

Water proportional meters used as a tool for integrated water management

Guillermo Andrés Fuentes Barrera y Jhoniers Guerrero Erazo*

*Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento, Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad Tecnológica de Pereira. La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia.*

Tel 57-6-3137246 jhguerre@utp.edu.co

Abstract

Good water management is based on the measurement of water flows at different places of the water supply system: water intake, influent and effluent of treatment plants, inlet and outlet of storage tanks, etc. This research aimed to calibrate a proportional flow meter device prototype in order to establish it as a reliable, low-cost, easily suitable for construction, and low maintenance requirement alternative for flow measurement. As a first activity, the flow rate of the device was determined (flow higher than $4.03 \text{ m}^3/\text{h}$) but the average error was too high (estimated in 21%). After this, regression models were established in smaller flow intervals in order to determine the error for each interval range. Finally, using this information, an optimal flow (higher than $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$, with an error of 8.2%) was determined. The results showed that the proportional flow meter device is an accurate alternative to measure the water flow at different places of water supply systems for rural communities or small towns. It was demonstrated that construction, installation and operation costs of the device is lower in comparison with mechanical flow meters.

Key words: Water management, water measurement, proportional water measurement, low-cost.

La macromedición de agua de tipo proporcional como una herramienta para la gestión integral del recurso hídrico

Resumen

Una adecuada gestión del agua se basa en la medición de los caudales utilizados en los diferentes lugares del sistema de abastecimiento: salida bocatoma, entrada y salida de la planta de tratamiento de agua, entrada y salida de tanques de almacenamiento, etc. La presente investigación calibró un prototipo de medición de agua de tipo proporcional de tal manera que se convierta en una alternativa tecnológica de medición confiable, de bajo costo y fácil construcción y mantenimiento. En primer lugar, se determinó el caudal de funcionamiento del prototipo (caudales mayores a $4.03 \text{ m}^3/\text{h}$) con un promedio de error demasiado alto (estimado en 21%). Por tal razón se evaluaron intervalos de caudal más pequeños, con su respectivo modelo de regresión determinando el error en cada intervalo. A partir de esta información se determinó el caudal óptimo de funcionamiento ($9.21 \text{ m}^3/\text{h}$ y un error de 8.2%). Los resultados indican que el medidor de tipo proporcional es una alternativa de medición de caudal que puede ser instalada en diferentes lugares del sistema de abastecimiento de agua de pequeñas localidades o zonas rurales, otra ventaja es el bajo costo de construcción, instalación y mantenimiento del prototipo de medición respecto a medidores de agua mecánicos.

Palabras clave: Gestión del recurso hídrico, medición de agua, medidor de tipo proporcional, bajo costo.

Introducción

En Colombia los municipios menores (menos de 12.000 habitantes) y zonas rurales presentan altos índices de ineficiencia en la prestación del servicio aprovisionamiento de agua, reflejado en el Índice de Agua No Contabilizada (IANC) que está por encima del 51%, excediendo el valor máximo del 30% permitido por la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), problema que se agudiza si tenemos en cuenta que en Colombia existen más de 860 municipios en esta categoría [1]. La principal causa de este problema es el poco acceso y disponibilidad a recursos tecnológicos, económicos y administrativos de las empresas prestadoras de servicios en pequeñas localidades y/o zonas rurales del país, los cuales son fundamentales para mantener un control eficiente y eficaz en los sistemas de distribución de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, la macromedición de agua se convierte en una herramienta fundamental para contribuir al mejoramiento tecnológico, administrativo y económico de las empresas, entendiendo la macromedición como el conjunto de equipos, elementos y actividades que permiten obtener, analizar y divulgar datos operacionales relativos a los caudales, volúmenes, presiones y niveles de agua en los sistemas de abastecimiento [2]. Pero en la implementación de un sistema de medición se deben formular y responder las siguientes preguntas ¿Por qué medir?, ¿qué medir?, ¿cómo medir?, ¿con qué frecuencia?, ¿qué instrumentos utilizar?, ¿qué procedimiento operacional aplicar?, y ¿qué modelo de análisis utilizar? [3]. Respondiendo algunas de estas preguntas la presente investigación tiene como objetivo el desarrollo y calibración de un medidor de agua de tipo proporcional que forma parte de los medidores deprimógenos denominados así porque *“presentan una reducción gradual o brusca de la sección de flujo en movimiento, ocasionando con esto un aumento de la velocidad y disminución de la presión en el fluido”* [4], convirtiendo este tipo de medidores en una alternativa tecnológica confiable y competitiva frente a otros sistemas de medición y que pueda ser implementada en los municipios menores y/o en las zonas rurales de Colombia, colaborando con el control operacional de los sistemas de suministro de agua.

Con la calibración y estandarización de este tipo de tecnologías se contribuye al manejo integral del recurso hídrico, a través de la gestión de las pérdidas de agua mediante el monitoreo de los volúmenes de agua utilizados en los diferentes componentes del sistema de aprovisionamiento de agua (captación, tratamiento, almacenamiento y redes de distribución). Los instrumentos más utilizados para la medición de caudal en los sistemas de abastecimiento son los contadores de velocidad y volumétricos. Los principales problemas asociados a estos medidores de agua son: el costo del instrumento de medición, la complejidad en la instalación y reparación del equipo in situ y el incorrecto dimensionamiento del medidor a instalar, que puede incrementar el deterioro de las partes internas cuando hay caudales excesivamente altos y/o el subdimensionamiento del volumen de agua por bajos caudales [5].

Desarrollo Experimental

Banco de pruebas

En esta etapa se realizó el diseño y construcción del banco de pruebas utilizado para el desarrollo y calibración del prototipo de macromedición (Figura 1). Este consta de un tanque de un metro cúbico (A) el cual está conectado a una bomba con diferencial y un variador de velocidad (B), que permite controlar el caudal y la presión de agua a suministrar en la tubería que se conecta a ella y en la cual se encuentra el prototipo de medición de caudal (C). La verificación del caudal circulante por la tubería se efectuó con la instalación de un medidor ultrasónico portátil (D) en la tubería principal, marca DYNASONICS, el cual tiene una incertidumbre en la medición de $\pm 0.5\%$, de acuerdo al certificado de *calibración* C6 - 012830 y calibrado según la norma ISO DAS-206-003. Además el banco de pruebas tiene un sistema de recirculación de agua para mantener el caudal y la presión constantes.

Prototipo de medición de tipo proporcional

Para el diseño del medidor de caudal de tipo proporcional se modificó el esquema encontrado en el documento D2 de macromedición del Programa Nacional de Combate en el Desperdicio de

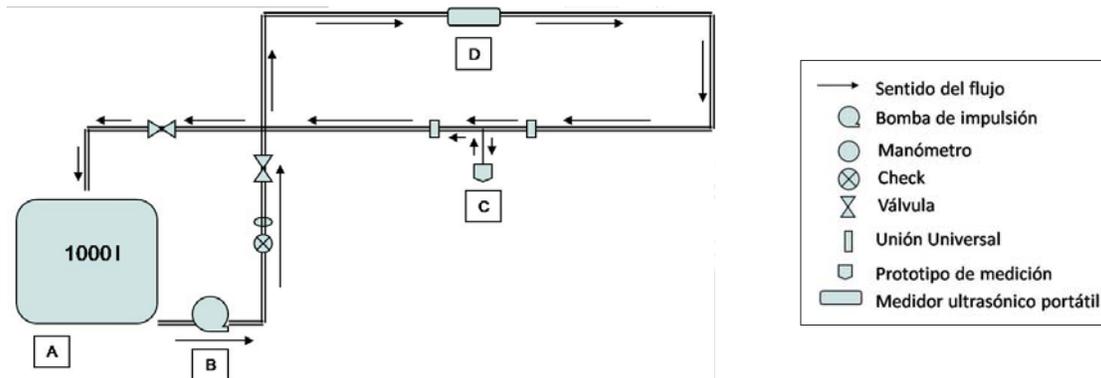


Figura 1. Esquema banco de pruebas.

agua del Brasil [3]. El prototipo de medición consiste en una tubería de 1/2 pulgada que sale por un lado y entra por el lado opuesto de una tubería de 4 pulgadas. En la tubería de 1/2 pulgada se instaló una válvula de cierre y dos checks para garantizar la dirección del flujo en un solo sentido, de igual manera se instaló un medidor de velocidad chorro único clase C para registrar el volumen de agua que pasa por la tubería. Todos los accesorios instalados son de 1/2 pulgada (Figura 2 -corte transversal). El tubo de 1/2 pulgada tiene 7 orificios para la entrada de agua, de los cuales 3 son de 11/32 de pulgada y 4 de 3/16 de pulgada de diámetro. Para la salida de agua el tubo de 1/2 pulgada tiene 4 orificios de 11/32 de pulgada de diámetro (Figura 2 -corte longitudinal). Se seleccionó un medidor de agua de velocidad tipo chorro único porque tienen una buena resistencia a la presencia de sólidos suspendidos, son pocos sensibles al perfil de velocidades entrante reduciendo los requerimientos de espacio en su instalación, es una tecnología fiable utilizada durante muchas décadas, y tienen un bajo costo en el mercado [6].

Medición y registro de la información

En esta fase de la investigación se determinó el rango de trabajo mínimo y máximo de caudal y presión para el prototipo de medición, teniendo en cuenta factores como: caudal de arranque del prototipo, la capacidad de la bomba y el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) [7]. Con base en lo anterior se estableció que el rango de caudal a evaluar está entre 4.03 y 18 m³/h, que respectivamente corresponden: al caudal mínimo medido en la tubería principal, a partir del cual empieza a funcionar y registrar datos el mi-

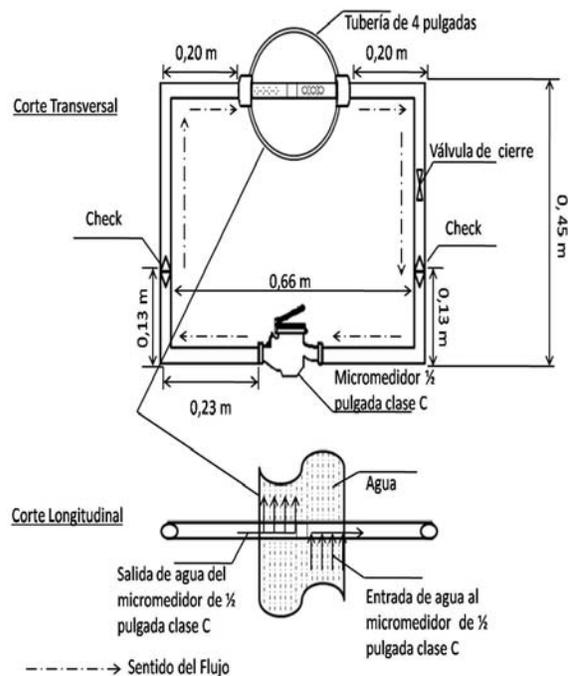


Figura 2. Esquema medidor proporcional.

cromedidor de 1/2 pulgada instalado en el prototipo de medición de agua y a la capacidad máxima de caudal de la bomba. El rango de presiones a evaluar varía entre 15 y 41 metros columna de agua (mca), que corresponde a la presión mínima de servicio exigida por el RAS 2000 y la capacidad máxima de la bomba respectivamente.

Las mediciones se realizaron durante una hora registrando datos cada 5 minutos, siguiendo el método utilizado por Espirito do Santo [8]. Antes de iniciar las mediciones se esperó a que se estabilizara el sistema durante 10 minutos. Para

confirmar la presión del agua en la tubería se instalaron manómetros en el banco de pruebas, de igual forma se instaló un caudalímetro de flujo ultrasónico con el objetivo de verificar el caudal de agua que circula por la tubería.

Análisis de la información

Como el propósito del prototipo de macro-medición es registrar el volumen de agua, es importante determinar un modelo, factor y/o gráfico que relacione el volumen total de agua que pasa por la tubería de 4 pulgadas (*voltotal*) (variable dependiente), respecto al volumen de agua que pasa por el micromedidor (*volmicro*) ubicado en el prototipo de medición, con *presiones y caudales* de agua (variables independientes) seleccionadas aleatoriamente para conocer su comportamiento y determinar la importancia de cada una de ellas en el modelo. Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionó el análisis de regresión lineal múltiple como la técnica estadística a utilizar para analizar la información porque permite estudiar la relación entre una variable dependiente o criterio y una o más variables independientes o predictoras [9]. Se usó el paquete estadístico SPSS 15 para llevar a cabo el análisis de regresión lineal con el fin de desarrollar de una ecuación lineal con fines predictivos.

Resultados y Discusión

En primer lugar se determinó que el caudal de arranque del prototipo de medición es de 4.03 m³/h (1.12 l/s). Es decir, que a partir de este caudal el medidor de agua empieza a funcionar y a registrar datos, cuando se presenten caudales inferiores a este el medidor dejará de contabilizar el volumen de agua que esta circulando por la tubería, el caudal nominal (Q_n) es de 9 m³/h y el caudal máximo (Q_{max}) de trabajo estudiado en el laboratorio es de 18 m³/h, correspondiendo con el caudal máximo suministrado por la bomba, pero puede trabajar en rangos superiores de caudal. Según Palau [5] este medidor de agua se definiría como un micromedidor de agua porque el Q_n es menor a 15 m³/h, pero también se puede considerar un macromedidor porque este podrá ser instalado en la captación, a la entrada y salida de plantas de tratamiento de agua potable y en la entrada y salida de tanques de almacenamiento, siempre

y cuando no existan caudales inferiores a 4.03 m³/h durante la operación y funcionamiento del sistema de abastecimiento de agua, ya que se dejaría de contabilizar el volumen de agua durante el periodo de tiempo que se presente este caudal.

El análisis de los datos registrados en laboratorio se realizó utilizando un modelo de regresión lineal múltiple con el fin de encontrar la relación entre la variable dependiente volumen total (*voltotal*), que representa todo el volumen que circula por la tubería principal, respecto al volumen de agua que circula en la tubería de ½ pulgada del prototipo de medición utilizando las siguientes variables independientes: volumen del micromedidor (*volmicro*), *caudal* y *presión* de agua.

El tamaño de la muestra fue de 242 muestras cada una con 13 repeticiones, en total se recolectaron 3146 datos. El método utilizado para realizar la regresión lineal múltiple es el de pasos sucesivos o "stepwise". Se seleccionó este método porque permite la construcción de la ecuación de regresión múltiple, seleccionando en primer lugar la mejor variable, es decir, la que mejor se correlacione con la variable dependiente, teniendo la ventaja de admitir que una variable seleccionada pueda ser eliminada en el análisis subsiguiente [10]. El método empleado va descartando las variables que no cumplan con los criterios estadísticos requeridos.

En la Tabla 1 se observa el cambio en el coeficiente de determinación (R^2) de cada una de las variables independientes o predictoras. En el modelo 1 se estudia únicamente la relación entre la variable independiente del volumen del micromedidor (*volmicro*) y la variable dependiente *voltotal*. El modelo tiene un $R^2 = 0.941$, y como tiene una probabilidad de $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula de que el valor de R es cero en el modelo, indicando que la variable es relevante dentro de la ecuación de regresión. Por tanto, se puede afirmar que la variable *volmicro* contribuye en un 94.1% a explicar la varianza de la variable dependiente volumen total (*voltotal*) que corresponde al volumen total de agua que circula por la tubería principal. Posteriormente en el modelo 2 se incorpora la variable *caudal*, es decir, se analiza la relación entre las variables predictoras *volmicro* y *caudal* y la variable *voltotal*. En este modelo $R^2 = 0.951$ y como $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula de que el valor de R es cero en el modelo,

Tabla 1
Resumen del modelo

| Modelo | R | R cuadrado corregida | Estadísticos de cambio | | | |
|--------|----------|----------------------|------------------------|------|------|----------------------|
| | | | Cambio en R cuadrado | *gl1 | *gl2 | Sig. del cambio en p |
| 1 | 0.970(a) | 0.941(a) | 0.941 | 1 | 3144 | 0.000 |
| 2 | 0.975(b) | 0.951(b) | 0.009 | 1 | 3143 | 0.000 |
| 3 | 0.975(c) | 0.951 (c) | 0.001 | 1 | 3142 | 0.000 |

a Variables predictoras: (Constante), volmicro. b Variables predictoras: (Constante), volmicro, caudal. c Variables predictoras: (Constante), volmicro, caudal, presión. d Variable dependiente: volttotal. p Probabilidad. *Grados de libertad Fuente: Elaboración propia.

afirmando que las variables son relevantes en la ecuación de regresión y que la variable de caudal incorporada en el modelo 2 contribuye a mejorar en un 1% la explicación de la varianza en la variable dependiente *voltota*.

En el tercer y último modelo se analiza la relación entre las variables independientes *volmicro*, *caudal* y *presión* y la variable dependiente *volttotal*. Este modelo tiene un $R^2 = 0.951$ indicando que la variable de *presión* incorporada en el modelo mejora la explicación en la variación de la variable independiente en 0.001%, y como $p < 0.05$ se puede afirmar que el modelo contribuye de forma significativa a explicar el comportamiento de la variable dependiente. En conclusión, se puede decir que las tres variables seleccionadas (*volmicro*, *caudal* y *presión*) en conjunto consiguen explicar en un 95.1% la variabilidad observada en la variable dependiente (*volttotal*).

Teniendo en cuenta que la técnica de regresión por pasos sucesivos o stepwise seleccionó las variables de *volmicro* y *caudal* para ser incluidas en la ecuación del modelo de regresión y que este cumple con los supuestos de un modelo de regresión lineal múltiple, se decidió incluir únicamente como variable predictora *volmicro* porque es la que mejor explica el cambio de la variable dependiente (*volttotal*) con un 94.1%, ya que la inclusión de la variable *caudal* mejora la explicación de la variable dependiente en 1% que en total sería 95.1%, cambio que no es muy significativo, pero que en campo obligaría a medir constantemente el caudal de agua que esta pasando por la tubería principal, objeto mismo del prototipo de medición de agua.

En la Figura 3 se presenta la dispersión de los datos entre las variables dependiente (*volt-*

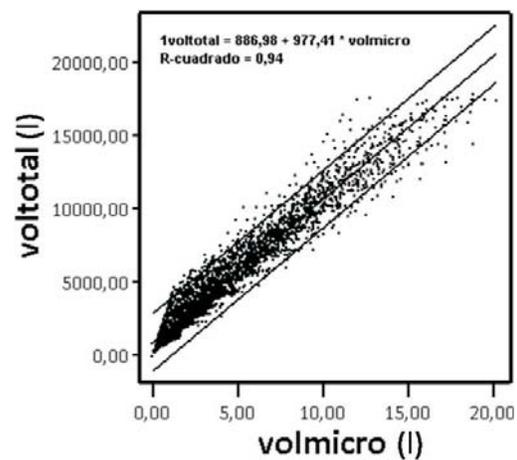


Figura 3. Dispersión entre la variable dependiente (*volttotal*) y la variable predictora (*volmicro*).

tal, eje y) e independiente o predictora (*volmicro*, eje x), eliminando el efecto de las demás variables, observando que hay una relación lineal y positiva, entre las variables, es decir, existe correlación entre las dos variables analizadas.

En la ecuación 1 se puede apreciar que a cada valor de *volmicro* le corresponde un incremento constante de 886.98 unidades más 977.41 por el valor de *volmicro* con un nivel de confiabilidad del modelo del 95%, es decir, que ésta es la probabilidad de que el modelo contenga el valor verdadero de los datos registrados en el laboratorio.

$$volttotal = 886.98 + 977.41 * volmicro \quad (1)$$

Sin embargo como este modelo se utilizará para el pronóstico de datos de volumen de agua,

se debe calcular el Porcentaje de Error Medio Absoluto (PEMA) del pronóstico del modelo de regresión, que corresponde a un 21% respecto al valor real en este caso, siendo excesivamente alto comparado frente al porcentaje de error de un medidor de agua volumétrico y/o de velocidad (comerciales) que está entre ± 2 y 5% para los caudales especificados [5]. Por tal razón y para disminuir el error se decidió construir intervalos de caudales determinando un modelo de regresión y el error del pronóstico para cada intervalo. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

De igual manera se procedió a determinar la curva de error del prototipo de macromedición (Figura 4), de la cual se puede concluir que el ma-

yor porcentaje de error en la medición se presenta en caudales bajos ($4.03 - 5.61 \text{ m}^3/\text{h}$) con un 26%, siendo consecuentes con los resultados encontrados en el estudio realizado por Palau [5]. Los caudales de funcionamiento óptimos encontrados para el prototipo de medición son los superiores a $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$, con un error que se encuentra entre 8.2 y 8.6%. Por tanto se recomienda la utilización del prototipo para medir en los diferentes componentes del sistema de abastecimiento de agua donde se mantenga un régimen de caudal estable como: la salida de la bocatoma, entrada y salida de la planta de tratamiento y en la entrada y salida del tanque de almacenamiento. También puede ser usado en los sectores de la

Tabla 2
Modelo de regresión según intervalo de caudal

| Intervalo de caudal (m^3/hora) | Porcentaje de Error Medio Absoluto (%) | Modelo de regresión |
|--|--|--|
| 4.03-5.61 | 26 | $\text{voltotal} = 489.77 + 1869.24 * \text{volmicro}$ |
| 5.61-7.20 | 18.2 | $\text{voltotal} = 383.20 + 1490.02 * \text{volmicro}$ |
| 7.23-9.18 | 10.4 | $\text{voltotal} = 234.46 + 1310.98 * \text{volmicro}$ |
| 9.21-10.80 | 8.2 | $\text{voltotal} = 156.77 + 1095.50 * \text{volmicro}$ |
| 10.83-12.78 | 8.9 | $\text{voltotal} = 242.61 + 1103.22 * \text{volmicro}$ |
| 12.81-14.40 | 8.8 | $\text{voltotal} = 282.50 + 942.59 * \text{volmicro}$ |
| 14.43-16.38 | 8.6 | $\text{voltotal} = 302.07 + 1070.40 * \text{volmicro}$ |
| 16.41-18.00 | 8.6 | $\text{voltotal} = 292.97 + 979.91 * \text{volmicro}$ |

Fuente: Elaboración propia.

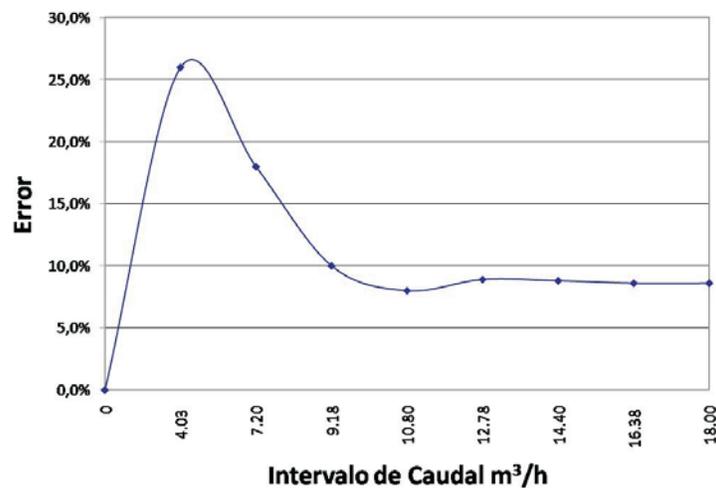


Figura 4. Curva de error del prototipo de medición de agua de tipo proporcional.

red de distribución que tengan caudales mayores a $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$, las 24 horas del día.

El costo de construcción del prototipo de medición es de \$US 337 dólares frente al costo de un macromedidor mecánico de 4 pulgadas que en promedio es de \$ US 860 dólares, es decir que el costo del prototipo de medición de agua es 2.5 veces más bajo que un macromedidor mecánico de agua de 4 pulgadas reafirmando lo indicado en Larry [11]. Finalmente se deben mencionar problemas como: la inadecuada instalación y las dificultades para el mantenimiento de los instrumentos de medición mecánicos en las pequeñas localidades y/o zonas rurales que pueden causar una distorsión en la medición del equipo, contrastando con la facilidad en el montaje y mantenimiento del prototipo de medición calibrado en la presente investigación.

Conclusiones

Durante el proceso de calibración del prototipo de medición de agua de tipo proporcional y después del análisis estadístico se comprobó que la variable más relevante y la que mejor explica el cambio de la variable dependiente (*voltotal*) es la de *volmicro* con un 94.1%. El modelo de regresión mejora su predicción solo en 1% (95.1 %) incluyendo las variables de *presión y caudal*, siendo más difícil medir estas variables en campo al mismo tiempo, especialmente la de caudal que es objeto mismo del prototipo de medición de agua. De igual manera se logró determinar que el error del pronóstico del modelo que contiene todos los datos es del 21%, por lo que fue necesario realizar modelos de regresión en intervalos de caudal más pequeños con el objetivo de determinar el error para cada intervalo de caudal, obteniendo que el rango de caudal con el menor porcentaje de error se encuentra en caudales superiores a $9.21 \text{ m}^3/\text{h}$ con un error entre 8.2 y 8.6%, es decir que este es el rango de caudal en el cual se debe instalar el prototipo de medición de agua, convirtiéndose en una alternativa de medición que puede ser instalado en la entrada de una planta de tratamiento de agua, a la entrada y salida de un tanque de almacenamiento y en las redes de distribución que tengan un caudal que no sea inferior a $9.2 \text{ m}^3/\text{h}$. Sin embargo, es necesario realizar una validación en campo de los modelos y/o ecuaciones de regresión determinadas para cada intervalo y

comprobar si existen variaciones en el porcentaje de error en la medición calculado para cada modelo en condiciones reales y realizar los ajustes requeridos en los mismos en caso de ser necesario. También es importante mencionar que la calibración del prototipo de medición de tipo proporcional desarrollado en la presente investigación se realizó con unos criterios de construcción específicos, por tal razón, el cambio en cualquiera de sus componentes, afectaría directamente el porcentaje de error calculado para cada modelo de regresión, exigiendo de nuevo la calibración de este en laboratorio y en campo. Finalmente es importante mencionar que el costo de construcción del prototipo de medición es 2.5 veces más bajo que un macromedidor mecánico de agua de 4 pulgadas convirtiéndose en una alternativa de bajo costo, confiable y competitiva respecto a otros tipos de medición para los acueductos de pequeñas localidades y/o zonas rurales.

Referencias Bibliográficas

1. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). Gestión Integral del Agua. Colombia. 2004.
2. Ochoa L, Bourguett V. Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable. Instituto Mexicano de Agua Potable. México. 2001.
3. PNCDA. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. Documento Técnico de Apoio. DTA D2 – Macromedição. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasil. 2004.
4. Frangipani. M. Guia Prático de Macromedição. Programa de Modernização do Setor Saneamento-Pmss. Brasil. 2005.
5. Palau. C. Aportaciones a la Gestión de los Sistemas de Medición de Caudal en Redes de Distribución de Agua a Presión. España. 2005.
6. Arregui. F, Cabrera. E, Cobacho R. Gestión Integral de Contadores de Agua. IWA. España. 2007.
7. RAS 2000. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Ministerio de Desarrollo Económico. Colombia. 2000.
8. Espirito Santo G, Gomez J. Calibração de Tubos de Pitot Tipo “Cole”. 20º Congreso Brasi-

-
- lero de Engenharia Sanitaria e ambiental. Brasil. 2000.
9. Hair. J. Anderson R. Tatham R. Black W. Análisis Multivariante. España. 2001.
10. Universidad de Cádiz. Análisis de regresión lineal. El procedimiento de la regresión lineal. 2008 <http://www2.uca.es/serv/ai/formacion/spss/Imprimir/18reglin.pdf>. Fecha de consulta mayo 2008.
11. Larry W. Hydraulic Design Handbook. McGraw-Hill United States of America. 1999.
- Recibido el 27 de Octubre de 2008
En forma revisada el 1° de Junio de 2009