



Mathematical Models for Flow Simulation in Cipoletti Weirs Used in Irrigation Systems

Modelos matemáticos para la simulación del caudal en vertedores Cipolletti utilizados en sistemas de riego

M.Sc. Luis Manuel Sandoval-Mendoza¹, Ing. Julio Adrián Miranda-Escobar¹, 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}

¹ Universidad de San Carlos de Guatemala (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. This paper presents the results of the research carried out at the Laboratory of Fluid Mechanics and Hydraulics of the University San Carlos de Guatemala, where different weir Cipoletti were built with different values of base (b) in the range of 5-60 centimeters. A polynomial model of second order to estimate the parameters K and n of the exponential equation to estimate the flow and potential for discharge coefficient C_d function was found. The model to estimate the theoretical flow rate suggested by the hydraulics and hydrometrics manual and the one obtained by SPSS statistical program presented the highest relative errors; however, the rest of the tested models showed a good correlation with the observed flow rates of error less than 2%. The general experimental model relating discharge coefficient obtained reliable values for all evaluated widths and load heights (H) between 4 and 10 centimeters.

Keywords: calibration, discharge coefficient, hydrodynamic channel, flow measurement

RESUMEN. En este trabajo se presentan los resultados de la investigación desarrollada en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, donde se construyeron diferentes vertedores Cipolletti con distintos valores de base (b) en el rango de 5 a 60 centímetros. Se encontró un modelo polinomial de segundo orden para la estimación de los parámetros K y n de la ecuación exponencial para la estimación del caudal y una función potencial para el coeficiente de descarga C_d . El modelo para estimar el caudal teórico sugerido por los manuales de hidráulica e hidrometría y el obtenido mediante el programa estadístico SPSS presentaron los mayores errores relativos; sin embargo el resto de los modelos evaluados mostraron una buena correlación con los caudales observados con porcentajes de error menor al 2%. El modelo experimental general que relaciona el coeficiente de descarga obtuvo valores confiables para todos los anchos evaluados y alturas de carga (H) entre 4 y 10 centímetros.

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

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad económica de alto consumo de recursos hídricos que requiere acciones estratégicas para aumentar la eficiencia en el uso del agua basadas en la tecnificación y modernización del riego superficial (Olvera *et al.*, 2014), que contribuya a la reducción de las pérdidas de agua que se produce por conducción, filtración y percolación.

El diseño eficiente del riego superficial permite suministrar el caudal óptimo¹; además su magnitud debe ser conocida, para que el

INTRODUCTION

Agriculture is an economic activity of high consumption of water resources that requires strategic actions to increase the efficiency in the use of the water based on the automation and modernization of surface irrigation (Olvera *et al.*, 2014) that contributes to the reduction of water losses produced by conduction, filtration and percolation.

The efficient design of surface irrigation can provide the optimal flow¹ (Bello y Pino, 2000; Durán y García, 2007); but

¹ CHÁVEZ, C. A.; MUÑOZ, B.; MAGAÑA, G.; FUENTES, C.; RENDÓN, L.: "Experiencias en el diseño de riego por gravedad en el distrito de riego 085, La Begoña, Guanajuato". I Congreso Nacional COMEII 2015, 23 y 24 de noviembre, Jiutepec, Morelos, México, 2015.

agricultor pueda implementar la medición del caudal (Bello y Pino, 2000; Durán y García, 2007), no solo para el control del agua; sino también para el mejoramiento de su distribución (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2005). Esta medición se realiza usualmente con vertedores, que consisten en una pared que intercepta la corriente de un líquido con superficie libre, causando una elevación del nivel aguas arriba de la misma (Sotelo, 2002); sin embargo, la complejidad de los fenómenos hidráulicos en estas estructuras justifica el uso de laboratorios de investigación (Rodríguez *et al.*, 2015) y la modelación matemática para reproducir los cambios de patrones de flujo que ocurren en estos dispositivos (Bacolla *et al.*, 2004). 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 Cipolletti utilizados en sistemas de riego.

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 ocho vertedores trapezoidales tipo Cipolletti con una lámina de hierro de 3 mm de espesor y recubierta con pintura anticorrosiva para alargar el tiempo de uso de los vertedores.

Las dimensiones de vertedores se determinaron acorde con las proporciones de los canales de llegada disponibles en el laboratorio. La relación de los taludes se fijó en 1:4 por ser una característica de los vertedores Cipolletti; sin embargo, se varió el valor de la base (b) en el rango de 5 a 60 cm. Los vertedores de 5 a 15 cm de ancho de base fueron colocados dentro del canal hidrodinámico para ensayos de vertedores (canal pequeño) y en el canal contiguo se instalaron los vertedores de 20 a 60 cm de ancho de base como se muestra en la Figura 1.

its magnitude must be known so, the farmer can implement flow measurement, not only for water control, but also for the improvement of distribution (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2005). This measurement is usually performed with weirs, consisting of a wall intercepting the flow of a liquid free surface, causing an elevation of the water level upstream (Sotelo, 2002); however, the complexity of the hydraulic phenomena in these structures justifies the use of research laboratories (Rodríguez *et al.*, 2015) and mathematical modeling to reproduce flow patterns changes occurring in these devices (Bacolla *et al.*, 2004). Taking into account the matters above mentioned, the objective of this work is to propose mathematical models that allow accurate simulation of the flow in Cipolletti weirs used in irrigation systems.

METHODS

The research was conducted at the Laboratory of Fluid Mechanics and Hydraulics of the University San Carlos of Guatemala consisting of a water supply system by pumping and a tank for volumetric capacities. For the development of the experiments eight trapezoidal weirs Cipolletti type with a 3 mm thick iron sheet and coated with anticorrosive paint to lengthen the time of use of the material, were designed and manufactured

Device dimensions were determined according to the proportions of arrival channels available in the laboratory. The slope ratio was set at 1: 4 as being a feature of Cipolletti weirs; however, the value of the base (b) in the range of 5 to 60 cm was varied. Weirs of 5 to 15 cm wide base were placed into the basin for testing weirs (small channel) and in the adjacent channel; chutes were installed with 20 to 60 cm of base width as it is shown in Figure 1.

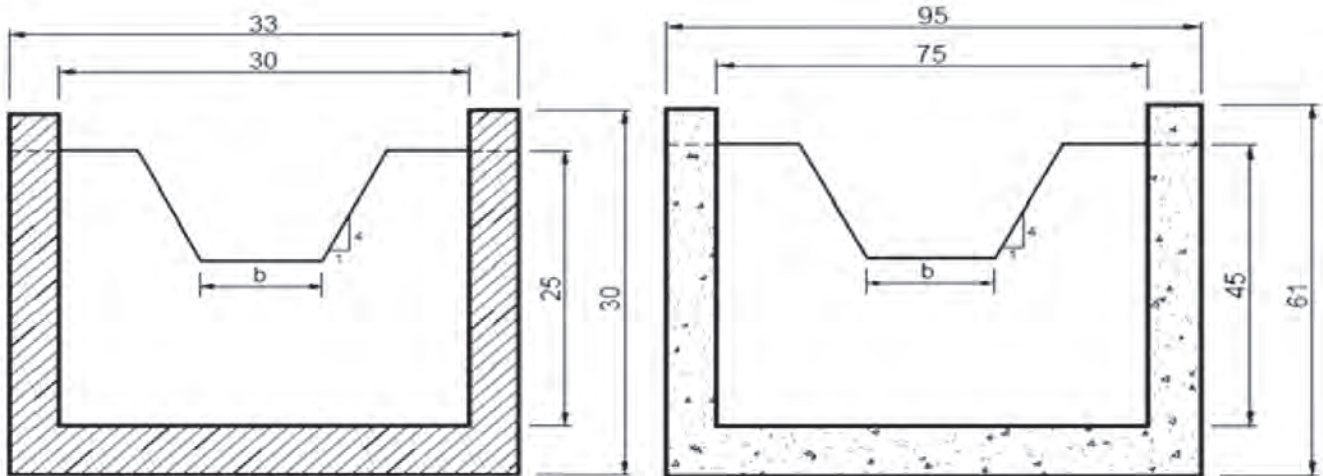


FIGURE 1. Channel for weirs test.
FIGURA 1. Canal para ensayo de vertedores.

En cada vertedor se realizó un bisel para que el fluido tenga menor contacto con la pared y su salida sea en forma parabólica, lo que permite el establecimiento de una zona aireada bajo la cresta.

In each weir a bevel was made so that the fluid has less contact with the wall and its output is in a parabolic shape that allows the establishment of an aerated area under the crest. This

ta de la escotadura. Este juega un papel importante, debido a que no permite que el flujo se deslice sobre la cara exterior por lo que disminuye el efecto de la viscosidad sobre la pared del vertedor.

Con el propósito de fijar el vertedor 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 25 mm de ancho en el perímetro de los vertedores con base menores a 15 cm. En el caso de vertedores de ancho grande se colocó sikaflex como adhesivo y sellador.

En los vertedores pequeños ($b < 15$ cm) los ensayos se realizaron en el canal hidráulico del laboratorio y en los vertedores grandes ($b > 20$ cm) se utilizó el canal contiguo. En todas las mediciones de altura (H) se controló el caudal suministrado para lograr su estabilización; sólo se consideró como lecturas válidas las que presentaron zona aireada bajo la lámina vertiente.

La distancia (d) para la toma de las lecturas H se calculó teniendo en cuenta la condición $d \geq 4H$; por lo que en vertedores de ancho pequeños la distancia fue de 51 cm y en los vertedores anchos de solera grandes la distancia fue de 100 cm; midiéndose desde la posición del vertedor 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 vertedores y posteriormente obtener la ecuación experimental de cada uno de ellos mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{obs} = \frac{V}{t} \quad (1)$$

donde:

Q_{obs} : caudal observado (L/s);

V : volumen captado en el recipiente colector calibrado (L);

T : tiempo para captar el volumen en el recipiente (s).

El caudal experimental se estimó como en la mayoría de medidores de caudal mediante el siguiente modelo de tipo exponencial:

$$Q_{exp} = K.H^n \quad (2)$$

donde:

Q_{exp} : caudal experimental para cada tipo de vertedor (L/s);

H : altura sobre la cresta del vertedor (cm);

K y n : coeficientes de ajustes.

En el modelo anterior se hizo lineal la relación entre Q y H a partir de la construcción de un gráfico de $\text{Log}Q = f(\text{Log}H)$; obteniéndose un modelo lineal del tipo $Y = aX - b$ de donde $Y = \text{Log}Q$ y $X = \text{Log}H$. De este modo se obtuvieron los valores de K y de n de la forma siguiente:

$$n = a \quad (3)$$

$$K = \text{Log}^{-1}(b) \quad (4)$$

El modelo calibrado para la obtención del caudal real en vertedores trapezoidales tipo Cipolletti se determinó como sigue:

$$Q_{calib} = C_d \cdot Q_t \quad (5)$$

donde:

Q_{calib} : caudal real obtenido por la calibración de los vertedores (L/s);

Q_t : caudal teórico (L/s);

C_d : coeficiente de descarga.

Asimismo, el modelo para obtener el caudal teórico para vertedores trapezoidales es:

plays an important role, because it does not allow the flow to slide on the outer face, thereby decreasing the effect of viscosity on the wall of the weir.

In order to fix the weir at the outlet of hydrodynamic channel and to avoid leaks or filtrations that could affect the measurements, it was necessary the placement of 25 mm wide rubber ribbons in the perimeter of the weirs with smaller bases ($b < 15$ cm). In the case of weirs of great width, sikaflex was placed like adhesive and sealer. In small weirs ($b < 15$ cm) assays were performed in the laboratory hydraulic channel and in large weirs ($b > 20$ cm) the adjacent channel was used. In all measurements of height (H), the flow supplied to achieve stabilization was controlled; only readings which had aired zone under the sheet slope were considered valid.

The distance (d) for taking H readings was calculated taking into account the condition $d \geq 4H$; because of that in weirs of small width the distance was of 51 cm and in the wide wires the distance was of 100 cm; measured from the weir position in longitudinal direction.

For each reading of load H carried out, three volumetric measurements were made to calculate, by means of arithmetic average, the flow that circulates through the weirs and later obtaining the experimental equation of each one of them by means of the following formulation:

$$Q_{obs} = \frac{V}{t} \quad (1)$$

where Q_{obs} is the observed flow rate (L/s); V the volume captured in the calibrated container (L); t the time to capture the volume in the container (s).

The experimental flow was estimated as in most flowmeters, using the following exponential model:

$$Q_{exp} = K.H^n \quad (2)$$

where Q_{exp} is the experimental flow for each type of weir (L/s); H height above the weir crest (cm); k and n coefficients settings

In the above model, the relationship between Q and H was linearized from building a graph $\text{Log}Q = f(\text{Log}H)$; obtaining a linear model of the type $Y = aX - b$ where $Y = \text{Log}Q$ and $X = \text{Log}H$. Thus the values of K and n were obtained as follows:

$$n = a \quad (3)$$

$$K = \text{Log}^{-1}(b) \quad (4)$$

The calibrated model for obtaining actual flow in trapezoidal Cipoletti weirs was determined as follows:

$$Q_{calib} = C_d \cdot Q_t \quad (5)$$

where Q_{calib} is the actual flow obtained by calibration of weirs (L/s); Q_t theoretical flow (L/s); C_d discharge coefficient.

$$Q_t = 0,0186.b.H^{3/2} \tag{6}$$

donde:

Q_t : caudal teórico (L/s);

b : longitud de la cresta del vertedor (m);

H : altura observada (m).

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) se obtiene:

$$Q_{calib} = 0,0186.C_d.b.H^{3/2} \tag{7}$$

El coeficiente de descarga se obtuvo a partir de la construcción de un gráfico de caudal real contra caudal teórico el cual se ajustó a un modelo lineal; donde la pendiente de la recta es el valor del coeficiente de descarga el cual se utilizó en la generación de un modelo matemático a partir del programa estadístico informático Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) con el cual se relacionaron las distintas bases de los vertederos trapezoidales b , la altura de carga H para la simulación del caudal Q que responde al siguiente modelo:

$$Q = k.b.H^n \tag{8}$$

donde:

Q : caudal obtenido con el modelo (L/s);

b : base del vertedor (cm);

H : altura de la carga observada (cm);

K y n : constantes del modelo a determinar con el programa SPSS.

La ecuación experimental general para la estimación del caudal descargado por el vertedor Cipolletti (Q_{gen}) se obtuvo a partir de deducir una función para calcular el coeficiente de descarga respecto a la base del vertedor que fue sustituida posteriormente en la ecuación (7).

La validación de los modelos propuestos se realizó mediante el error relativo promedio (Erp) el cual permite la comparación entre el caudal observado y el simulado mediante los diferentes procedimientos utilizados en la investigación (Q_{sim}). La ecuación empleada fue la siguiente:

$$Erp = \left| \frac{Q_{obs} - Q_{sim}}{Q_{obs}} \right| 100 \tag{9}$$

donde:

Erp : error relativo promedio;

Q_{obs} : caudal observado (L/s);

Q_{sim} : caudal simulado (L/s).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los parámetros K y n para el ajuste del modelo exponencial

En la Figura 2 se presentan los resultados alcanzados en condiciones de laboratorio de los parámetros K y n respecto al valor de la base del vertedor. Se comprobó que ambos parámetros se relacionan con la base del vertedor b mediante una función polinomial de segundo orden. En el caso del parámetro n el coeficiente de determinación encontrado fue aceptable con valor de 0,70; sin embargo el parámetro K alcanzó un ajuste excelente con un coeficiente de determinación superior a 0,97. Estos resultados permitieron la construcción del modelo exponencial del tipo $Q_{exp} = K \times H^n$ para la simulación de los caudales experimentales en cada vertedor evaluado.

Also, the model to obtain the theoretical flow for trapezoidal weirs is:

$$Q_t = 0,0186.b.H^{3/2} \tag{6}$$

where Q_t is the theoretical flow (L/s); b the length of the weir crest (m); H the observed height (m).

By substituting equation (6) into equation (5), it is obtained:

$$Q_{calib} = 0,0186.C_d.b.H^{3/2} \tag{7}$$

The discharge coefficient was obtained from the construction of a graph of actual flow against theoretical flow that was adjusted to a linear model, where the slope of the line is the value of the discharge coefficient which was used in the generation of a mathematical model from the computer statistical program Statistical Package for Social Sciences (SPSS) with which the different bases (b), and the loading height (H) were related for simulating the flow (Q) responsive to the following model:

$$Q = k.b.H^n \tag{8}$$

where Q is the flow rate obtained with the model (L/s); b the base of the weir (cm); H height of the observed load (cm) and k , n constants of the model to determine with SPSS program. The general experimental equation for estimating the flow discharged by the Cipolletti weir (Q_{gen}) was obtained from deducting a function to calculate the discharge coefficient from the base of the weir that was replaced subsequently in equation (7).

The validation of the proposed model was performed using the average relative error (Erp) which allows comparison between the observed and simulated flow through the different procedures used in research (Q_{sim}). The equation used was as follows:

$$Erp = \left| \frac{Q_{obs} - Q_{sim}}{Q_{obs}} \right| 100 \tag{9}$$

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of K and n parameters for adjusting the exponential model

Figure 2 shows the results achieved under laboratory conditions for the parameters K and n regarding the value of the base of the weir. It was found that both parameters relate to the base of the weir (b) using a second order polynomial function. In the case of parameter n the determination coefficient found was acceptable with value of 0.70; however the parameter K reached an excellent fit with a determination coefficient greater than 0.97. These results allowed the construction of the exponential model type $Q_{exp} = K \times H^n$ for the simulation of experimental flows in each weir evaluated.

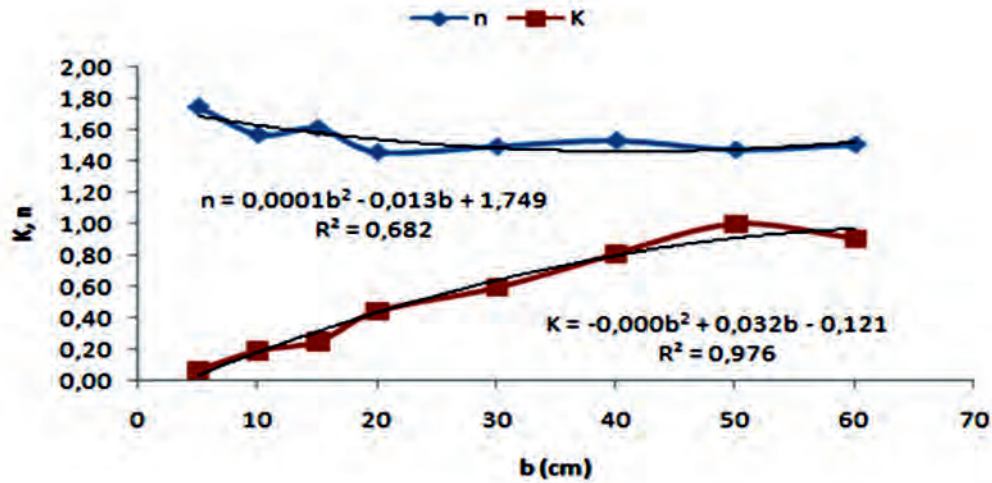


FIGURE 2. Relationship between base of the weir and K, n parameters.
 FIGURA 2. Relación entre la base del vertedor y los parámetros K y n .

Análisis del coeficiente de descarga C_d para la calibración de la ecuación del vertedor

En la Figura 3 se muestra el comportamiento del coeficiente de descarga C_d para la calibración de la ecuación del vertedor. Se demostró que la relación funcional de este coeficiente con la base del vertedor es del tipo potencial con un coeficiente de determinación de 0,979. El exponente de esta función tiene pendiente negativa; lo que indica que en la medida en que el valor del ancho de la base se incrementa, se reduce de forma proporcional el coeficiente de descarga. Los valores de este coeficiente encontrado en esta investigación oscilan entre 1,01 y 1,31; sin embargo, otros autores como Arteaga (1993), Roldán *et al.* (1993) y Pérez (2015), ofrecen coeficientes de descarga entre 0,66 y 0,75 para condiciones similares de altura del agua sobre la cresta, lo que indica que el vertedor Cipolletti evaluado en esta investigación presenta una capacidad superior para la descarga de flujo, lo cual es importante para decidir su utilización en obras hidráulicas en función del caudal que requiera ser desaguado.

Analysis of the discharge coefficient C_d for the weir equation calibration

Figure 3 shows the behavior of the discharge coefficient C_d for the weir equation calibration. It was shown that the functional relationship of this coefficient with the base of the weir is the potential type with a determination coefficient of 0.979. The exponent of this function has negative slope; it is indicating that to the extent that the value of the base width is increased, it proportionally reduces the discharge coefficient. This coefficient values found in this research oscillate between 1,01 and 1.31; however, other authors such as Arteaga (1993), Roldán *et al.* (1993) y Pérez (2015) offer discharge coefficients between 0.66 and 0.75 for conditions similar of water depth over the crest, indicating that the Ciplolletti weirs evaluated in this study have a superior ability to discharge flow, which is important in deciding their use in hydraulic works according to the flow that needs to be dewatered.

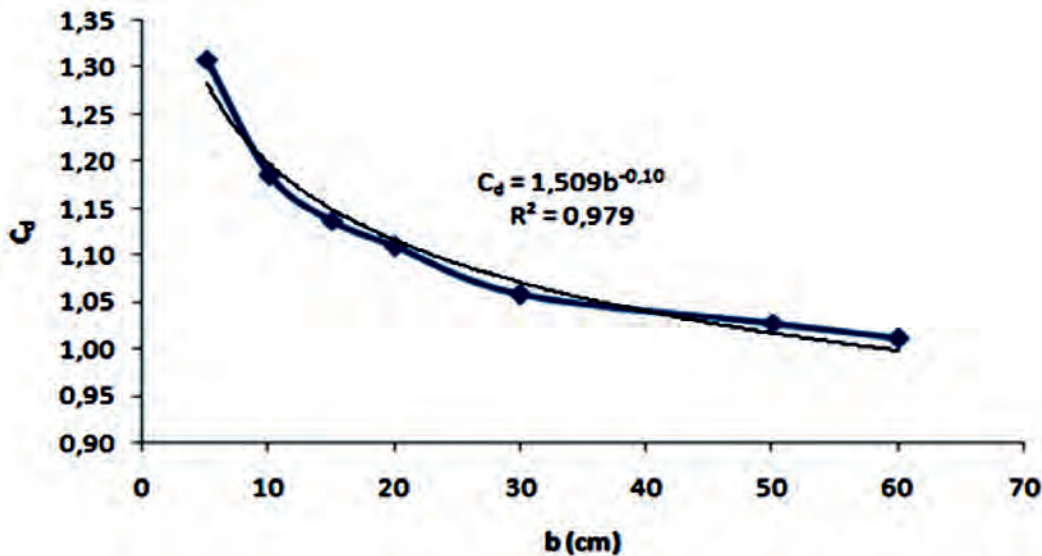


FIGURE 3. Relationship between base and discharge coefficients.
 FIGURA 3. Relación entre la base y el coeficiente de descarga.

Análisis de los modelos para la estimación de los caudales

En la Tabla 1 se exponen los modelos Q_{exp} y Q_{calib} encontrados para la estimación del caudal en vertedores Cipolletti. En todos los casos se encontró un coeficiente de determinación superior a 0,96 lo que indica un ajuste excelente de los datos experimentales a los modelos evaluados. En el modelo que permite determinar el caudal Q_{exp} se encontró que el coeficiente K varió en el rango 0,07 - 0,99 con una tendencia creciente en la medida en que se incrementó el valor de la base y el exponente n alcanzó valores en el entorno de 1,51-1,75.

En el modelo que permite determinar el caudal Q_{calib} el exponente se mantuvo fijo con un valor de 3/2; pero el coeficiente se comportó de manera similar al modelo descrito anteriormente con valores comprendidos entre 0,22-1,13.

Analysis of models for estimating the flow

In Table 1 Q_{exp} and Q_{calib} models found for estimating flow in Cipolletti weir are exposed. In all cases a determination coefficient was superior to 0,96 indicating excellent fit of the experimental data to the models evaluated. In the model to determine the flow Q_{exp} it was found that the coefficient K varied in the range from 0,07 to 0,99 with a growing trend in the extend the value of the base and the exponent n were increased and reached values in the range of 1,51-1,75.

In the model to determine the flow Q_{calib} , the exponent remained fixed with a value of 3/2; but the coefficient behaved in a similar way as the model described above did, with values ranging from 0,22 to 1,13.

TABLE 1. Models found for flow estimation
TABLA 1. Modelos encontrados para la estimación del caudal

Base (cm)	Q_{exp}	Q_{calib}
5	$Q_{exp} = 0,0709H^{1,745}$	$Q_{calib} = 0,1216H^{3/2}$
10	$Q_{exp} = 0,1919H^{1,570}$	$Q_{calib} = 0,2203H^{3/2}$
15	$Q_{exp} = 0,2500H^{1,610}$	$Q_{calib} = 0,3169H^{3/2}$
20	$Q_{exp} = 0,4446H^{1,458}$	$Q_{calib} = 0,4125H^{3/2}$
30	$Q_{exp} = 0,5957H^{1,495}$	$Q_{calib} = 0,5902H^{3/2}$
40	$Q_{exp} = 0,8110H^{1,532}$	$Q_{calib} = 0,8677H^{3/2}$
50	$Q_{exp} = 0,9977H^{1,473}$	$Q_{calib} = 0,9552H^{3/2}$
60	$Q_{exp} = 0,9057H^{1,507}$	$Q_{calib} = 1,1276H^{3/2}$

El modelo para estimar el caudal del vertedor obtenido mediante el programa SPSS (Q_{SPSS}) se expone a continuación:

$$Q_{SPSS} = 0,015 \cdot b \cdot H^{1,677}$$

$$R^2 = 0,992 \tag{10}$$

Este modelo presenta un elevado coeficiente de determinación y permite estimar el valor del caudal que descarga un vertedor Cipolletti para cualquier valor de la base b a partir de la medición de la altura del agua sobre la escotadura (H).

En la tabla 1 se comprueba que para la estimación de los caudales Q_{exp} y Q_{calib} se requiere una función específica para cada ancho de la base; sin embargo este inconveniente fue resuelto mediante la deducción de una ecuación experimental general deducida de la forma siguiente:

$$C_d = 1,509b^{-0,10} \tag{11}$$

La sustitución de la ecuación (11) en la ecuación (7) resulta la ecuación (12):

$$Q_{gen} = 0,02808b^{0,899}H^{3/2} \tag{12}$$

donde:

- Q_{gen} : caudal obtenido con la ecuación experimental general (L/s);
- b : base del vertedor (cm);
- H : altura de la carga observada (cm).

Análisis de la comparación entre los diferentes modelos evaluados en la investigación

En la Figura 4 se muestra el resultado de la comparación entre los diferentes modelos evaluados en la investigación. Se

The model to estimate the flow of the weir obtained using SPSS program (Q_{SPSS}) is as follows:

$$Q_{SPSS} = 0,015 \cdot b \cdot H^{1,677}$$

$$R^2 = 0,992 \tag{10}$$

This model has a high determination coefficient and allows estimating the discharge value of a Cipolletti weir for any value of the base (b) starting from the measuring of the water height (H).

In Table 1 it is found that for estimation of flow Q_{calib} and Q_{exp} a specific function is required for each width of the base; however, this problem was solved by deducting a general experimental equation derived as follows:

$$C_d = 1,509b^{-0,10} \tag{11}$$

Substituting equation (11) into equation (12) results:

$$Q_{gen} = 0,02808b^{0,899}H^{3/2} \tag{12}$$

where Q_{gen} is the flow obtained with the general experimental equation (L/s); b the base of the weir (cm); H the height of the observed load (cm).

Analysis of the comparison between the different models evaluated in the investigation

The result of the comparison among the different models evaluated in research is shown in Figure 4. It was found that the equations derived for estimating the flow in

constató que las ecuaciones deducidas para estimar el caudal en vertedores Cipoletti fueron muy precisas al lograr resultados similares a los caudales observados; sólo el caudal teórico (Q_t) y el caudal obtenido mediante el programa SPSS (IBM Corporation, 2003) (Q_{SPSS}) mostraron tendencias a la subestimación y la sobreestimación respectivamente de los valores de esta variable.

Cipoletti weirs were very accurate as they achieve similar results to those observed flows; only the theoretical flow (Q_t) and the flow rate obtained using SPSS program (IBM Corporation, 2003) (Q_{SPSS}) showed tendencies to underestimation and overestimation of the values of this variable, respectively.

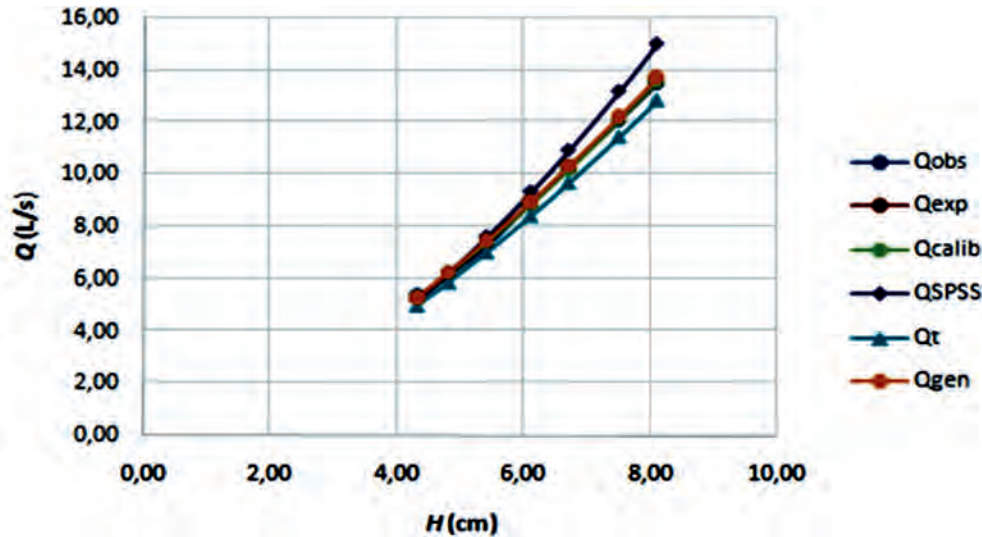


FIGURE 4. Behavior of the models evaluated in the Cipoletti weir.
 FIGURA 4. Comportamiento de los modelos evaluados en el vertedor Cipoletti.

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

Los errores cometidos por los modelos evaluados en la estimación del caudal se analizaron a través del error relativo promedio (Erp). En la Tabla 2 se demuestra que los modelos para determinar los caudales Q_{exp} , Q_{calib} y Q_{gen} presentan valores inferiores al 2% por lo que pueden ser utilizados de manera confiable en el control de flujos en condiciones abiertas. Los resultados más desfavorables se encontraron en los modelos Q_t y Q_{SPSS} con un error de 5,49% que resultó ser superior al límite máximo permisible de 5%. Este comportamiento indica que no deben aplicarse para determinar el caudal en vertedores Cipoletti.

Analysis of the errors committed by the models in estimating the flow

Mistakes made by the models evaluated in estimating the flow is analyzed using the average relative error (Erp). Table 2 shows that the models to determine the flows Q_{exp} , Q_{calib} and Q_{gen} have values lower than 2%, so they can be used reliably to control flows in open conditions. The worst results were found in Q_t and Q_{SPSS} models with an error of 5,49% that exceed the maximum allowable limit of 5%. This behavior indicates that they should not be applied to determine the flow in Cipoletti weirs.

TABLE 2. Average relative error of models in estimating the flow
 TABLA 2. Error relativo promedio de los modelos en la estimación del caudal

H (cm)	Q_{exp}	Q_{calib}	Q_{SPSS}	Q_t	Q_{gen}
4,30	1,25	1,45	2,73	6,83	0,19
4,80	0,74	0,59	1,24	4,89	1,78
5,40	1,82	1,73	4,55	3,82	3,02
6,10	0,74	0,76	4,21	6,17	0,45
6,70	0,65	0,63	6,10	6,05	0,58
7,50	0,14	0,06	8,85	5,51	1,15
8,10	0,22	0,34	10,79	5,14	1,55
Promedio	0,79	0,79	5,49	5,49	1,25

Los resultados alcanzados en esta investigación están asociados al riguroso trabajo de diseño y construcción de los vertedores evaluados; así como a la obtención de los datos experimentales. En este sentido Aguilar (2001), se refirió a la necesidad de verificar de forma correcta diferentes parámetros como altura y ancho del vertedor Ci-

The results achieved in this research are associated with rigorous design and construction of weirs evaluated; as well as with the obtaining of the experimental data. In this respect, Aguilar (2001) referred the need to properly check different parameters such as height and width of the Cipolet weirs, because

polleti; pues de no cumplirse la precisión en la estimación del gasto, no es confiable. En este mismo sentido Bos *et al.* (1986) y Santos *et al.* (2010), afirmaron que es necesario lograr un adecuado diseño e instalación del aforador para medir y regular el caudal de agua de los canales de riego; puesto que el correcto diseño y empleo de estas instalaciones puede contribuir a disminuir la sobreexplotación de acuíferos y al ahorro energético por menores necesidades de bombeo (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2005).

Este trabajo pueden contribuir al ahorro de los recursos hídricos a través del perfeccionamiento de la medición de los caudales mediante vertedores Cipolleti; pues según García y Pérez (2004) y Tarjuelo (2005), es necesario la utilización eficiente y el manejo eficaz de estos dispositivos ya que el agua es un recurso cada vez más escaso y existe más competencia entre sus diversos usos; por tanto, las estrategias para lograr la sustentabilidad de los sistemas de riego debe tener en cuenta la instalación de sistemas de medición, que permitan el control de la cantidad de agua empleado por el usuario Fernández *et al.* (2009).

CONCLUSIONES

- Los coeficientes de ajuste del modelo exponencial $Q = K \times H^n$ mostraron una aceptable relación funcional con el ancho de la base del vertedor Cipolleti; lo que permitió encontrar un modelo polinomial de segundo orden para la estimación de forma confiable de los parámetros K y n .
- Los modelos para la estimación de los caudales Q_{exp} , Q_{calib} y Q_{gen} presentaron una buena correlación con los caudales observados, lo que permite obtener errores menores al 2%.
- La ecuación experimental general que relaciona las alturas de carga, base y coeficiente de descarga obtuvo valores confiables para vertederos con ancho menor a 60 cm y alturas de carga (H) entre 4 y 10 centímetros.
- Los coeficientes de descarga C_d no fueron constantes y su valor tiende a disminuir al aumentarse la base como lo demuestra el modelo matemático de tipo potencial con pendiente negativa.
- El modelo sugerido por los manuales de hidráulica e hidrometría para la estimación del caudal teórico en los vertederos Cipolleti presentó errores superiores al 5%.

if there is not precision in the estimation of the expense, it is not reliable. In that same respect Bos *et al.* (1986) y Santos *et al.* (2010), stated that it is necessary to achieve proper design and installation of the weir to measure and regulate the flow of water from irrigation canals; since the correct design and use of these facilities can help to reduce the overexploitation of aquifers and to energy saving by lower pumping requirements bombeo (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2005).

This work can contribute to saving water resources by improving the measurement of the flow by Cipolleti weirs, because according to García & Pérez (2004) and Tarjuelo (2005), the efficient use and effective management of those devices is necessary due to the increasing water scarcity and the growing competition for its various usages. Therefore, strategies to achieve sustainability of irrigation systems should consider the installation of measurement systems that allow controlling the amount of water utilized by the user Fernández *et al.* (2009).

CONCLUSIONS

- The adjustment coefficients of exponential model $Q=KH^n$ showed an acceptable functional relationship with the width of the Cipolleti weir base, allowing to find a second order polynomial model to estimate reliably the parameters K and n .
- The models for estimating the Q_{exp} , Q_{calib} and Q_{gen} flows showed good correlation with the observed flow, which allows errors less than 2%.
- The general experimental equation relating the loading heights, base and discharge coefficient obtained reliable values for weirs with width smaller than 60 cm and load heights (H) between 4 and 10 centimeters.
- The discharge coefficients C_d were not constant and their values tend to decrease with increased base as evidenced by the potential mathematical model with a negative slope.
- The suggested model by hydraulic and hydrometric manuals to estimate the theoretical flow in Cipolleti weirs, showed errors higher than 5%.

REFERENCIAS / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, C.A.: *Vertedores, [en línea]*, Rivas, A.I. (ed.), ser. Autodidáctica de Medición, Ed. Comisión Nacional del Agua - Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México D.F., 23 p., 2001, ISBN: 968-5536-02-3, Disponible en: http://repositorio.imta.mx:8080/cenca-repositorio/bitstream/123456789/1115/1/IMTA_097.pdf, [Consulta: 5 de enero de 2017].
- ARTEAGA, T.R.E.: *Hidráulica elemental*, Ed. UAC. Dirección de Difusión Cultural, Departamento de Irrigación, 1.ª ed., Chapingo, México, 335 p., 1993, ISBN: 978-968-884-238-6.
- BACOLLA, C.; DABIN, A.; FRANCK, G.: "Simulación Numérica de Tomas de Agua en Muelles", *Mecánica Computacional*, 23: 2009–2030, 2004, ISSN: 1666-6070.
- BELLO, M.A.; PINO, M.T.: "Medición de presión y caudal", *Boletín INIA*, 28.ª ed., p. 20, Punta Arenas, Chile, 2000, ISSN: 0717-4829.
- BOS, M.G.; REPLOGLE, J.A.; CLEMMENS, A.J.: *Aforadores de caudal para canales abiertos*, Ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, 293 p., 1986, ISBN: 978-90-70260-92-7.
- DURÁN, P.J.; GARCÍA, P.M.: "Desarrollo de tecnologías apropiadas para riego por surcos en terrazas paralelas y tierras con pendiente", *Ingeniería del agua*, 14(3): 187-198, 2007, ISSN: 1886-4996, 1134-2196, DOI: 10.4995/ia.2007.2911.
- FERNÁNDEZ, C.A.; HOLZAPFEL, E.; DEL CALLEJO, I.; BILLIB, M.: *Manejo sostenible del agua para riego en sudamérica*, Ed. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Veterinarias, Buenos Aires, Argentina, 175 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 América»", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13(1): 47-51, 2004, ISSN: 1010-2760.

- IBM CORPORATION: *IBM SPSS Statistics*, [en línea], (Versión 11.5), [Windows], Ed. IBM Corporation, U.S, 2003, *Disponible en: http://www.ibm.com*.
- INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA: *Ahorro y eficiencia energética en agricultura de regadío*, Ed. IDAE, Madrid, España, 36 p., 2005, ISBN: 978-84-86850-94-4.
- OLVERA, S.M.D.; BAHENA, D.G.; ALPUCHE, G.O.; GARCÍA, M.F.: “La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos. Estudio de caso en Chihuahua, México”, *Ambiente y Desarrollo*, 18(35): 23-36, 2014, ISSN: 0121-760.
- PÉREZ, F.W.J.: “Uso del suelo como tratamiento secundario para la remoción de materia orgánica de las aguas residuales domesticas”, *Agua, saneamiento & Ambiente*, 10(1): 31-38, 2015, ISSN: 2222-2499.
- RODRÍGUEZ, S.J.; VALERO, C.; MENDOZA, K.: “Análisis experimental de coeficientes de descarga en vertederos trapezoidales de pared delgada – Parte I”, *Yachana*, 4(2): 30-37, 2015, ISSN: 1390-777.
- ROLDÁN, J.; PULIDO, I.; CAMACHO, E.; ALCAIDE, M.; LOSADA, A.: *Problemas de hidráulica para riegos*, Ed. Servicios de publicaciones, Universidad de Córdoba, España, 335 p., 1993, ISBN: 84-7801-526-4.
- SANTOS, P.L.; DE JUAN, J.A.; PICORNELL, B.M.R.; TARJUELO, J.M.: *El riego y sus tecnologías*, [en línea], Ed. CREA-UCLM, 1.ª ed., España, 296 p., 2010, ISBN: 978-84-692-9979-1, *Disponible en: http://www.academia.edu/download/33889207/El_Riego_y_sus_Tecnologias.pdf*, [Consulta: 26 de noviembre de 2016].
- SOTELO, Á.G.: *Hidráulica general*, Ed. Limusa, México, 2002, ISBN: 978-968-18-0503-6.
- TARJUELO, J.M.: *El riego por aspersión y su tecnología*, Ed. Mundi-Prensa, 3.ª ed., Madrid, España, 581 p., 2005, ISBN: 84-8476-225-4.

Received: 13/01/2016.

Approved: 14/11/2016.

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

Julio Adrián Miranda-Escobar, E-mail: ingluisandoval@gmail.com

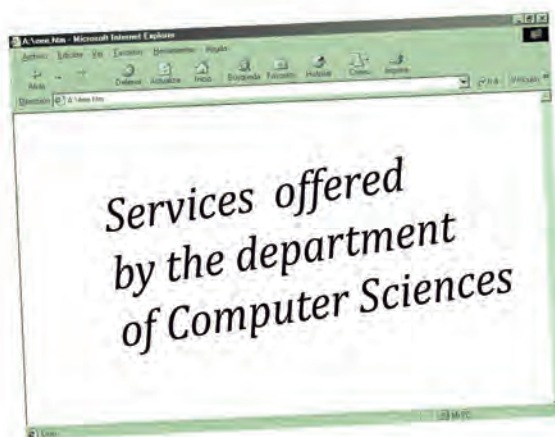
Oscar Brown-Manrique, E-mail: obrown@unica.cu

Albi Mujica-Cervantes, E-mail: albi@unica.cu

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

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

AGRARIAN UNIVERSITY OF HAVANA



DESIGN AND ASSEMBLY OF NETWORK PROJECTS
DESIGN AND ASSEMBLY OF EDUCATIONAL COMPUTER SCIENCES

Courses

- **Web Page Desing**
- **Programing Under Web Environment**
- **Programaming Under Windows Environment**
- **Geoggraphic Information System**
- **Multimedia Desing**
- **Educational Television**