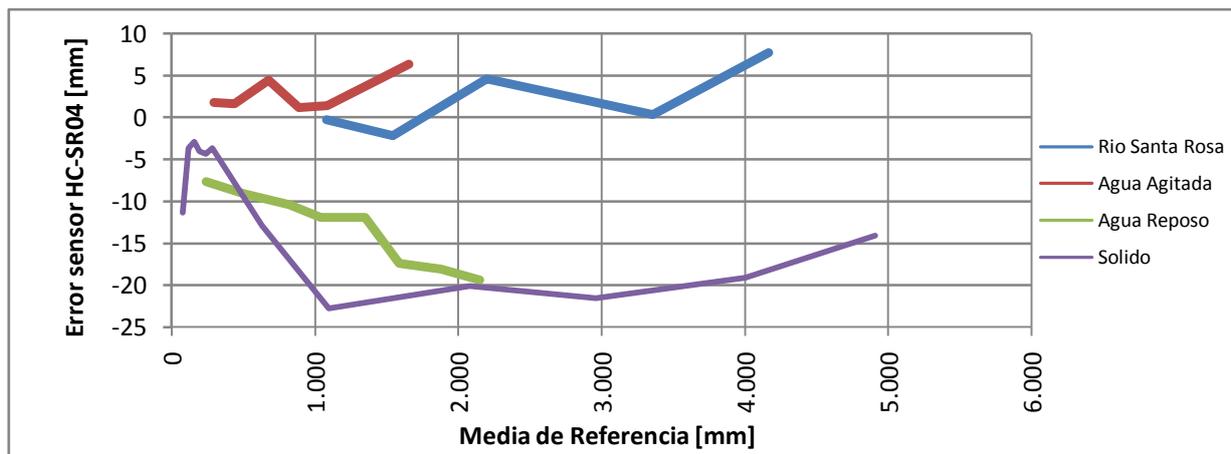


Figura 12.- Error para todas las mediciones

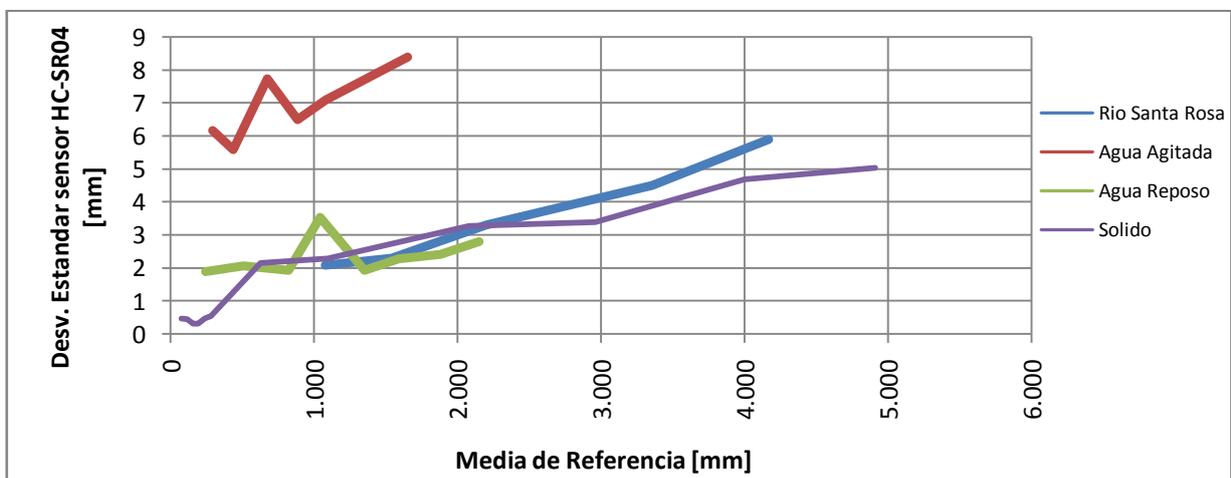


Figura 13.- Desviación Estándar para todas las mediciones

En cuanto al tipo de superficie reflectante, en la Figura 13 se puede ver que las superficies de agua agitada aumentaron la dispersión de las muestras sin alterar significativamente el error de medición, lo que resulta alentador, ya que promediando una cantidad adecuada de muestras se puede obtener un valor lo suficientemente exacto del nivel del río. También es para destacar que no existieron diferencias significativas en la dispersión de las muestras entre las mediciones sobre superficies sólidas y las mediciones sobre agua en reposo.

Otro factor sumamente alentador de este trabajo es que el análisis se hizo siempre en base a una resolución de 1mm, siendo que, el equipo final va a ser empleado en un entorno donde en muchos casos bastaría con algunos centímetros de resolución. Por ello, y teniendo en cuenta la exactitud del sensor, resulta innecesaria una corrección de las mediciones, pero de ser requerida se deben escoger los parámetros (pendiente y término independiente) de la Ec. (4) que brinden mayor versatilidad a las distintas condiciones de medición y características de los ríos.

Con respecto al método de medición, si bien resulta muy noble, no se puede pasar por alto que hay una fuente de error a tener en cuenta que es el medio por donde viaja la onda sonora. Aún cuando este medio es siempre el aire entre el sensor y la superficie del agua, la humedad y temperatura de éste pueden variar haciendo que la velocidad del sonido no sea constante y el cálculo sea erróneo. Por ejemplo, la velocidad del sonido varía desde 331m/s a 355m/s si se pasa de 0°C a 40 °C (Serway R. A. 2008), lo que provoca una diferencia de aproximadamente 70mm en la medición, en ese rango de temperaturas. Una posibilidad de disminuir éste error es medir constantemente la humedad y temperatura del aire y con este dato adecuar la velocidad del sonido. Otra alternativa, aún más simple, es utilizar otro sensor de ultrasonido apuntando a una superficie fija (por ejemplo una pared) con distancia constante y conocida, y deducir de éste un factor de corrección para aplicar al sensor que mide la superficie del río. Además resulta conveniente la instalación de una escala en la misma sección donde se coloca el sensor, para poder validar los datos tomados por el limnógrafo ultrasónico.

Queda pendiente un estudio profundo del hardware del sensor para poder ampliar el rango de medición mas allá de los 5m, dándole mayor versatilidad al equipo, teniendo en cuenta las distancias usuales entre los cursos de agua y los puentes o alguna estructura donde colocar el limnógrafo.

Por último, cabe destacar dos cuestiones importantes del desarrollo. Por un lado, se están llevando a cabo las tratativas para poder instalar el prototipo en forma permanente en tres o cuatro lugares diferentes, durante un periodo suficiente que permita la validación de las características definidas en este trabajo. Y por otra parte, se están definiendo algunas características del montaje del equipo final, principalmente para generar cierta versatilidad al momento de la instalación y una adecuada protección ante el vandalismo, siempre presente y amenazante para este tipo de equipos.

BIBLIOGRAFIA

- Barbeito O., Muracciole F., Raptópulos N, Rydzewski A. L.. 2014. *Riesgo de inundación en la cuenca baja del Río Carnero. Provincia de Córdoba*. IFRH 2014.
- Fatorelli S., Fernández P. C.. 2011. *Diseño Hidrológico*. Segunda Edición. Edición Digital. WASA-GN.
- Instruction Sheet 012-09625B. Motion Sensor PS-2103A*. PASCO scientific. USA.
- Lopez E. P.. 2012. *Captura y transmisión automática de datos hidro-meteorológicos*. Tesis de Maestría en Computación Aplicada a la Ciencia y la Ingeniería. Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.
- Raghumath H. M., 2006. *Hydrology. Principles, Analysis, Design*. Revised Second Edition New Age International (P) Ltd., Publishers.
- Sabbione N. C., Apartin C., Sarochar R., Andrinolo D., Rodríguez G., Cano L., Berisso F., Rossi J., Ronco A.. 2015. *Hacia la construcción de una red de monitoreo hidro-meteorológico en la región de La Plata, Berisso y Ensenada, Provincia de Buenos Aires*. IV Simposio sobre métodos experimentales en hidráulica.
- Serway R. A., Jewett J. W., 2008. *Física para ciencias e ingeniería. Volumen 1*. Séptima Edición. Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Ultrasonic Sensor HC-SR04. Product User's Manual*. 2013. V1.0. Cytron Technologies Sdn. Bhd.. Malasia.