



Mathematical Models for Flow Estimation in Sutro Weirs Used in Irrigation Systems

Modelos matemáticos para la estimación del caudal en vertedores Sutro utilizados en sistemas de riego

M.Sc. Luis Manuel Sandoval-Mendoza^I, Ing. Mayra Isabel Juárez-Bonilla^I, Dr.C. Oscar Brown-Manrique^{II}, Dr.C. Albi Mujica-Cervantes^{II}; Dr.C. Jorge Douglas Bonilla-Rocha^{II}; Dr.C. Yurisbel Gallardo-Ballat^{II}

^I Universidad de San Carlos (USAC), Facultad de Ingeniería, Guatemala.

^{II} Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba.

ABSTRACT. The results of the research carried out in Laboratory of Fluid Mechanics and Hydraulics of Carlos de Guatemala University to develop mathematical models necessary in the flow estimation in Sutro weirs are presented in this work. Nine weirs with different values of curvature constant a (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90) were produced. The experiment showed that the discharge coefficients μ are not constant and vary between 0.6532 and 0.7504. A potential model type $\mu=7.86 \times 10^{-4} a^{-0.0274}$ was proposed for the correction of the discharge coefficient which greatly improves the accuracy of Sotelo's equation. To estimate mean water speed in each weir, water depth with values greater than 65% of the maximum water depth should be used, in order to reach minimal speed variations. A mathematical model that relates mean speed and a constant with a correlation coefficient of 0.8961 was found.

Keywords: calibration, discharge coefficient, hydrodynamic canal, flow mensuration

RESUMEN. Los resultados de la investigación realizada en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Universidad de San Carlos de Guatemala para el desarrollo de modelos matemáticos necesarios en la estimación del caudal en vertedores Sutro, se presentan en este trabajo. Se fabricaron nueve vertederos con diferentes valores de constante de curvatura a (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90). El experimento demostró que los coeficientes de descarga μ no son constantes y varían entre 0,6532 y 0,7504. Se propuso un modelo potencial del tipo $\mu=7,86 \times 10^{-4} a^{-0,0274}$ para la corrección del coeficiente de descarga que mejora grandemente la precisión de la ecuación de Sotelo. En la estimación de velocidad media de agua en cada vertedor debe utilizarse los tirantes con valores superiores al 65% del tirante máximo, para que la variación de las velocidades sea mínima. Se encontró un modelo matemático que relaciona la velocidad media y la constante a , con un coeficiente de correlación de 0,8961.

Palabras clave: medición del flujo, calibración, canal hidrodinámico, coeficiente de descarga.

INTRODUCTION

Environmental management is a process directed at identifying, solving and mitigating environmental problems. One of the main tools of this process is the determination of water and energy consumption indicators for effective water management; (Ríos *et al.*, 2010) and to use all the available water with lower costs and without waste from adequate measurement systems (Cadavid, 2006).

Many of the problems of water management lie in the deficiency of flow controls in irrigation systems. In this

INTRODUCCIÓN

La gestión ambiental es un proceso orientado a identificar, resolver y mitigar problemas de carácter ambiental. Una de las principales herramientas de este proceso es la determinación de indicadores de consumo de agua y energía para el manejo eficaz del agua; por lo que se requiere conocer el consumo unitario de este recurso (Ríos *et al.*, 2010) y utilizar toda el agua disponible con menores costos y sin desperdicio a partir de sistemas de medición adecuados (Cadavid, 2006).

Gran parte de los problemas de la administración del agua radica en la deficiencia de controles del caudal en los sistemas de riego. En

sense, it is important that farmers know the different ways to measure pressure and flow (Bello and Pino, 2000), which allow adopting appropriate measures to reduce vulnerability to risk (González and Ramírez, 2014) and the development of construction projects for control works such as landfills (Santos *et al.*, 2008). Farmer who does not handle the technology well faces several problems to achieve efficiency in the use of water for irrigation (FAO, 2013).

Taking into account the previously mentioned aspects, the objective of the work is to propose mathematical models that allow accurate simulation of flow in Sutro weirs used in irrigation systems to measure small flows.

METHODS

The research was developed in Laboratory of Fluid Mechanics and Hydraulics of San Carlos de Guatemala University that consists of a water supply system by means of pumping and a tank for volumetric sets. To develop the experiments, nine Sutro-type weirs were designed and manufactured with a 3 mm thick sheet of iron and coated with anticorrosive paint to increase the time of material use (Figure 1).

este sentido es importante que el agricultor conozca las diferentes formas para medir la presión y el caudal (Bello y Pino, 2000) para que tomen las medidas acertadas que contribuyan a la reducción de la vulnerabilidad ante el riesgo (González y Ramírez, 2014) y el desarrollo de proyectos de construcción de obras de control como los vertedores (Santos *et al.*, 2008). El agricultor que no maneje bien la tecnología enfrenta problemas tales como para lograr eficiencia en el uso del agua para riego (FAO, 2013).

Teniendo en cuenta los aspectos expresados anteriormente, el objetivo del trabajo consiste en proponer modelos matemáticos que permitan la simulación con exactitud del caudal en vertedores Sutros utilizados en sistemas de riego para la medición de caudales pequeños.

MÉTODOS

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Universidad de San Carlos de Guatemala que consta de un sistema de abastecimiento de agua por medio de bombeo y un tanque para aforos volumétricos. Para el desarrollo de los experimentos se diseñaron y fabricaron nueve vertedores de tipo Sutro con una lámina de hierro de 3 mm de espesor y recubierta con pintura anticorrosiva para alargar el tiempo de uso del material (Figura 1).

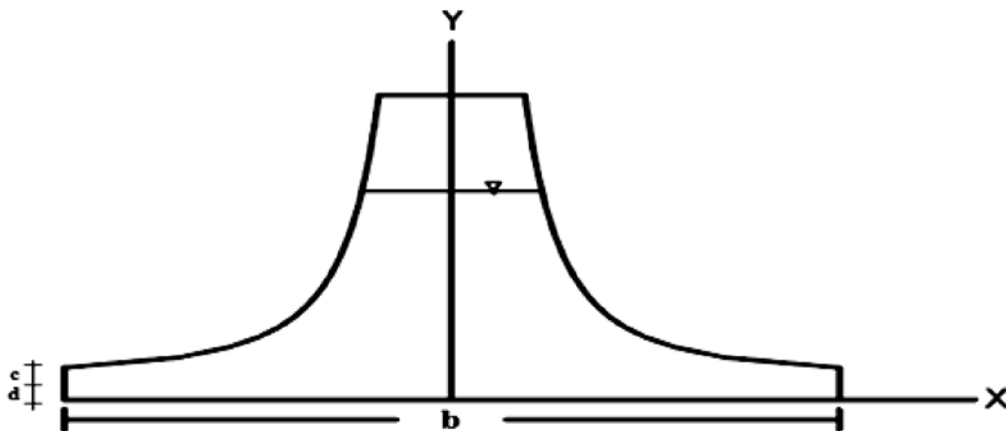


FIGURE 1. Scheme of the dimensioned Sutro weir.
FIGURA 1. Esquema del vertedor Sutro dimensionado.

The dimensions of the device were determined according to the general equation corresponding to the symmetrical weir which is written as follows:

$$x = \left(\frac{a}{H} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$d = c = \frac{4a}{b^2} \quad (2)$$

Where:

x - distance from the center of the weir to the edge of the curvature (cm);

H -height that water level reaches inside the weir (cm);

a -constant of the weir curvature;

Las dimensiones del dispositivo se determinaron acorde con la ecuación general correspondiente al vertedero simétrico que se escribe de la forma siguiente:

$$x = \left(\frac{a}{H} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$d = c = \frac{4a}{b^2} \quad (2)$$

donde:

x - distancia desde el centro del vertedor hasta el borde de la curvatura (cm);

H -altura que alcanza el nivel de agua dentro del vertedor (cm);

a -constante de curvatura del vertedor;

b - total width of the weir (cm);
c and *d* - height components of the rectangular base (cm).

Each weir was designed for a different value of variable *a* (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90) giving a value for *x* that did not exceed the physical width of the channel.

In order to fix the weirs at the exit of the hydrodynamic canal and to avoid leaks or leaks that could affect the measurements, it was necessary to place rubber strips of 10 mm wide in the perimeter of all weirs.

Height measurements (*H*) were performed in the hydraulic canal where the supplied flow rate was rigorously controlled to achieve its stabilization; only those that were above the *c + d* value were considered as valid readings.

The distance (*d*) for *H* reading takings was calculated taking into account the condition $d \geq 4H$, measured from the weir position in the longitudinal direction. For each reading of load *H*, three volumetric readings were made to calculate by arithmetic average the flow through the weirs and later to obtain the experimental equation of each of them by means of the following equation:

$$Q_{obs} = \frac{V}{t} \quad (3)$$

Where:

Q_{obs} - observed flow rate ($L s^{-1}$);
V - volume captured in the calibrated container (L);
t - time to capture the volume in the container (s).

The simulated flow in the weirs using a linear model was obtained through the following equation:

$$Q_{lin} = m \cdot H \quad (4)$$

Where:

Q_{lin} - estimated flow rate using the linear function model ($L s^{-1}$);
m - line slope obtained by relating the variables $Q = f(H)$;
H - height that water level reaches inside the weir (cm).

The theoretical flow that represents the flow through a Sutro weir was determined from the equation proposed by Sotelo (2002) which is written as:

$$Q_{teo} = \pi \sqrt{2ga}^{0.5} H \quad (5)$$

Where:

Q_{teo} - theoretical flow calculated by Sotelo's equation ($L s^{-1}$);
a - constant of weir curvature; *g* constant of gravity acceleration ($m s^{-2}$);
H - height that water level reaches inside the weir (cm).

Adjusted flow rate was estimated from the equation proposed by Sotelo (2002), affected by a correction coefficient μ , which constitutes a theoretical contribution in this investigation. The equation used was as follows:

$$Q_{ajus} = \mu \left(\pi \sqrt{2ga}^{0.5} H \right) \quad (6)$$

b - ancho total del vertedor (cm);
c y *d*; componentes de la altura de la base rectangular (cm).

Cada vertedero fue diseñado para diferentes valores de la variable *a* (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90) que dieran un valor para *x* que no rebasara el ancho físico del canal.

Con el propósito de fijar el vertedero en la salida del canal hidrodinámico y evitar fugas o filtraciones que pudieran afectar las mediciones fue necesaria la colocación de tiras de caucho de 10 mm de ancho en el perímetro de todos los vertederos.

Las mediciones de altura (*H*) se realizaron en el canal hidráulico donde el caudal suministrado fue rigurosamente controlado para lograr su estabilización; sólo se consideró como lecturas válidas las que estuvieron por encima del valor *c+d*.

La distancia (*d*) para la toma de las lecturas *H* se calculó teniendo en cuenta la condición $d \geq 4H$, medida desde la posición del vertedero en sentido longitudinal. Por cada lectura de carga *H* realizada se efectuaron tres aforos volumétricos para calcular mediante promedio aritmético el caudal que circula por los vertederos y posteriormente obtener la ecuación experimental de cada uno de ellos mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{obs} = \frac{V}{t} \quad (3)$$

donde:

Q_{obs} - caudal observado ($L s^{-1}$);
V - volumen captado en el recipiente calibrado (L);
t - tiempo para captar el volumen en el recipiente (s).

El caudal simulado en el vertedor mediante un modelo lineal se obtuvo a través de la ecuación siguiente:

$$Q_{lin} = m \cdot H \quad (4)$$

donde:

Q_{lin} - caudal estimado mediante el modelo de función lineal ($L s^{-1}$);
m - pendiente de la recta obtenida al relacionar las variables $Q = f(H)$;
H - altura que alcanza el nivel de agua dentro del vertedor (cm).

El caudal teórico que representa el flujo a través de un vertedor Sutro se determinó a partir de la ecuación propuesta por Sotelo (2002), la cual se escribe como:

$$Q_{teo} = \pi \sqrt{2ga}^{0.5} H \quad (5)$$

donde:

Q_{teo} - caudal teórico calculado mediante la ecuación propuesta por Sotelo (2002), ($L s^{-1}$);
a - constante de curvatura del vertedor; *g* la constante de la aceleración de la gravedad ($m s^{-2}$);
H - altura que alcanza el nivel de agua dentro del vertedor (cm).

El caudal ajustado se estimó a partir de la ecuación propuesta por Sotelo (2002), afectada por un coeficiente de corrección μ el cual constituye un aporte teórico en esta investigación. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$Q_{ajus} = \mu \left(\pi \sqrt{2ga}^{0.5} H \right) \quad (6)$$

A coefficient K of the form is determined:

$$K = \frac{\pi \sqrt{2ga^{0.5}}}{1000} \quad (7)$$

Equation (6) can be rewritten as:

$$Q_{ajus} = \mu \cdot K \cdot H \quad (8)$$

Where:

Q_{ajus} - adjusted flow rate ($L s^{-1}$);

m - coefficient of flow correction;

K - coefficient obtained in equation (7);

H - height that water level reaches inside the weir (cm).

General model for flow rate estimation according to any value of the weir curvature constant was obtained through a potential function generated from the computer statistical program Statistical Package for Social Sciences (SPSS). It is written as follows:

$$Q_{gen} = K \cdot a^n \cdot H \quad (9)$$

Where:

Q_{gen} - general flow obtained by SPSS program ($L s^{-1}$);

a - constant of curvature of the weir;

n - experimentally found exponent the Sutro weir built;

H - height that reaches the water level inside the weir (cm).

The validation and calibration of the proposed models was done using the coefficient of determination R^2 and the Average Percentage Error widely used to measure model performance (Zuñiga and Jordán, 2005). The equation used was as follows:

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{Q_{obs}} 100 \quad (10)$$

Where:

EPM - Average Percent Error (%);

Q_{obs} - observed flow rate;

Q_{sim} - simulated flow rate; n number of predicted flows

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of Models for Flow Estimation

Table 1 shows the different equations corresponding to the linear model (Q_{lin}) in Sutro weir for different values of the curvature constant. It can be observed that the models found are adequately fitted to the experimental data. That is verified by the high values of the Coefficient of Determination, which was, in all cases, above 0.99. The slope of the linear adjustment curve (m) increases gradually from 0.2335 to 0.8623.

Table 1 shows the values of μ and K . The coefficient μ was calculated in this research for the correction of the equation proposed by Sotelo. It behaved variably in all evaluations performed with values falling from 0.7504 to 0.6532. Coefficient K that groups the weir constant of curvature and gravity in Sotelo's equation, also varied, but increasingly from 0.3112 to 1.3201.

Se determina un coeficiente K de la forma:

$$K = \frac{\pi \sqrt{2ga^{0.5}}}{1000} \quad (7)$$

La ecuación (6) puede reescribirse como:

$$Q_{ajus} = \mu \cdot K \cdot H \quad (8)$$

donde:

Q_{ajus} - caudal ajustado ($L s^{-1}$);

μ -coeficiente de corrección del caudal;

K -coeficiente obtenido en la ecuación (7);

H -altura que alcanza el nivel de agua dentro del vertedor (cm).

El modelo general para la estimación del caudal en función de cualquier valor de la constante de curvatura del vertedor se obtuvo a través de una función potencial generada a partir del programa estadístico informático Statistical Package for the Social Sciences (SPSS). Este se escribe de la manera siguiente:

$$Q_{gen} = K \cdot a^n \cdot H \quad (9)$$

donde:

Q_{gen} - caudal general obtenido mediante el programa SPSS ($L s^{-1}$);

a -constante de curvatura del vertedor;

n -exponente encontrado experimentalmente el vertedor Sutro construido;

H -altura que alcanza el nivel de agua dentro del vertedor (cm).

El proceso de calibración y validación de los modelos propuestos se realizó mediante el coeficiente de determinación R^2 y el Error Porcentual Medio ampliamente utilizado para medir el desempeño de los modelos (Zuñiga y Jordán, 2005). La ecuación empleada fue la siguiente:

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{Q_{obs}} 100 \quad (10)$$

donde:

EPM -error porcentual medio (%);

Q_{obs} -caudal observado;

Q_{sim} -caudal simulado;

n -número de caudales pronosticados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los modelos para la estimación de los caudales

En la tabla 1 se exponen las diferentes ecuaciones correspondientes al modelo lineal (Q_{lin}) en vertedores Sutro para diferentes valores de la constante de curvatura. Se observa que los modelos encontrados se ajustan adecuadamente a los datos experimentales, lo cual se comprueba por los valores elevados del coeficiente de determinación que estuvo en todos los casos por encima de 0,99. La pendiente de la curva de ajuste lineal (m) se incrementa de forma gradual desde 0,2335 hasta 0,8623.

En la propia Tabla 1 se muestran los valores de μ y K . El coeficiente μ fue calculado en esta investigación para la corrección de la ecuación propuesta por Sotelo. Este se comportó de forma variable en todas las evaluaciones realizadas con valores descendentes desde 0,7504 hasta 0,6532. El coeficiente K que agrupa a la constante de curvatura del vertedor y a la gravedad dentro de la ecuación de Sotelo, también vario pero de forma incremental desde 0,3112 a 1,3201.

TABLE 1. Models Found for Flow Estimation
TABLA 1. Modelos encontrados para la estimación del caudal

a	Q_{lin}	R^2	μ	K
5	$Q = 0.2335H$	0.9986	0.7504	0.3112
10	$Q = 0.3279H$	0.9997	0.7452	0.4400
20	$Q = 0.4450H$	0.9998	0.7151	0.6223
30	$Q = 0.5264H$	0.9998	0.6906	0.7622
40	$Q = 0.6390H$	0.9994	0.7261	0.8801
50	$Q = 0.6963H$	0.9988	0.7077	0.9840
60	$Q = 0.7796H$	0.9977	0.7232	1.0779
70	$Q = 0.8557H$	0.9972	0.7350	1.1643
90	$Q = 0.8623H$	0.9976	0.6532	1.3201

Analysis of the Parameters μ and m with Respect to Constant of Curvature (a)

Figure 2 shows the results of the functional relationship between coefficient μ and parameter a , in which it is verified that between these two parameters there is no correlation of potential type, with an acceptable coefficient of determination. Consequently, it has no practical importance in accordance with the objectives of the research, however, the relationship between the slope of the linear adjustment curve (m) and the curvature constant satisfactorily responded to a potential function of type $m = \alpha a^b$, with a high determination coefficient of 0.9945 as shown in Figure 3.

Análisis de los parámetros μ y m respecto a la constante de curvatura (a)

En la Figura 2 se presentan los resultados de la relación funcional entre el coeficiente μ y el parámetro a ; en la cual se comprueba que entre estos dos parámetros no existe una correlación de tipo potencial, con un coeficiente de determinación aceptable; por lo que no tiene importancia práctica acorde con los objetivos de la investigación; sin embargo, la relación entre la pendiente de la curva de ajuste lineal (m) y la constante de curvatura del vertedor respondió de forma satisfactoria a una función potencial del tipo $m = \alpha a^b$, con un coeficiente de determinación alto de 0,9945 como se muestra en la Figura 3.

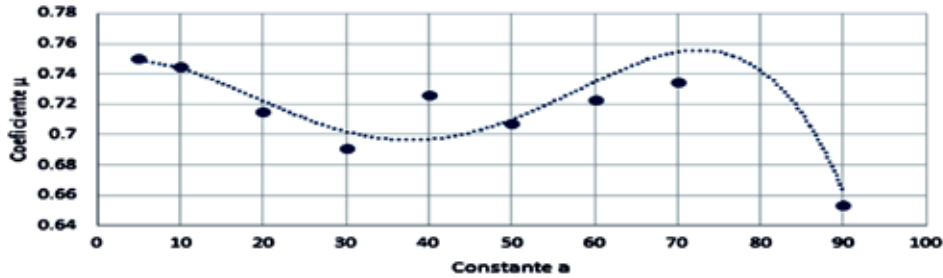


FIGURE 2. Relationship between Coefficient μ and Constant of Curvature.
 FIGURA 2. Relación entre el coeficiente μ y la constante de curvatura.

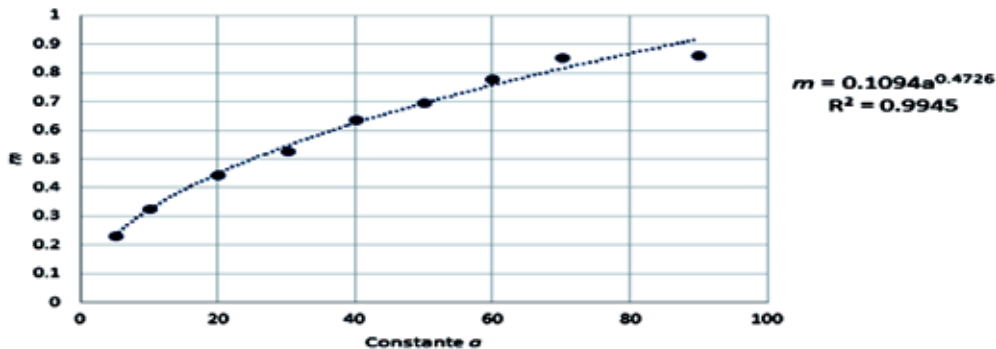


FIGURE 3. Relationship between Coefficient m and Constant of Curvature.
 FIGURA 3. Relación entre el coeficiente m y la constante de curvatura.

From the results obtained in the previous figure the mathematical deductions were made and they are shown next:

If a comparison is made between equation (4), which estimates the flow rate of the weir using a linear model (Q_{lin}), and equation (6), for the determination of the flow rate from

A partir de los resultados alcanzados en la figura anterior se hicieron las deducciones matemáticas que se demuestran a continuación:

Si se hace una comparación entre la ecuación (4) que estima el caudal del vertedor mediante un modelo lineal (Q_{lin}) y la ecuación (6)

the equation proposed by Sotelo, affected by the correction coefficient m , it can be written that, by analogy, the coefficient m can be calculated as:

$$m = \pi \sqrt{2g} \mu a^{0.5} \quad (11)$$

According to graph 3, the slope m can also be calculated by the following equation:

$$m = 0.1094a^{0.4726} \quad (12)$$

If both coefficients m are equalized and then μ is cleared, a new value of this coefficient is obtained as a function of the weir constant of curvature; this is:

$$\pi \sqrt{2g} \mu a^{0.5} = 0.1094a^{0.4726} \quad (13)$$

Clearing gives the value of μ :

$$\mu = \frac{0.1094a^{0.4726}}{\pi \sqrt{2g} a^{0.5}} \quad (14)$$

If the value of gravity acceleration ($g = 981 \text{ cm s}^{-2}$) is introduced in Eq. (14) then:

$$\mu = \frac{7.86 \cdot 10^{-4}}{a^{0.0274}} \quad (15)$$

This new value of μ has a better functional relation with the weir constant of curvature (a) and responds correctly to a potential function as it is observed in Figure 4; therefore, it adapts to the characteristics of Sutro weir operation.

para la determinación del caudal ajustado a partir de la ecuación propuesta por Sotelo afectada por el coeficiente de corrección μ , se puede escribir que por analogía el coeficiente m puede calcularse como:

$$m = \pi \sqrt{2g} \mu a^{0.5} \quad (11)$$

Según el grafico de la Figura 3, la pendiente m también puede calcularse por la ecuación siguiente:

$$m = 0.1094a^{0.4726} \quad (12)$$

Si se igualan ambos coeficientes m y luego se despeja μ , se obtiene un nuevo valor de este coeficiente en función de la constante de curvatura del vertedor; esto es:

$$\pi \sqrt{2g} \mu a^{0.5} = 0.1094a^{0.4726} \quad (13)$$

Despejando se obtiene el valor de μ :

$$\mu = \frac{0.1094a^{0.4726}}{\pi \sqrt{2g} a^{0.5}} \quad (14)$$

Si se introduce en la ecuación (14) el valor de la aceleración de la gravedad ($g = 981 \text{ cm s}^{-2}$) se obtiene:

$$\mu = \frac{7.86 \cdot 10^{-4}}{a^{0.0274}} \quad (15)$$

Este nuevo valor de μ presenta una mejor relación funcional con la constante de curvatura del vertedor (a) y responde acertadamente a una función potencial como se observa que la Figura 4; por lo que se adapta a las características del funcionamiento del vertedor Sutro.

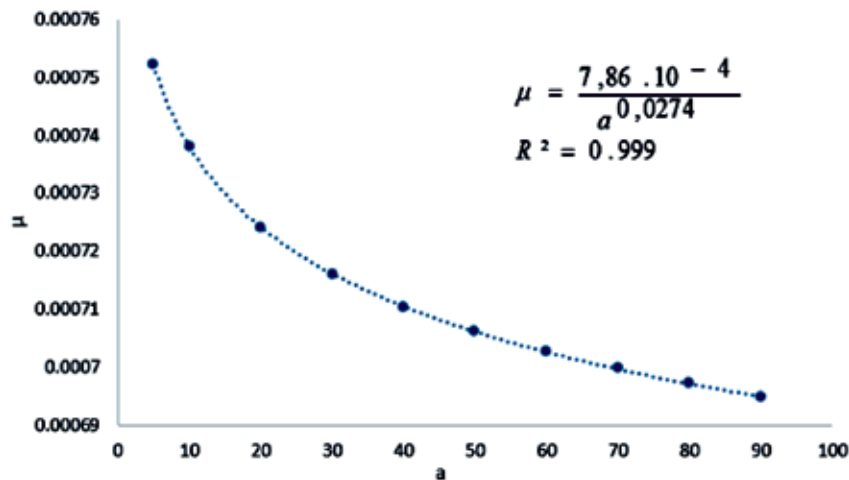


FIGURE 4. Relationship between the New Value of μ and the Constant of Curvature.
 FIGURA 4. Relación entre el nuevo valor de μ y la constante de curvatura.

The model for estimating Sutro weir flow obtained by the SPSS program (Q_{gen}) is as follows:

$$Q_{gen} = 0.152653 \cdot a^{0.364} \cdot H \quad (16)$$

$$R^2 = 0.972$$

This model has a high coefficient of determination and allows estimating the value of the flow rate that a Sutro weir discharges for any value of the curvature constant (a) from the

El modelo para estimar el caudal del vertedor Sutro obtenido mediante el programa SPSS (Q_{gen}) es el siguiente:

$$Q_{gen} = 0.152653 \cdot a^{0.364} \cdot H \quad (16)$$

$$R^2 = 0.972$$

Este modelo presenta un elevado coeficiente de determinación y permite estimar el valor del caudal que descarga un vertedor Sutro para cualquier valor de la constante de curvatura (a) a partir de la

water height measurement (H). The comparison of this model with the equation proposed by Sotelo shows that the coefficient $a \neq 0.5$. Therefore, the arbitrary use of the constant value of 0,5 leads to an error in flow rate estimation.

Analysis of the Errors Made by the Models in the Estimation of the Flow

Errors in the experimental process are shown in Table 2, where it can be seen that the models to determine Q_{lin} , Q_{ajus} and Q_{gen} flow rates have values lower than 3%, consequently, they can be used reliably in flow measurement in open conduits. That is because the errors are below the allowable maximum limit of 5%. The most accurate results were found in Q_{lin} and Q_{ajus} models with an error lower than 0.3%. Q_{gen} produced the greatest error with a value of 2.834%.

medición de la altura del agua sobre la escotadura (H). La comparación de este modelo con la ecuación propuesta por Sotelo permite ver que el coeficiente $a \neq 0,5$; por tanto, el uso arbitrario del valor constante de 0,5 conduce a un error en la estimación del caudal.

Análisis de los errores cometidos por los modelos en la estimación del caudal

Los errores cometidos en el proceso experimental se muestran en la tabla 2, donde se observa que los modelos para determinar los caudales Q_{lin} , Q_{ajus} y Q_{gen} presentan valores inferiores al 3 % por lo que pueden ser utilizados de manera confiable en la medición de caudales en conductos abiertos. Esto se debe a que los errores están por debajo del límite máximo permisible de 5 %. Los resultados más precisos se encontraron en los modelos Q_{lin} y Q_{ajus} con un error inferior al 0,3 %. El que produjo mayor error fue el Q_{gen} con un valor de 2,834 %.

TABLE 2. Flows and Experimental Errors of Models Obtained
TABLA 2. Caudales y errores experimentales de los modelos obtenidos

H (cm)	Q_{obs} ($L s^{-1}$)	Q_{lin} ($L s^{-1}$)	Q_{ajus} ($L s^{-1}$)	Q_{gen} ($L s^{-1}$)	Q_{lin} (%)	Q_{ajus} (%)	Q_{gen} (%)
8.1	2.652	2.656	2.646	2.859	0.000006	0.000016	0.016133
9.4	3.084	3.082	3.058	3.318	0.000001	0.000225	0.017705
11.0	3.633	3.607	3.563	3.882	0.000188	0.001360	0.017118
12.2	4.031	4.000	3.940	4.306	0.000233	0.002046	0.018749
13.5	4.455	4.427	4.348	4.765	0.000180	0.002572	0.021535
15.3	5.029	5.017	4.911	5.400	0.000029	0.002777	0.027375
16.8	5.461	5.509	5.378	5.929	0.000417	0.001247	0.040185
18.4	6.008	6.033	5.876	6.494	0.000107	0.002898	0.039340
20.1	6.555	6.591	6.403	7.094	0.000195	0.003506	0.0443648
24.0	7.902	7.870	7.609	8.471	0.000133	0.010879	0.040921
		Mean			0.015	0.275	2.834

The results of the research confirm the need to calibrate weirs to achieve accurate flow estimates. In this sense, Crookston and Tullis (2013) affirm that the drainage capacity of weirs is determined by the discharge coefficient that is specific for each geometry of the weir (San Mauro *et al.*, 2016); but it should be obtained by testing to achieve the required accuracy (Boss *et al.*, 1986, Aguilar 2001, Santos *et al.*, 2010).

Knowledge the amount of water available is an indispensable requirement to manage this resource with different purposes in an efficient way (Rázuri *et al.*, 2009; Ayala and Albóniga, 2015). In the specific case of irrigation systems, it is necessary to effectively manage water metering and control devices to regulate the amount of water used by the consumer and to contribute to reduce overexploitation of aquifers and energy savings due to lower needs (García and Pérez, 2004; IDAE, 2005; Tarjuelo, 2005; Fernández *et al.*, 2009).

Analysis of Water Speed at the Weir Outlet

The results of the tests performed for estimating Sutro weir flow, allowed the determination of water speed at the weir outlet from the continuity equation and the definition of a procedure to find the mean speed in this type of weir.

Los resultados de la investigación confirman la necesidad de calibrar los vertedores para lograr estimaciones precisas de los caudales. En este sentido Crookston y Tullis (2013), afirman que la capacidad de desagüe de los vertedores viene determinada por el coeficiente de descarga que resulta específico para cada geometría del vertedor (San Mauro *et al.*, 2016); pero deben ser obtenidos mediante ensayos para que se alcance la precisión requerida (Boss *et al.*, 1986; Aguilar y Rivas, 2001; Santos *et al.*, 2010).

El conocimiento de la cantidad de agua disponible es un requisito indispensable para manejar este recurso con distintos propósitos de una manera eficiente (Rázuri *et al.*, 2009; Ayala y Albóniga, 2015). En el caso específico de los sistemas de riego es necesario el manejo eficaz de los dispositivos de medición y control del agua para el control de la cantidad de agua empleado por el usuario y contribuya a disminuir la sobreexplotación de acuíferos y al ahorro energético por menores necesidades de bombeo (García y Pérez, 2004; IDAE, 2005; Tarjuelo, 2005; Fernández *et al.*, 2009).

Análisis de la velocidad del agua a la salida del vertedor

Los resultados de las pruebas realizadas para la estimación del caudal en el vertedor Sutro permitió la determinación de la velocidad del agua a la salida del vertedor a partir de la ecuación

$$Q = v \cdot A \tag{17}$$

$$A = 2 \left[b \cdot c + 2a^{0.5} (H^{0.5} - c^{0.5}) \right] \tag{18}$$

Where:

Q - flow rate ($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$);

V - speed (cm s^{-1});

a - area under the curve for a proportional symmetrical weir (cm^2)

In order to determine the mean speed for each weir, the speeds are taken into account where its length is at least 65% of the maximum water depth.

The results of the investigation allowed finding a correct relation between the water speed at the outlet of the weir and the curvature constant with a determination coefficient R^2 of 0.8961, as shown in Figure 5. The model found is of the simple linear type, where the slope represents the weir constant of curvature.

ción de continuidad y la definición de un procedimiento para encontrar la velocidad media en este tipo de vertedor.

$$Q = v \cdot A \tag{17}$$

$$A = 2 \left[b \cdot c + 2a^{0.5} (H^{0.5} - c^{0.5}) \right] \tag{18}$$

donde:

Q - caudal ($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$);

v - velocidad (cm s^{-1});

A - área bajo la curva para un vertedero proporcional simétrico (cm^2).

Para determinar la velocidad media para cada vertedero, se toman en cuenta las velocidades donde su tirante sea como mínimo el 65% del tirante máximo.

Los resultados de la investigación permitieron encontrar una relación acertada entre la velocidad de agua a la salida del vertedor y la constante de curvatura con un coeficiente de determinación R^2 de 0,8961 como se muestra en la Figura 5. El modelo encontrado es del tipo lineal simple donde la pendiente representa la constante de curvatura del vertedor

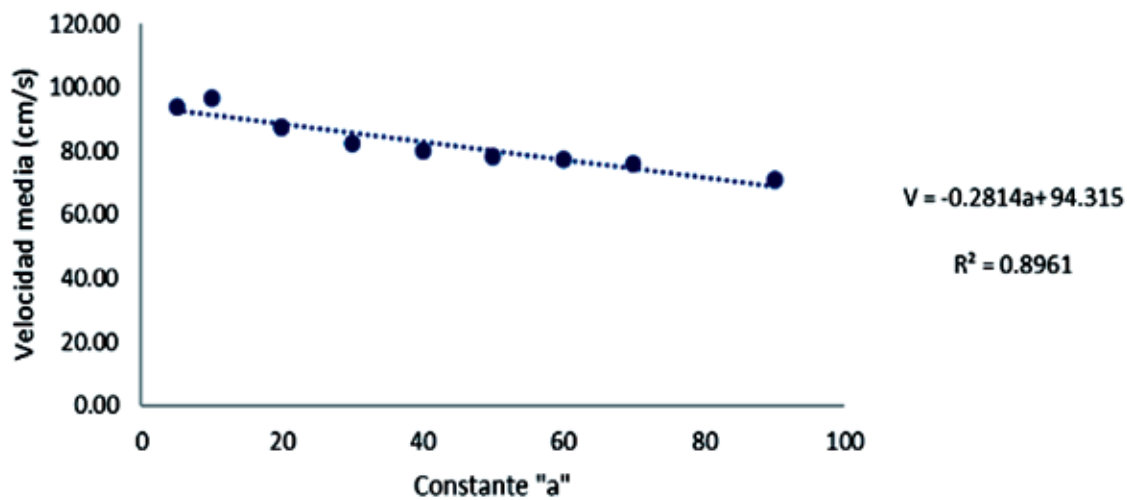


FIGURE 5. Relationship between the New Value of v_m and the Constant of Curvature.
 FIGURA 5. Relación entre el nuevo valor de v_m y la constante de curvatura.

CONCLUSIONS

- Discharge coefficients μ experimentally obtained are not constant and vary between 0.6532 and 0.7504.
- A potential model type $\mu = 7.86 \cdot 10^{-4} a^{-0.0274}$ was proposed for the correction of the discharge coefficient which greatly improves the accuracy of Sotelo's equation. A mathematical model that relates mean speed and constant a , with a correlation coefficient of 0.8961, was found.
- The results of the investigation allowed finding a correct relation between water speed at the weir outlet and the curvature constant with a determination coefficient R^2 of 0.8961.
- For estimating mean water speed in each weir, water depth with values greater than 65% of the maximum water depth should be used in order to reach minimal speed variation.

CONCLUSIONES

- Los coeficientes de descarga μ obtenidos de forma experimental no son constantes y varían entre 0,6532 y 0,7504.
- Se propuso un modelo potencial del tipo $\mu = 7,86 \times 10^{-4} a^{-0,0274}$ para la corrección del coeficiente de descarga que mejora grandemente la precisión de la ecuación de Sotelo. Se encontró un modelo matemático que relaciona la velocidad media y la constante a , con un coeficiente de correlación de 0,8961.
- Los resultados de la investigación permitieron encontrar una relación acertada entre la velocidad de agua a la salida del vertedor y la constante de curvatura con un coeficiente de determinación R^2 de 0,8961.
- En la estimación de velocidad media de agua en cada vertedor debe utilizarse los tirantes con valores superiores al 65% del tirante máximo, con el propósito de que la variación de las velocidades sea mínima.

REFERENCES/ REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, A.; RIVAS, I.: *Vertedores, [en línea]*, Ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2001, ISBN: 968-5536-02-3, *Disponible en: http://repositorio.imta.mx/bitstream/20.500.12013/1115/1/IMTA_097.pdf*, [Consulta: 22 de junio de 2016].
- AYALA, L.J.C.; ALBÓNIGA, G.R.: “Dispositivo electrónico de medición del caudal de agua para canales abiertos”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(Suppl.): 91-99, 2015, ISSN: 2071-0054.
- BELLO, M.; PINO, M.: “Medición de presión y caudal”, *Boletín INIA*, (28): 21, 2000, ISSN: 0717-4829.
- BOS, M.G.; REPLOGLE, J.A.; CLEMMENS, A.J.: *Aforadores de caudal para canales abiertos*, ser. ILRI publication, no. ser. 38, Ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 293 p., 1986, ISBN: 978-90-70260-92-7.
- CADAVID, J.H.: *Hidráulica de canales: fundamentos*, Ed. Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 369 p., 2006, ISBN: 978-958-8281-28-5.
- CROOKSTON, B.M.; TULLIS, B.P.: “Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(5): 363-370, 2013, ISSN: 0733-9437, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000558.
- FAO: *Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe, [en línea]*, Ed. FAO - FIDA, Chile, 270 p., 2013, ISBN: 978-92-5-307581-2, *Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/i3247s/i3247s.pdf>*, [Consulta: 23 de junio de 2016].
- FERNÁNDEZ, C.A.; HOLZAPFEL, E.; DEL CALLEJO, I.; BILLIB, M.: *Manejo sostenible del agua para riego en sudamérica*, Inst. Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas - Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 183 p., 2009, ISBN: 978-987-25074-1-1.
- GARCÍA, G.S.; PÉREZ, L.J.R.: “Resultados de la introducción del riego por goteo en la cooperativa de producción agropecuaria cañera «Primer Soviet de America»”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13(1): 47-51, 2004, ISSN: 2071-0054.
- GONZÁLEZ, A.; RAMÍREZ, J.D.: *Manual piragüero. 3-Medición del caudal*, Ed. Comunicaciones Corantioquia, 1.ª ed., Colombia, 2014, ISBN: 978-958-57280-7-3.
- IDAE (INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA): *Ahorro y eficiencia energética en agricultura de regadío*, ser. Ahorro y eficiencia energética en la agricultura, no. ser. 2, Ed. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid, España, 36 p., 2005, ISBN: 978-84-86850-94-4.
- RÁZURI, L.R.; ROSALES, J.G.; HERNÁNDEZ, J.D.: “Formulación de alternativas de uso del agua con base en el balance disponibilidad-demanda en la zona de Santa Rosa, sector La Hechicera del estado Mérida”, *Academia*, 8(16): 46-64, 2009, ISSN: 1690-3226.
- RÍOS, J.A.; ESCOBAR, J.F.; PALACIO, I.: *Guía metodológica para determinar módulos de consumo y factores de vertimiento de agua*, Ed. Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 1.ª ed., Medellín, Colombia, 76 p., 2010, ISBN: 978-958-44-7731-6.
- SAN MAURO, J.; SALAZAR, F.; TOLEDO MUNICIO, M.A.; CABALLERO, F.J.; PONCE-FARFÁN, C.; RAMOS, T.: “Modelación física y numérica de aliviaderos en laberinto con fondo poliédrico”, *Ingeniería del Agua*, 20(3): 127-138, 2016, ISSN: 1886-4996, 1134-2196.
- SANTOS, A.C.; CUBILLOS, C.E.; VARGAS, A.: “Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS”, *Avances en Recursos Hidráulicos*, (17), 2008, ISSN: 0121-5701, *Disponible en: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/9288>*, [Consulta: 23 de junio de 2016].
- SANTOS, L.; DE JUAN, J.A.; PICORNELL, M.R.; TARJUELO, J.M.: *El riego y sus tecnologías, [en línea]*, Ed. Centro Regional de Estudios del Agua (CREA)- Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), España, 296 p., 2010, ISBN: 978-84-692-9979-1, *Disponible en: <https://es.slideshare.net/GuillermoSarah/el-riego-ysustecnologias>*, [Consulta: 23 de junio de 2016].
- SOTELO, G.: *Hidráulica general*, Ed. Limusa, México, 2002, ISBN: 978-968-18-0503-6.
- TARJUELO, J.M.: *El riego por aspersión y su tecnología, [en línea]*, Ed. Mundi-Prensa, 581 p., 2005, ISBN: 978-84-8476-225-6, *Disponible en: <https://books.google.com.au/books?id=wMJzLxduGjsC>*, [Consulta: 23 de junio de 2016].
- ZÚÑIGA, A.; JORDÁN, C.: “Pronóstico de caudales medios mensuales empleando Sistemas Neurofuzzy”, *Revista Tecnológica - ESPOL*, 18(1): 17-23, 2005, ISSN: 1390-3659.

Received: 20/10/2016.

Approved: 15/06/2017.

Luis Manuel Sandoval Mendoza, Ing., Prof., Universidad de San Carlos (USAC), Facultad de Ingeniería, Guatemala. E-mail: ingluissandoval@gmail.com

Mayra Isabel Juárez Bonilla, E-mail: ingluissandoval@gmail.co

Oscar Brown Manrique, E-mail: obrown@unica.cu

Albi Mujica Cervantes; E-mail: albis@unica.cu

Jorge Douglas Bonilla Rocha, E-mail: obrown@unica.cu

Yurisbel Gallardo Ballat, E-mail: obrown@unica.cu

Note: the mention of commercial equipment marks, instruments or specific materials obeys identification purposes, there is not any promotional commitment related to them, neither for the authors nor for the editor.