

## DESARROLLO E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS PARA LA VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA OBRA HIDRÁULICA

Dardo Guaraglia, Pablo García, José Carner y Enrique Spinelli

Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP, Calle 47 n° 200, 1900 La Plata, República Argentina, [dguaragl@ing.unlp.edu.ar](mailto:dguaragl@ing.unlp.edu.ar)

### Resumen.

En este trabajo se describe el desarrollo, implementación, instalación y seguimiento de un sistema de recolección de variables hidráulicas, utilizado para la evaluación de los túneles Aliviadores del Arroyo Maldonado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA). Esta obra posee características particulares, que demandan un diseño específico del sistema, cuidados especiales en la selección e instalación de los instrumentos y en la recolección de los datos. Por este motivo, se desarrollaron parte de los instrumentos (pluviógrafos y limnógrafos) en la Facultad de Ingeniería, a fin de disponer del control de la tecnología y así poder adecuarla a los requerimientos especiales de la obra.

Se desarrollaron, probaron y calibraron en la facultad doce instrumentos. Se instalaron cinco pluviógrafos, cuatro limnógrafos, un barógrafo y un perfilador de velocidades. La facultad tuvo a su cargo la recolección de datos durante 10 meses en los que fue posible comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y así como registrar algunos eventos especiales.

En este trabajo se discuten los criterios de diseño e instalación de los instrumentos; la experiencia ganada en este trabajo; y se presentan los resultados de las mediciones comparados con los del modelo matemático utilizado para el diseño de la obra hidráulica. Se concluye que es fundamental disponer de desarrollos de instrumentos propios para adaptarlos a los problemas de ingeniería locales. Se observó además, que las mediciones en las obras hidráulicas producen una significativa retroalimentación en el conocimiento lo cuál permite mejores ajustes en los coeficientes empíricos de futuros proyectos, especialmente en obras de grandes dimensiones.

### Introducción

Los proyectos de Ingeniería Hidráulica de alta complejidad requieren la verificación del cumplimiento de las hipótesis de cálculo que llevaron a su concepción; y sólo las mediciones de los parámetros críticos en el campo, permiten validar las hipótesis de trabajo. Tal es el caso del Proyecto de los túneles Aliviadores del Arroyo Maldonado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Los conceptos fundamentales de diseño de esta obra han sido verificados en un modelo físico en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería; y el modelo a escala reducida ha demostrado un correcto funcionamiento de la obra antes de su construcción. Sin embargo, los mecanismos de transformación escorrentía – caudal y el funcionamiento supuesto de la descarga hacia los túneles podrían verse modificados por condiciones imprevisibles, tales como la incertidumbre en los niveles de descarga al Río de la Plata y la impermanencia de las mareas meteorológicas.

Por tal motivo, y con el fin de validar los modelos matemáticos que dieron origen al proyecto de ingeniería, era necesario instrumentar la obra y la cuenca que aporta a la misma, para determinar los movimientos de las masas de agua en los sistemas pluviales y la descarga a los túneles derivadores.

Una obra hidráulica de estas características, posee requisitos particulares de medición y de recolección de los datos, por lo cuál se requieren cuidados especiales en la selección e instalación de los instrumentos. Por este motivo, se consideró conveniente desarrollar en la Facultad de Ingeniería, parte de los instrumentos a utilizar (pluviógrafos y limnógrafos), ya que de esta manera se obtendría el control de la tecnología y la posibilidad de adecuarla a los particulares requerimientos de la obra.

### **Descripción del problema de medición**

Los instrumentos se debían instalar en una zona urbana y se encontrarían distribuidos en un área aproximada de 9920 hectáreas. Además de la lluvia y los niveles en varios puntos, era necesario medir caudales en la descarga al Río de La Plata, para lo cuál se debió seleccionar e instalar un caudalímetro.

#### ***Pluviógrafos***

La comparación del funcionamiento de la obra con su modelo matemático requería que los datos de lluvia se midiesen instantáneamente, evitando promediaciones. Los instrumentos comerciales convencionales, en general, poseen constantes de promediación que van desde algunos minutos a algunas horas.

Desde el punto de vista de la instalación de instrumentos de medición, las zonas urbanas tienen las ventajas siguientes: en general, la provisión de energía eléctrica para la alimentación de los equipos se encuentra fácilmente disponible y existe cobertura de telefonía celular, lo cuál permite la transmisión remota de los datos desde los instrumentos a una central de recolección de información. Es también una situación favorable que, al estar los equipos próximos entre sí, permiten su inspección y mantenimiento periódicos en un tiempo razonable. Entre las desventajas se pueden mencionar: que es difícil encontrar lugares en los cuáles las mediciones de lluvia no se encuentren perturbadas por construcciones o arboledas, y que los equipos se encuentran más expuestos a potenciales problemas de vandalismo.

#### ***Limnógrafos***

La instalación de los limnógrafos en los túneles requería una logística especial, ya que el Arroyo Maldonado se encuentra entubado y corre por debajo de la Avenida Juan B. Justo. El acceso a los lugares de instalación se efectúa a través de bocas de inspección que se encuentran en la calzada de la avenida. Por ello, para acceder a los equipos de medición se requiere una logística difícil de coordinar, dado que resulta necesario contar con personal autorizado para desviar el tránsito, personal de bomberos para acceder a las alcantarillas y personal municipal con experiencia en trabajos en el Arroyo. Esta dificultad en el acceso a los túneles limitó la inspección previa de los sitios en los cuales se debían instalar los equipos. La planificación de las instalaciones se basó, fundamentalmente, en planos. A veces, los planos carecen de la información actualizada necesaria para diseñar las instalaciones. Por lo tanto, para la colocación de los limnógrafos se requería cierta flexibilidad en su diseño, que permitiera que los problemas que pudieran surgir en el momento de la instalación fuesen resueltos "in situ".

#### ***Recolección y transmisión de los datos***

Los eventos que aportan la información de mayor utilidad para la evaluación de la obra hidráulica son eventos excepcionales que someten a la misma a solicitaciones extremas. Estos eventos son de períodos relativamente reducidos, por ejemplo, lluvias muy grandes en toda la cuenca, en pocas horas. Por lo tanto, era indispensable que los instrumentos estuviesen siempre en perfectas condiciones de funcionamiento para registrar estos sucesos que se producen pocas veces al año.

La recolección de datos de campo debía aportar información que permitiera ajustar el modelo matemático tal que, en el futuro, pudiera prevenir colapsos de la obra hidráulica ante eventos meteorológicos excepcionales de baja recurrencia. Entonces, si el modelo así ajustado, se corriese con datos en tiempo real, podría servir para alertar sobre la necesidad de evacuaciones. Esta futura aplicación del modelo requería diseñar los instrumentos para transmitir la información recogida en tiempo real.

## **Algunas características de los equipos desarrollados e instalados**

### ***Lluvia***

Para medir la intensidad de la lluvia a cada instante se construyeron pluviógrafos que utilizan un cangilón basculante como sensor; cada vuelco del cangilón representa un volumen de agua conocido. En los pluviógrafos tradicionales se suman los vuelcos del cangilón en un período de tiempo determinado. En nuestro caso, para poder registrar la intensidad instantánea, se grabó la hora, minuto y segundo de los instantes en los cuales se producía cada vuelco. Para guardar los datos, los equipos utilizan memorias de estado sólido no volátiles, las cuales permiten varios años de almacenamiento.

Tanto para los pluviógrafos como para los limnígrafos se desarrolló un circuito de bajo consumo, con una puerta de comunicaciones que permite programar la adquisición de datos y la extracción de los mismos con una notebook. Estas funciones también pueden efectuarse en forma remota, desde una PC instalada en una oficina, por medio de telefonía celular. Se previó asimismo que, en caso de aparecer algún problema de funcionamiento de la notebook en el campo, fuese posible reemplazar la memoria de estado sólido por una vacía y poder recuperar la información en la oficina.

Las baterías seleccionadas para los equipos tienen una autonomía de más de dos meses en el caso que se cortara el suministro de energía eléctrica. En uno de los lugares en los cuales había comunicación telefónica y no se disponía de energía eléctrica domiciliaria fue necesario utilizar un panel solar.

### ***Nivel de agua***

Para medir el nivel de agua en los túneles se seleccionaron sensores de presión sumergibles, que reciben alimentación y transmiten el dato por medio de un cable. La salida de los sensores es analógica de 4 a 20 mA; lo cual permite colocar el sensor a gran distancia del circuito adquisidor de datos. Esta característica es esencial, dado que la instalación de los sensores debía realizarse en los canales subterráneos que son inundables. Los circuitos electrónicos debían colocarse en la superficie, en un lugar que resultara cómodo para su alimentación con energía eléctrica y para la recolección periódica de datos. El rango de medición de los sensores debía ser de 7 m de columna de agua con un error máximo admisible de  $\pm 0,01$  m.

Este tipo de sensores, robustos, de uso industrial, presentan un consumo elevado para equipos remotos si son utilizados en forma continua, y requieren tensiones de alimentación de 12 V o superiores. Para integrarlos al sistema de medida se desarrolló especialmente un convertidor que genera la tensión de alimentación a partir de la batería disponible y que a su

vez puede ser encendido/apagado por el microcontrolador que realiza la adquisición. De este modo el sensor sólo se alimenta en los instantes de medida, resultando en un bajo consumo promedio.

Existen dos tipos de sensores de presión que se podrían utilizar para medir niveles; ellos se conocen como tipo galga y tipo diferencial. La salida del primero es una corriente proporcional a la suma de la columna de agua sobre el sensor más la presión barométrica. La del segundo es sólo proporcional a la columna de agua. La presión barométrica puede variar en el orden de  $\pm 0,1$  m respecto de la presión media, por lo cuál el error introducido por el primer tipo podría resultar mucho mayor que el error admitido.

Para descontar la presión atmosférica en los sensores de tipo galga es necesario medirla con otro sensor y substraerla luego en el proceso de cálculo. El sensor de tipo diferencial posee un tubo incorporado en el cable que permite que la presión atmosférica llegue al sensor, compensando las variaciones automáticamente.

En un análisis preliminar parecía conveniente utilizar los sensores de tipo diferencial pero se encontró bibliografía que comentaba las dificultades en la compensación de la presión atmosférica cuándo se utilizan tramos largos de cable en lugares con alta humedad. Una gotita de agua condensada en el interior del tubo puede impedir la correcta compensación de la presión barométrica. Un paliativo al problema consiste en colocar el extremo del tubo por el cuál se refiere el sensor a la presión atmosférica, a través de un recipiente en el cuál se coloca silicagel. Esta solución requiere el reemplazo periódico del silicagel, lo cuál es difícil de efectuar en el campo, fundamentalmente con clima lluvioso.

Los sensores diferenciales se debían solicitar a la fábrica con el largo de cable necesario para cada instalación, dado que dentro del cable se encuentra la manguera compensadora de presión atmosférica. La dificultad para acceder a inspeccionar los túneles, impedía conocer la distancia que separaría a los sensores de los circuitos adquirentes. Por otra parte, si se sobredimensionaba el largo de los cables, se incrementaba la probabilidad de condensación de humedad en el tubo compensador y se aumentaban significativamente los costos. Estos problemas llevaron a evitar el uso de los sensores diferenciales.

Se optó por el sensor tipo galga ya que la longitud del cable podía ajustarse en el campo, en el momento de la instalación, y porque al tratarse de una cuenca relativamente pequeña, con un único sensor de presión atmosférica era posible compensar todas las mediciones de nivel.

### ***Caudal de salida***

Se deseaban conocer los caudales descargados al río a través de uno de los túneles ya construidos; el canal por el cuál descargan dichos caudales posee 14,5 m de ancho, y el nivel del agua puede alcanzar 6,5 m. Se seleccionó para esta aplicación un instrumento que, colocado en el fondo del canal, mide el perfil de velocidades en un plano vertical paralelo al eje del canal. El instrumento se colocó en el centro separado del piso para evitar que al depositarse el material en suspensión pudiera cubrir los sensores. El equipo utiliza tres sensores acústicos que emiten pulsos y reciben el eco difractado en las partículas en suspensión. El corrimiento en frecuencia debido al efecto Doppler de las señales recibidas permite conocer la velocidad de las partículas. El instrumento puede medir velocidades de hasta 5 m/s y mide, además, el nivel de agua; por medición del tiempo de tránsito de la onda acústica, discrimina espacialmente las velocidades según la distancia al instrumento, hasta en diez celdas.

### ***Recolección y transmisión de los datos***

Se estableció que la recolección de los datos y la inspección del equipamiento se efectuara cada dos semanas para minimizar la posibilidad de pérdidas de datos, ya que los

pluviógrafos pueden sufrir el taponamiento del embudo captor de lluvia debido a hojas, insectos, telas de araña y nidos de aves.

Para probar la capacidad de los instrumentos de transmitir la información, se implementaron dos estaciones con transmisión remota vía telefonía celular, una pluviográfica y una limnigráfica. Estas estaciones poseían un consumo de energía bastante mayor que las otras estaciones debido al consumo del teléfono celular.

### Instalación de los equipos

En la Facultad, se desarrollaron, probaron y calibraron doce instrumentos, lo que permitía tener equipos de respaldo en caso que alguno sufriera un problema. Se instalaron cinco pluviógrafos, cuatro limnigrafos, un barógrafo y un perfilador de velocidades. Éste último se adquirió en el exterior. En la Figura 1 se muestra un mapa de CABA delimitando en rojo la cuenca instrumentada y los puntos en los cuales se instalaron equipos. En la Figura 2 se muestran la instalación de un pluviógrafo, un limnógrafo y un caudalímetro.

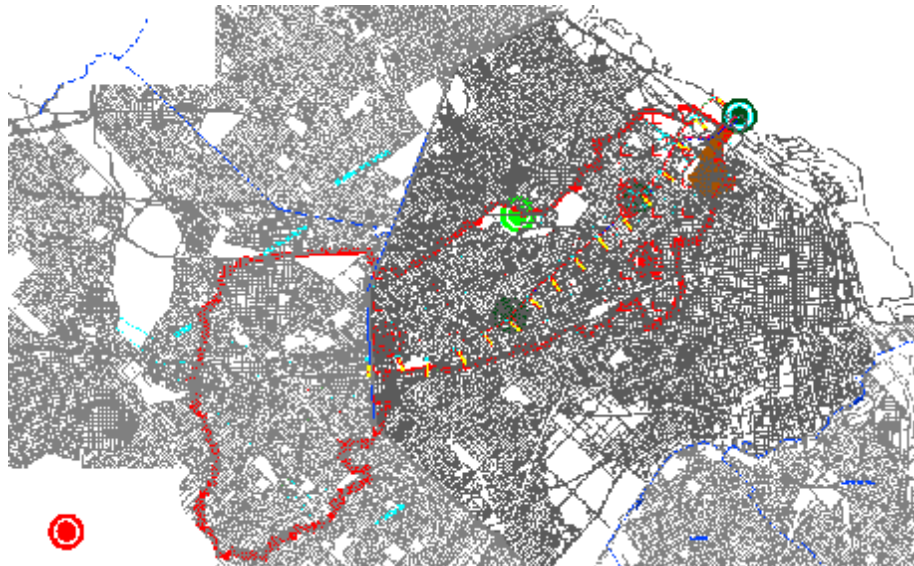


Figura 1. Mapa de CABA. Se muestran la cuenca y los puntos de instalación de equipos.

### Experiencias sobre el funcionamiento de los equipos

Algunos equipos se comenzaron a instalar entre los meses de Abril y Agosto de 2010, completándose la instalación en noviembre de 2011. Al momento de redactarse este trabajo se encuentran aún en funcionamiento. La Facultad tuvo a su cargo la recolección de datos durante 10 meses en los que se pudo comprobar el correcto funcionamiento de los equipos, observándose pocas fallas y una alta tasa de efectividad en la recolección de datos.

Entre los inconvenientes se encontraron que: uno de los pluviógrafos fue vandalizado al poco tiempo de instalado; en una oportunidad, tras una tormenta con vientos importantes, el embudo de uno de los pluviógrafos fue obturado parcialmente por una cantidad importante de insectos.

Contrariamente a lo que se suponía, ni los sensores de presión ni el caudalímetro sufrieron problemas derivados del material de arrastre del canal, por lo cuál se concluyó que las instalaciones de los instrumentos, diseñadas a con el fin de protegerlos, resultaron adecuadas.





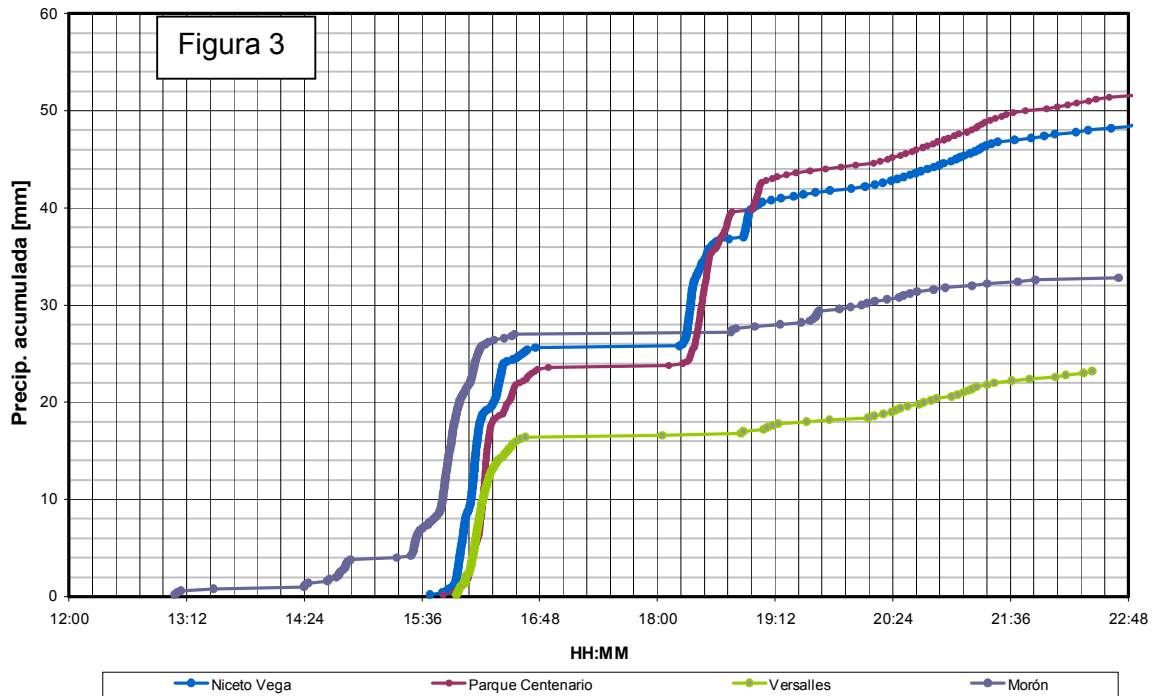
Fotografía superior izquierda, pluviógrafo en Niceto Vega; superior derecha, limnógrafo en Arroyo Madonado, abajo, caudalímetro en canal de descarga.

## Resultados

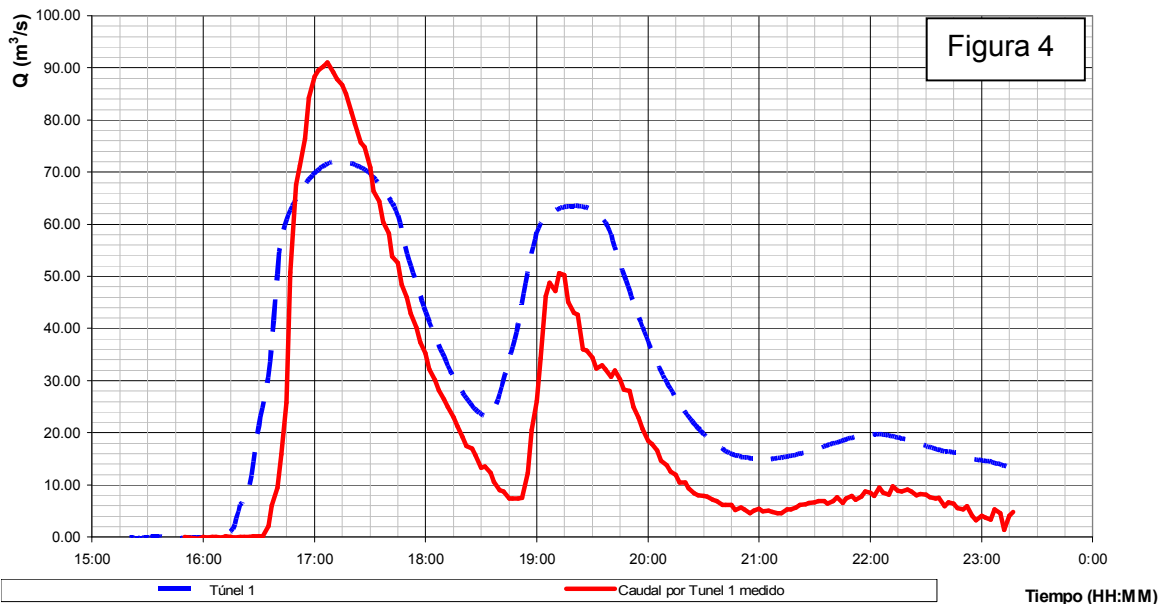
En la Figura 3 se muestran datos de los pluviógrafos que permiten apreciar la coincidencia de los tiempos de inicio de una tormenta y las intensidades de lluvia en distintos lugares de la cuenca. Además, permite apreciar las diferencias entre los registros de cada estación que difieren de las condiciones modeladas originalmente para el proyecto. Esta tormenta del 5 de marzo de 2.012 generó un caudal dentro del canal semejante a la máxima capacidad de erogación. Esta es una situación particular muy interesante para la verificación del funcionamiento.

La Figura 4 muestra la respuesta de la obra comparada con el modelo matemático. La validación del modelo se realizó, y continúa realizándose, por medio de las mediciones sistemáticas de datos. La línea punteada azul corresponde a la respuesta del modelo, en tanto que la línea roja continua corresponde a los datos medidos por los equipos.

Departamento Hidráulica UNLP - Adquisición de Datos de Lluvia  
 Fecha : 05 de Marzo de 2.012



Comparación de caudales erogados a través del Túnel 1  
 Evento del 05/03/2012



### Conclusiones

Los valores medidos y calculados confirman que se necesitan ajustes menores en los procesos de derivación desde el canal al Túnel de descarga, pero los volúmenes de agua derivados son suficientemente semejantes, resultando la capacidad de descarga real más eficiente que la calculada.

Las mediciones en las obras hidráulicas, pre y post construcción, son tan necesarias como un buen proyecto de ingeniería; ellas producen una significativa retroalimentación en el conocimiento de la ingeniería hidráulica y el acceso a mejores ajustes en los coeficientes empíricos de los futuros proyectos, especialmente en obras de grandes dimensiones.

### **Bibliografía**

Oke, T.R. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites, World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, report No. 81, WMO/TD-No. 1250, 2006.

Liscia S., R. Amarilla, M. Angulo, M. del Blanco, R. Mazzei, R. Coman, "Ensayos en Modelos Físicos de diagnóstico, verificación y optimización del funcionamiento de las Obras de Derivación y Desembocadura proyectadas por la Ciudad de Buenos Aires para el Aliviados del Arroyo Maldonado", Departamento de Hidráulica, F.I. U.N.L.P., 2006.

Liscia, S, J. Carner, D. Grigera y R. Mazzei, "Obra de Desembocadura del Arroyo Maldonado, Estudio de Variantes Propuestas, Informe Final, Optimización En Modelo Físico", Departamento de Hidráulica, F.I. U.N.L.P., 2008.

Liscia, S., J. Carner, R. Mazzei, D. Guaraglia, P. García, "ESTUDIOS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LAS OBRAS DE LOS ARROYOS MALDONADO, VEGA Y MEDRANO DE LA CIUDAD DE BUENOS AIRES ", Departamento de Hidráulica, F.I. U.N.L.P., 2011.