

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ENERGÍA-MOMENTO EN LA CALIBRACIÓN DE UNA COMPUERTA RADIAL

APPLICATION OF ENERGY-MOMENTUM METHOD TO RADIAL GATE DISCHARGE CALIBRATION

Gilberto López-Canteñ^{1*}, Benjamín de León-Mojarro², Víctor Prado-Hernández³, Abraham Rojano-Aguilar⁴

¹Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. ⁴Dirección General Académica. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. (alelopez10@hotmail.com). ²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Riego y Drenaje. 62550. Progreso, Jiutepec, Morelos. (bleon@tlaloc.imta.mx). ³Instituto de Recursos Naturales. Campus Montecillos. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (joviph@colpos.mx). ⁴Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco. Km. 38.5, Chapingo, Estado de México. (rojanoa@yahoo.com).

RESUMEN

La calibración de las compuertas radiales en descarga sumergida en los distritos de riego es un problema a resolver y, por tanto, se aplicó el método de energía - momento para condiciones de descarga libre y ahogada en un canal experimental ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, en México. Se evaluaron aberturas de compuerta de 0.07 a 0.27 m, gastos de 0.062 a 0.161 m³ s⁻¹ y alturas de perno de 0.535 y 0.625 m para descarga libre y 0.446, 0.669 y 0.802 m para descarga ahogada, midiéndose los niveles de agua con un sistema de adquisición de datos automatizado. Se determinó que el método de energía - momento puede aplicarse en la calibración de compuertas radiales, con un error inferior a 3.55 % para descarga libre y 9.6 % para descarga ahogada. Además se obtuvo que el modelo empírico para la determinación del factor de corrección de la energía de Clemmens, es más robusto en la estimación del gasto, siendo la desviación absoluta 59 % inferior con respecto al modelo de Wahl. No obstante, debe seguirse ajustando este parámetro hidráulico para aumentar la precisión de la estimación del gasto.

Palabras clave: calibración, canales, compuerta, medición de flujo.

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de la automatización en los sistemas de riego, las compuertas se han convertido en estructuras útiles para medir

ABSTRACT

The calibration of radial gates with submerged discharge in irrigation districts is a problem to solve and therefore the energy - momentum method was applied for free and submerged discharge conditions in an experimental canal located at the Universidad Autónoma Chapingo, in México. Gate openings from 0.07 to 0.27 m were evaluated, as well as flows from 0.062 to 0.161 m³ s⁻¹ and pin heights of 0.535 and 0.625 m for free discharge and 0.446, 0.669 and 0.802 m for submerged discharge; water levels were measured with an automated data acquisition system. It was determined that the energy - momentum method can be applied in the calibration of radial gates, with an error of less than 3.55 % for free download and 9.6 % for submerged discharge. In addition it was found that the empirical model for determining the energy correction factor by Clemmens *et al.* (2003) is more robust in the estimation of flow, being the absolute deviation 59% lower than the model by Wahl *et al.* (2003). However, this hydraulic parameter must continue being adjusted to enhance the accuracy of the flow estimation.

Keywords: calibration, canals, gate, flow measurement.

INTRODUCTION

With the development of automation in irrigation systems, gates have become useful structures to measure flow accurately, with the following advantages: 1) they serve as a regulatory structure but can be used to measure flow, thus reducing costs and time of design and construction; 2) they provide measurements of flow without incurring in additional load losses;

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Octubre, 2009. Aprobado: Octubre, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 895-905. 2010.

el flujo de forma precisa, con las siguientes ventajas: 1) funcionan como estructura de regulación pero pueden servir para medir flujo, por lo que se reducen los costos y tiempos de diseño y construcción; 2) proporcionan mediciones de flujo sin incurrir en pérdidas de carga adicionales; y 3) facilitan el control automático permitiendo que las maniobras de las compuertas sean precisas y se garantice el flujo de referencia en tiempo real (Wahl y Clemmens, 2005).

En los distritos de riego de México se usan las compuertas radiales calibradas para regular el tirante aguas arriba de las estructuras a fin de abastecer adecuadamente las tomas laterales y controlar el caudal a través de ellas. El uso de estas estructuras para regular el caudal y el tirante requiere conocer la precisión de la medida del caudal ya que, según De León *et al.* (2006), en la ejecución de maniobras de compuertas se debe verificar que el punto de funcionamiento de dichas estructuras se encuentre fuera de la zona de saturación, es decir, que exista la carga hidráulica suficiente para estimar el caudal con buena precisión.

El procedimiento tradicional de calibración de compuertas se basa en aplicar la ecuación de energía como un orificio sumergido (Lozano *et al.*, 2009). Los coeficientes de la ecuación de gasto se han determinado empíricamente mediante un ajuste de datos obtenidos de pruebas de laboratorio y de campo. La precisión en la estimación del gasto a descarga libre se considera buena, pero para el caso de flujo sumergido los valores estimados tienen mayor incertidumbre, siendo la condición más difícil el flujo en la zona de transición y cuando el canal aguas abajo es más ancho que la compuerta (Montes, 1997; Buyalski, 1983). Además, cuando ocurre un salto hidráulico las pérdidas de energía son difíciles de cuantificar, lo cual dificulta la aplicación de la ecuación de energía, por lo que generalmente se requiere la ecuación de momento para estos casos (López *et al.*, 2009).

Por tanto, López *et al.* (2009) aplicaron experimentalmente el modelo de energía-momento propuesto por Spann *et al.* (2003) en la calibración de una compuerta plana vertical. Sin embargo, la aplicación de este modelo a las compuertas radiales es limitada, por no considerar el efecto del ángulo del labio de la estructura que influye de manera significativa en el coeficiente de contracción (Wahl, 2005), y por tanto en la estimación del gasto.

Clemmens *et al.* (2003) desarrollaron un método de calibración para compuertas radiales que considera

and 3) they facilitate automatic control allowing gate maneuvers to be accurate and guaranteeing the reference flow to occur in real time (Wahl and Clemmens, 2005).

In the irrigation districts of México radial gates calibrated to regulate the upstream water depth of the structures are used to adequately supply the laterals and monitor the flow through them. The use of these structures to regulate the flow and the water depth requires knowledge on the accuracy of flow measurement since, according to De León *et al.* (2006), the gate maneuvering must verify that the operating point of such structures is outside the saturation zone; in other words sufficient hydraulic load is required to estimate the flow rate with great accuracy.

The traditional gate calibration procedure is based on applying the energy equation as a submerged orifice (Lozano *et al.*, 2009). The coefficients of the flow equation are determined empirically by adjusting the data obtained from the laboratory and field testing. The accuracy in estimating the flow at free download is considered good, but for the submerged flow, the estimated values are more uncertain, when the most difficult condition is related to the flow in the transition zone and when the downstream channel is wider than the gate (Montes, 1997; Buyalski, 1983). Furthermore, when a hydraulic jump occurs energy losses are difficult to quantify, which complicates the implementation of the energy equation, so the momentum equation is usually required in these cases (Lopez *et al.*, 2009).

Therefore, López *et al.* (2009) experimentally applied the energy-momentum model proposed by Spann *et al.* (2003) in the calibration of a flat vertical sluiceway. However, applying this model to radial gates is limited as it does not consider the effect of the angle of the structure's lip that significantly influences the rate of contraction (Wahl, 2005), and therefore the flow estimate.

Clemmens *et al.* (2003) developed a calibration method for radial gates that considers the previous statement. It is based on the upstream energy equation of the structure in the case of free discharge, and the downstream momentum equation of the same structure in the case of submerged discharge, requiring an iterative solution to solve both equations. This method uses empirical relationships to determine parameters such as the coefficient of

el señalamiento anterior. Se basa en la ecuación de energía aguas arriba de la estructura para el caso de descarga libre y la ecuación de momento aguas abajo de la misma para el caso de descarga ahogada, siendo necesaria una solución iterativa para resolver ambas ecuaciones. Este método usa relaciones empíricas para determinar parámetros como el coeficiente de contracción y las pérdidas de energía, por lo que se requiere su verificación experimental y en campo.

Debido a la necesidad de encontrar procedimientos que permitan calibrar las compuertas como estructura de aforo en los canales de riego, el objetivo del presente estudio fue aplicar un método de energía - momento (E-M) en la calibración de una compuerta radial que funciona a descarga libre y ahogada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de las instalaciones

Para la fase experimental se usó el canal Rehbock ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Irrigación en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), en Chapingo, Estado de México. El canal Rehbock es de sección rectangular, tiene una longitud de 20 m, plantilla de 0.6 m, altura de 1 m y pendiente de 0.0005. La descripción detallada del canal experimental aparece en López *et al.* (2009). A 5.5 m del inicio del canal se colocó y operó una compuerta radial de 0.75 m de largo, 0.60 m de ancho y radio de compuerta de 0.9 m, para medir los parámetros hidráulicos requeridos en la calibración de la estructura.

La medición de los niveles de agua se realizó con un sistema de adquisición de datos automatizado con cuatro sensores resistivos para medición casi continua en tiempo real. Su principio de funcionamiento se basa en la variación de la resistencia eléctrica que se produce en la interfase agua-aire y que se determina con un potenciómetro; además se opera con una precisión mínima del 1 % (Martínez, 1994; Pastor y Arteaga, 1998). Los sensores se ubicaron en el canal de la siguiente forma: tres con un rango de medición de 0 a 1 m se colocaron a 1 m aguas arriba de la compuerta, y a 1.90 y 13.40 m aguas abajo de la estructura; el cuarto sensor, con un rango de medición de 0 a 0.50 m, se colocó a 0.8 m aguas arriba del vertedor para determinar la carga y con ésta calcular el gasto de entrada.

Una vez instalado el sistema de adquisición de datos y calibrado los sensores (García, 1992; Martínez, 1994), se realizaron 355 ensayos para representar la dinámica del agua en la compuerta radial para diferentes condiciones de descarga libre y ahogada. Se evaluaron aberturas de 0.07 a 0.27 m, gastos de 0.062 a 0.161 m³

contraction and loss of energy, hence experimental and field verification is required.

Due to the need of having procedures allowing to calibrate sluiceways as capacity structures in the irrigation canals, the objective of the present study was to apply an energy - momentum (E-M) method for the calibration of a radial gate that works with free and submerged discharge.

MATERIALS AND METHODS

Infrastructure description

For the experimental phase, the Rehbock channel was used, located at the Hydraulics Laboratory of the Irrigation Department of the Universidad Autónoma Chapingo (UACH), in Chapingo, State of México. The Rehbock channel is of rectangular section, 20 m long, a 0.6 m template, 1 m high and a slope of 0.0005. A detailed description of the pilot channel is shown by López *et al.* (2009). At 5.5-m distance from the opening of the canal a radial gate was placed and operated; it was 0.75 m long, 0.60 m wide, and radius of 0.9 m to measure the hydraulic parameters required for the calibration of the structure.

The measurement of water levels was performed with an automated data acquisition system with four resistive sensors for a nearly continuous measuring in real time. Its working principle is based on the variation of the electrical resistance occurring in the water-air interface, which is determined using a potentiometer; also it is operated with a minimal accuracy of 1 % (Martínez, 1994; Pastor and Arteaga, 1998). The sensors were placed in the channel as follows: three of them with a measuring range from 0 to 1 m were placed at 1 m upstream from the gate, and 1.90 and 13.40 m downstream from the structure; the fourth sensor, with a measurement range from 0 to 0.50 m, was placed at 0.8 m upstream from the spillway to determine the load and then calculate the input flow.

Once the data acquisition system was installed and the sensors calibrated (García, 1992; Martínez, 1994), 355 trials were conducted to represent the dynamics of water in the radial gate for different conditions of free and submerged discharge. Openings from 0.07 to 0.27 m were evaluated, as well as flows of 0.062 to 0.161 m³ s⁻¹ and the pin height, that was 0.535 and 0.625 m for free download, and 0.446, 0.669 and 0.802 m for submerged discharge with different loads.

Energy-momentum method for radial gates

The validity of the model is evaluated for the calibration of radial gates described by Clemens *et al.* (2003) and is the energy-

s^{-1} y la altura de perno fue 0.535 y 0.625 m para descarga libre y 0.446, 0.669 y 0.802 m para descarga ahogada con diferentes cargas.

Método de energía-momento para compuertas radiales

Se evalúa la validez del modelo para la calibración de compuertas radiales descrito por Clemmens *et al.* (2003) y que es la ecuación de energía-momento. Esta ecuación se aplica entre las secciones aguas arriba de la compuerta y la vena contraída (Figura 1), y que para flujo libre es:

$$Q = C_c ab \sqrt{\frac{2g(H_1 - C_c a)}{1 + \varepsilon}} \quad (1)$$

donde, Q es el gasto ($m^3 s^{-1}$); C_c es el coeficiente de contracción (adim.); a es la abertura de la compuerta (m); b es el ancho de la compuerta (m); g es la aceleración de la gravedad (ms^{-2}); H_1 es la carga total (m); $1 + \varepsilon$ es el factor que considera la pérdida de energía aguas arriba de la compuerta y el efecto en la distribución no uniforme de las velocidades en la vena contraída (adim.).

El factor $1 + \varepsilon$ se puede estimar en función del número de Reynolds (R_v) mediante la relación empírica obtenida por Clemmens *et al.* (2003) [En esa publicación hay un error con respecto al exponente de la ecuación, corregido por Lozano *et al.* (2009)]:

$$1 + \varepsilon = 1 + 0.15 e^{-1 \times 10^{-6} R} \quad (2)$$

donde, ε es la base del logaritmo natural; $R = \frac{VR_b}{\nu}$ es el número de Reynolds (adim.); ν es la viscosidad cinemática ($m^2 s^{-1}$); $V = \frac{Q}{b \cdot a}$ es la velocidad característica determinada en la abertura de la compuerta (ms^{-1}); $R_b = \frac{b_1 y_1}{(b_1 + 2y_1)}$ es el radio hidráulico aguas arriba de la compuerta (m); b_1 es el ancho del canal

momentum equation. This equation is applied between the upstream sections of the gate and the vein collapsed (Figure 1), and for free flow is:

$$Q = C_c ab \sqrt{\frac{2g(H_1 - C_c a)}{1 + \varepsilon}} \quad (1)$$

where Q is the flow ($m^3 s^{-1}$); C_c is the contraction coefficient (adim.); a is the gate opening (m); b is the width of the gate (m); g is the acceleration of gravity (ms^{-2}); H_1 is the total load (m); $1 + \varepsilon$ is the factor that considers the upstream energy loss of the gate and the effect on the non-uniform distribution of velocities in the collapsed vein (adim.).

The factor $1 + \varepsilon$ can be estimated in terms of the Reynolds number (R_v) using the empirical relationship obtained by Clemmens *et al.* (2003) [In that paper there is an error with respect to the equation exponent, edited by Lozano *et al.* (2009)]:

$$1 + \varepsilon = 1 + 0.15 e^{-1 \times 10^{-6} R} \quad (2)$$

where ε is the base of natural logarithm; $R = \frac{VR_b}{\nu}$ is the Reynolds number (adim.); ν is the kinematic viscosity ($m^2 s^{-1}$); $V = \frac{Q}{b \cdot a}$ is the characteristic speed determined in the gate opening (ms^{-1}); $R_b = \frac{b_1 y_1}{(b_1 + 2y_1)}$ is the upstream hydraulic radius of the gate (m); b_1 is the width of the upstream rectangular channel (m); y_1 is the upstream flow depth (m).

For the submerged flow, the energy equation is:

$$Q = C_c ab \sqrt{\frac{2g(H_1 - y_2 + E_{corr})}{1 + \varepsilon}} \quad (3)$$

where E_{corr} is the correction factor of kinetic energy in the transition zone (m); y_2 is the depth immediately downstream of the gate (m).

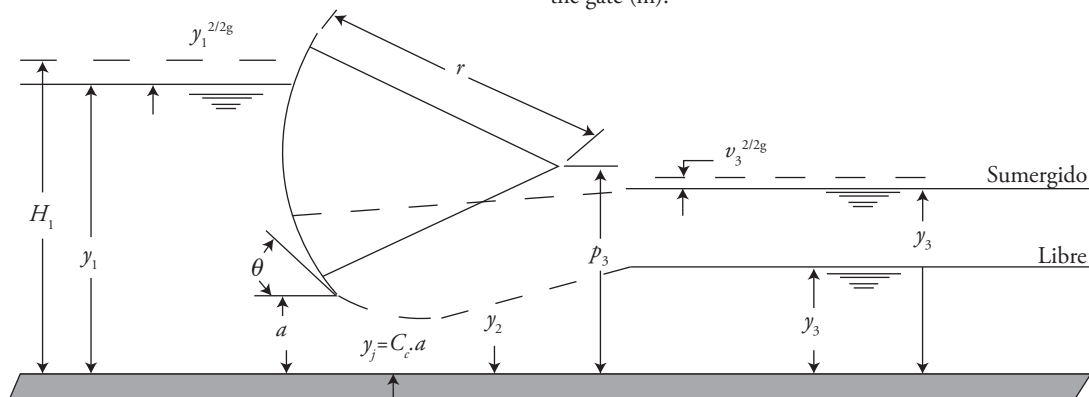


Figura 1. Esquema de flujo a través de una compuerta radial.
Figure 1. Flow diagram through a radial gate.

rectangular aguas arriba (m); y_1 es la profundidad del flujo aguas arriba (m).

Para el flujo sumergido, la ecuación de energía es:

$$Q = C_c ab \sqrt{\frac{2g(H_1 - y_2 + E_{corr})}{1 + \epsilon}} \quad (3)$$

donde, E_{corr} es el factor de corrección de la energía cinética en la zona de transición(m); y_2 es la profundidad inmediatamente aguas abajo de la compuerta (m).

Para aplicar la ecuación (3) se requiere estimar y_2 , que es difícil de obtener con precisión en la práctica debido a la gran turbulencia que se presenta para este tipo de flujo. Por tanto, la ecuación de momento es aplicada entre la vena contraída y la sección aguas abajo de la compuerta:

$$Qv_e + bg \frac{y_2^2}{2} + \frac{F_{ag}}{\rho} = Qv_3 + \frac{F_3}{\rho} + \frac{F_{arr}}{\rho} \quad (4)$$

donde, v_e es la velocidad efectiva del chorro (ms^{-1}); v_3 es la velocidad aguas abajo de la compuerta (ms^{-1}); ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}); F_3 es la fuerza de presión hidrostática ejercida por la profundidad del agua en la zona aguas abajo de la compuerta (kg ms^{-2}); F_{ag} es la fuerza del agua sobre toda la superficie entre la vena contraída y la sección aguas abajo de la compuerta en la dirección del flujo, incluyendo la fuerza hidrostática en las paredes del canal (kg ms^{-2}); F_{arr} es la fuerza de arrastre en los límites del canal (kg ms^{-2}).

La ecuación (4) permite estimar y_2 a partir de la profundidad medida aguas abajo (y_3), realizada en la zona estática del flujo. La fuerza de arrastre por lo general se desprecia debido a que la velocidad aguas abajo de la vena contraída es pequeña en condiciones de flujo sumergido (Clemmens *et al.*, 2003).

La F_{ag} se calcula como una profundidad de agua efectiva (y_{ag}), siendo un promedio de y_2 y y_3 afectado por un factor de peso:

$$F_{ag} = y_{ag} = p y_3 + (1-p) y_2 \quad (5)$$

donde, p es el factor de peso que según Clemmens *et al.* (2003) es 0.643; un valor más preciso se obtiene mediante ajuste de curva.

El factor de corrección de energía E_{corr} es cero en condiciones de flujo libre o completamente sumergido, pero varía con el grado de sumergimiento del chorro en la zona de transición (Wahl, 2005). El factor E_{corr} se determinó con la relación propuesta por Clemmens *et al.* (2003):

To apply equation (3), y_2 needs to be calculated, which is difficult to determine with precision due to the great turbulence occurring for this type of flow. Therefore, the momentum equation is applied between the collapsed vein and the downstream section of the gate:

$$Qv_e + bg \frac{y_2^2}{2} + \frac{F_{ag}}{\rho} = Qv_3 + \frac{F_3}{\rho} + \frac{F_{arr}}{\rho} \quad (4)$$

where v_e is the actual speed of the stream (ms^{-1}); v_3 is the speed downstream from the gate (ms^{-1}); ρ is the fluid density (kg m^{-3}); F_3 is the force of hydrostatic pressure exerted by the water depth in the downstream area of the gate (kg ms^{-2}); F_{ag} is the force of water over the entire area between the collapsed vein and the downstream section of the gate in the flow direction, including the hydrostatic force on the walls of the channel (kg ms^{-2}); F_{arr} is the drag force on the edge of the channel (kg ms^{-2}).

Equation (4) allows to estimate y_2 as from the downstream depth measured (y_3), carried out in the static area of the flow. The drag force is usually neglected because the downstream speed of the collapsed vein is small under submerged flow conditions (Clemmens *et al.*, 2003).

The F_{ag} is calculated as an effective water depth (y_{ag}), recording an average of y_2 and y_3 affected by a weight factor:

$$F_{ag} = y_{ag} = p y_3 + (1-p) y_2 \quad (5)$$

where p is the weight factor that according to Clemmens *et al.* (2003) is 0.643; a more accurate value is obtained by curve fitting.

The E_{corr} energy correction factor is zero under free flow or completely submerged conditions, but varies with the degree of submergence of the stream in the transition zone (Wahl, 2005). The E_{corr} factor was determined by the relationship proposed by Clemmens *et al.* (2003):

$$\frac{E_{corr}}{y_2 - y_1} = 0.52 - 0.34 \arctan \left[7.89 \left(\frac{y_2 - y_j}{y_j} - 0.83 \right) \right] \quad (6)$$

Another alternative for estimating the correction factor is that by Wahl (2005):

$$\frac{E_{corr}}{y_2 - y_1} = e^{-6.78 \left(\frac{y_j}{H_1} \right) \left[\frac{(y_2 - y_j)}{y_j} \right]} = e^{-6.78 \left[\frac{(y_2 - y_j)}{H_1} \right]} \quad (7)$$

$$\frac{E_{corr}}{y_2 - y_1} = 0.52 - 0.34 \arctan \left[7.89 \left(\frac{y_2 - y_j}{y_j} - 0.83 \right) \right] \quad (6)$$

Otra alternativa para estimar el factor de corrección es la de Wahl (2005):

$$\frac{E_{corr}}{y_2 - y_1} = e^{-6.78 \left(\frac{y_j}{H_1} \right) \left[\frac{(y_2 - y_j)}{y_j} \right]} = e^{-6.78 \left[\frac{(y_2 - y_j)}{H_1} \right]} \quad (7)$$

La velocidad del chorro equivalente para usar en la ecuación 4 de momento se determina como:

$$\frac{V_e^2}{2g} = \frac{v_j^2}{2g} - E_{corr} \quad (8)$$

donde, $v_j = \frac{Q}{by_j}$ es la velocidad del flujo promedio en la vena contraída para la condición de flujo libre (ms^{-1}); $y_j = C_c \cdot a$ es la profundidad del agua en la vena contraída en condiciones de flujo libre o espesor del chorro mínimo (m).

Wahl (2005) y Clemmens *et al.* (2003) señalan que el coeficiente de contracción en las ecuaciones 1, 3 y 8 se determina en función del ángulo en radianes del labio de la compuerta, θ , como:

$$C_c = 1.001 - 0.2349\theta - 0.1843\theta^2 + 0.1133\theta^3 \quad (9)$$

donde, $\theta = \arccos \left(\frac{p_e - a}{r} \right)$; r es el radio de la compuerta (m); p_e es la altura el perno (m).

Para aplicar el método E-M a las condiciones experimentales se usó el software RADGAT versión 1 desarrollado por Wahl (2005).

Evaluación del método de energía-momento

La precisión con la cual el método E-M estima los gastos que fluyen por debajo de la compuerta radial se determinó mediante un criterio gráfico y otro estadístico. En la evaluación gráfica se compararon los valores experimentales y ajustados para iguales cargas, realizando una valoración cualitativa del ajuste entre ambas curvas. El segundo criterio fue cuantitativo y se usaron los estadísticos cuadrado medio del error y desviación absoluta. También se realizó un análisis de regresión entre los gastos experimentales y ajustados, y se calculó la pendiente, el coeficiente de determinación (R^2) y el error típico. Estos parámetros estadísticos se usaron como una medida de la dispersión entre los

The speed of the equivalent stream to be used in the momentum equation 4 is determined as:

$$\frac{V_e^2}{2g} = \frac{v_j^2}{2g} - E_{corr} \quad (8)$$

where $v_j = \frac{Q}{by_j}$ is the average flow speed in the collapsed vein for the free flow condition (ms^{-1}); $y_j = C_c \cdot a$ is the water depth at the collapsed vein under free flow conditions or thickness of the minimum stream (m).

Wahl (2005) and Clemmens *et al.* (2003) note that the contraction coefficient in equations 1, 3 and 8 is determined in terms of the angle in radians of the gate lip, θ as:

$$C_c = 1.001 - 0.2349\theta - 0.1843\theta^2 + 0.1133\theta^3 \quad (9)$$

where, $\theta = \arccos \left(\frac{p_e - a}{r} \right)$; r is the radius of the gate (m); p_e is the pin height (m).

The version 1 RADGAT software developed by Wahl (2005) was used to apply the E-M method to the experimental conditions.

Evaluation of the energy-momentum method

The precision with which the E-M method estimates the flows that run under the radial gate was determined by a graphic and statistical criteria. In the graphical evaluation, the experimental data adjusted for the same loads were subjected to comparison, making a qualitative assessment of the fit between the two curves. The second criterion was quantitative and the statistical mean square error and absolute deviation were used. Also a regression analysis between the experimental and adjusted flows was conducted, and the slope, the determination coefficient (R^2) and standard error were calculated. These statistical parameters were used as a measure of the dispersion between the flows measured in the channel and those obtained with the E-M method. Also the percentage error was used and calculated by finding the error for each flow and dividing it by the flow measured, allowing to group the errors according to the criteria suggested by Wahl (2005) and Lopez *et al.* (2009).

RESULTS AND DISCUSSION

Radial gate running at free download

For the calibration of the radial gate under free flow conditions, the energy equation (1) was applied,

gastos medidos en el canal y los obtenidos con el método E-M. También se usó el error porcentual que se calculó encontrando el error para cada gasto y dividiéndolo entre el gasto medido, lo que permitió agrupar los errores según los criterios señalados por Wahl (2005) y López *et al.* (2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Compuerta radial funcionando a descarga libre

Para la calibración de la compuerta radial en condiciones de flujo libre se aplicó la ecuación de energía (1), obteniéndose el comportamiento del gasto (Figura 2). Las diferencias entre los valores calculados y medidos son muy pequeñas y además presentan la misma tendencia para las diferentes aberturas. Los cuadrados medios de los errores variaron entre 2.58×10^{-9} y $4.11 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y la desviación absoluta promedio fue $0.002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, lo que muestra una buena estimación de los gastos calculados.

En la Figura 3 se observa que el comportamiento de los gastos se ajusta hacia una línea recta próxima a los 45° . Se realizó un análisis de regresión para determinar la pendiente (0.987), con un R^2 de 0.997 y un error típico de $0.002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, lo que muestra la poca variación entre los Q medidos y estimados.

La diferencia entre los Q medidos y estimados varió entre -6.4×10^{-3} y $2.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que el error porcentual osciló entre -3.55 y 2.99%

thus obtaining the flow behavior (Figure 2). The differences between the measured and calculated values are very small and also show the same trend for different openings. The mean square errors ranged from 2.58×10^{-9} and $4.11 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, and the average absolute deviation was $0.002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, which shows a good calculation of the estimated flows.

In Figure 3 it is shown that the flow behavior conforms a straight line close to 45° . A regression analysis was conducted to determine the slope (0.987), with an R^2 of 0.997 and a standard error of $0.002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, which shows little variation between the Q measured and estimated.

The difference between the measured and estimated Q varied from -6.4×10^{-3} to $2.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, while the percentage error ranged between -3.55 and 2.99% distributed as follows: 68 % of the cases were modeled with errors $\pm 2 \%$, and 32 % with errors less than $\pm 5 \%$. Therefore, the model can be used to estimate with sufficient accuracy the flow of radial gates operating at free discharge, in agreement with the results obtained by Clemmens *et al.* (2003).

Radial gate operating at submerged discharge

By using the empirical energy correction equation proposed by Clemmens *et al.* (2003) in the E-M method during the calibration of the radial gate running at submerged discharge, it was observed (Figure 4) that the model describes the behavior

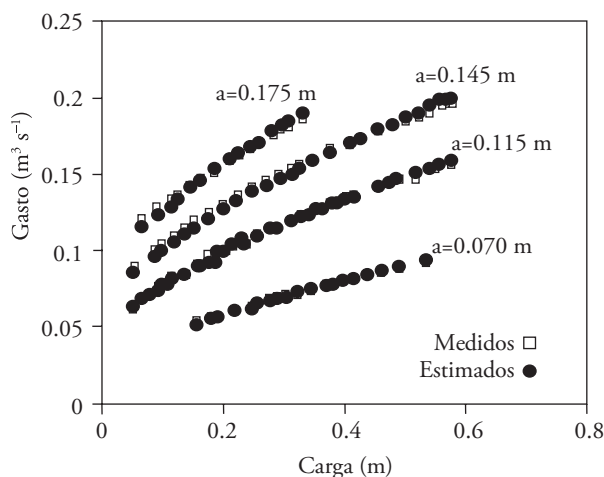


Figura 2. Relación carga-gasto medido y estimado para diferentes aberturas de compuerta radial a descarga libre.

Figure 2. Load-flow relationship measured and estimated for different radial gate openings at free download.

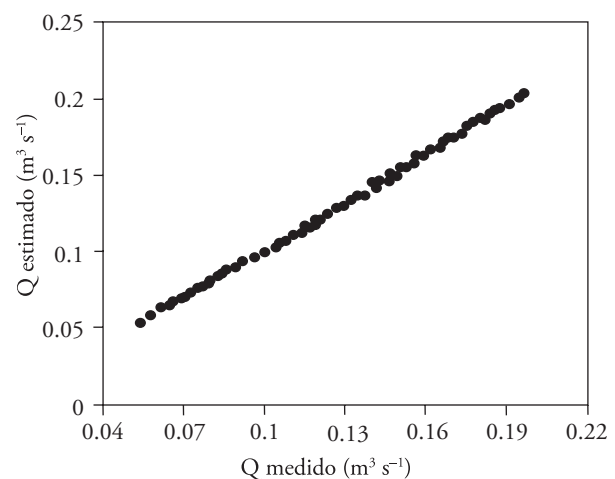


Figura 3. Tendencia del gasto medido y estimado por el modelo E-M para la compuerta radial a descarga libre.

Figure 3. Trend of the flow measured and calculated by using the E-M model for radial gate with free discharge.

distribuido así: 68 % de los casos fueron modelados con errores de ± 2 %, y 32 % con errores inferiores a ± 5 %. Por tanto el modelo puede usarse para estimar con suficiente precisión el gasto en compuertas radiales funcionando con flujo a descarga libre, coincidiendo con los señalamientos de Clemmens *et al.* (2003).

Compuerta radial funcionando a descarga ahogada

Al usar la ecuación de corrección de energía empírica propuesta por Clemmens *et al.* (2003) en el método de E-M durante la calibración de la compuerta radial funcionando a descarga ahogada, se observó (Figura 4) que el modelo describe el comportamiento de los gastos para diferentes cargas y aberturas, pero existen diferencias entre los valores medidos y estimados. Los cuadrados medios del error variaron entre 9×10^{-10} y $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que la desviación absoluta promedio fue $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, los cuales se consideran bajos si se comparan con los valores obtenidos por Buyalski (1983) y Wahl (2005), y si además se tiene en cuenta los fenómenos que ocurren durante el funcionamiento de la compuerta a descarga ahogada.

Con la tendencia del gasto (Figura 5) se aprecia que los puntos se distribuyen alrededor de una línea recta de 45° , lo cual se debe a las diferencias entre los Q medidos y estimados. Un análisis de regresión lineal generó una pendiente de 0.976, un R^2 de 0.899 y un error típico de $0.006 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Dichos estadísticos muestran que el método de Clemmens no es suficientemente bueno, lo que puede afectar la precisión de la estimación del gasto. Esto se debe a la relación empírica usada para determinar el factor de corrección de energía cuando el flujo es sumergido, la cual pudiera mejorarse si se consideran familias de curvas que relacionen E_{corr} y el aumento de la profundidad relativa para diferentes valores de a/H_1 coincidiendo con lo reportado por Clemmens *et al.* (2003) y Wahl (2005).

La diferencia entre los Q medidos y estimados varió entre -9.97×10^{-3} y $10.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que el error porcentual osciló entre -9.62 y 9.01 %. Estos valores se encuentran dentro del rango de -13 a 70 % obtenido por Wahl *et al.* (2003) y Wahl (2005), pero se consideran altos si se considera los gastos típicos que circulan por los canales de riego. Al

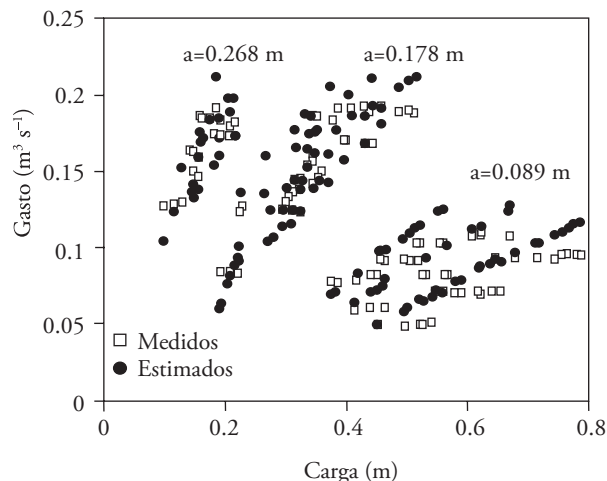


Figura 4. Relación carga-gasto para descarga ahogada según el modelo E_{corr} de Clemmens *et al.* (2003).

Figure 4. Load-flow relationship for submerged discharge according to the E_{corr} model by Clemmens *et al.* (2003).

of flows for different loads and openings, but there are differences between the measured and estimated values. The mean squares errors ranged between 9×10^{-10} and $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, while the average absolute deviation was $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, which are considered low when compared with values obtained by Buyalski (1983) and Wahl (2005); also taking into account the phenomena.

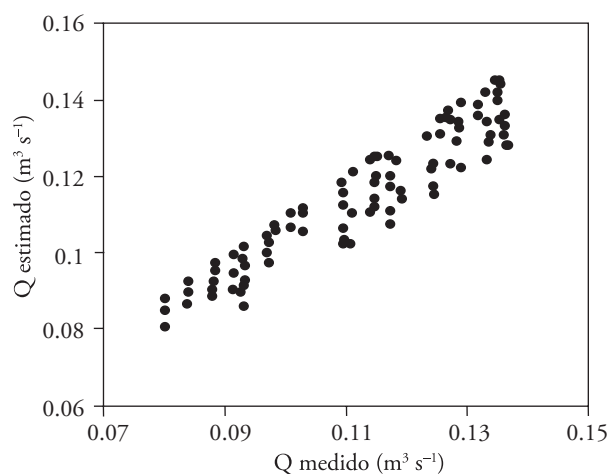


Figura 5. Tendencia del gasto estimado por el método E-M para la compuerta radial funcionando a descarga ahogada según el modelo E_{corr} de Clemmens *et al.* (2003).

Figure 5. Trend of the flow estimated by the E-M method for the radial gate operating at submerged discharge, according to the E_{corr} model by Clemmens *et al.* (2003).

analizar la distribución del porcentaje de error para flujo ahogado se tiene que 15 % de los casos fueron modelados con errores de ± 2 %, 35 % con errores de ± 5 % y 50 % con errores de ± 10 %. Dicha variación se debe a las ecuaciones empíricas usadas para determinar el factor de corrección de energía y el factor de peso de la profundidad del flujo, las cuales necesitan refinarse como señalan Clemmens *et al.* (2003).

También se evaluó el método de E-M con el modelo obtenido por Wahl (2005) para calcular el factor de corrección de energía en la compuerta radial en condiciones de descarga ahogada. Los valores estimados (Figura 6) siguen la tendencia de los Q medidos, pero las variaciones entre estos se incrementaron para la abertura de compuerta de 0.089 m con diferencias hasta de $-0.013 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; además, el modelo tiende a sobrestimar el gasto. El cuadrado medio del error osciló entre 2×10^{-4} y $4 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y la desviación absoluta promedio fue $6.79 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, superior a la obtenida por Buyalski (1983) y Wahl *et al.* (2003). Además es 59 % superior con respecto a la variante que utiliza el E_{corr} propuesto por Clemmens *et al.* (2003).

Al analizar el comportamiento del gasto (Figura 7) se aprecia que aunque los valores se distribuyen alrededor de una línea recta, existe diferencias entre los Q medidos y estimados, lo cual se corroboró con el análisis de regresión lineal: pendiente de 0.959, R^2

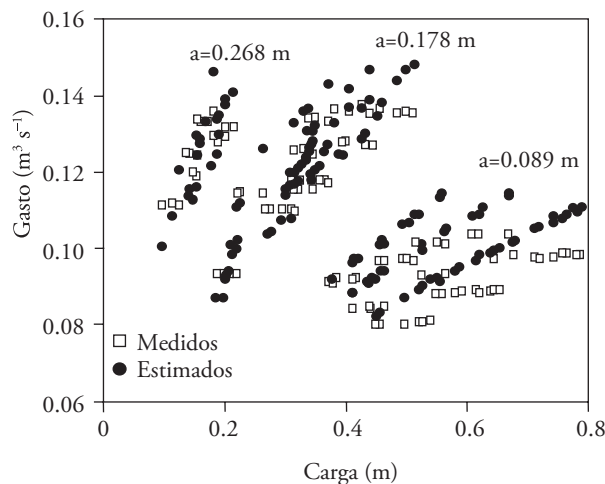


Figura 6. Relación carga-gasto para la compuerta radial a descarga ahogada según modelo E_{corr} de Wahl (2005).

Figure 6. Load-flow relationship for the radial gate at submerged discharge according to the E_{corr} model by Wahl (2005).

The flow trend (Figure 5) shows that the points are distributed around a straight line of 45° , which is due to the differences between the Q measured and estimated. A linear regression analysis produced a slope of 0.976, an R^2 of 0.899 and a standard error of $0.006 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. These statistics show that the Clemmens method is not good enough, which may affect the accuracy of the flow estimate. This is due to the empirical relationship used to determine the energy correction factor when the flow is submerged, which could be improved if we consider families of curves relating E_{corr} and the increase of relative depth for different values of a/H_1 , coinciding with that reported by Clemmens *et al.* (2003) and Wahl (2005).

The difference between measured and estimated Q ranged between -9.97×10^{-3} and $10.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, while the percentage error ranged between -9.62 and 9.01 %. These values are within the range of -13 to 70 % obtained by Wahl *et al.* (2003) and Wahl (2005), but are considered high if one considers the typical flows that run through the irrigation canals. In the analysis of the distribution of the error percentage for submerged flow, 15 % of the cases were found to having been modeled with errors of ± 2 %, 35 % with errors of ± 5 %, and 50 % with ± 10 % errors. This variation is due to the empirical equations used to determine the energy correction factor and the weight factor of the flow depth, which need to be refined, as reported by Clemmens *et al.* (2003).

The E-M method was also evaluated with the model obtained by Wahl (2005) to calculate the

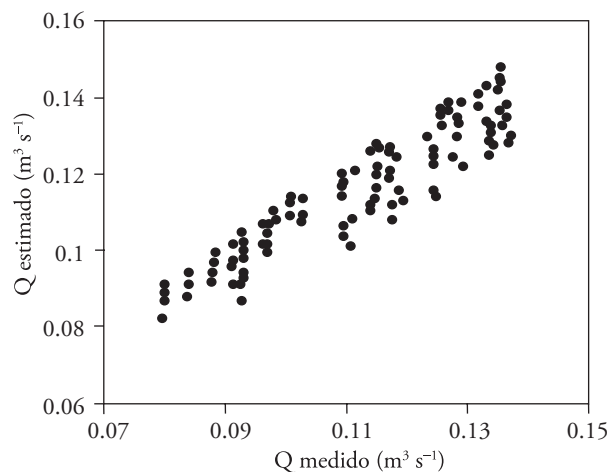


Figura 7. Tendencia del gasto estimado para la descarga ahogada con el modelo E_{corr} de Wahl (2005).

Figure 7. Trend of the estimated flow for the submerged discharge with the E_{corr} model by Wahl (2005).

de 0.874 y error típico de $0.006 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Estos estadísticos muestran que el ajuste del modelo no es bueno, lo cual puede tener un efecto marcado en la confiabilidad de la estimación del gasto para esta estructura funcionando a descarga ahogada.

El error porcentual osciló entre -13.07 y 9.03% , con la distribución siguiente: 16% de los Q modelados están dentro de $\pm 2 \%$ de error, 21% dentro de $\pm 5 \%$ de error y 63% dentro de $\pm 10 \%$ de error. Las diferencias obtenidas en la proporción de los porcentajes de los gastos estimados para el rango de error porcentual evaluado entre los modelos de E_{corr} , se deben a que el modelo de Wahl (2005) incorpora el término espesor del chorro relativo (y/H_1) en vez de la abertura de la compuerta relativa (a/H_1). Por tanto, pudiera mostrar mejores resultados para la calibración del gasto en la zona de transición de libre a ahogado. No obstante, la afinación del factor de corrección de energía constituye un problema a resolver, según señalan Wahl (2005) y Wahl y Clemmens (2005). Así, es recomendable realizar investigaciones para ajustar el E_{corr} y reducir los errores en la estimación del gasto en condiciones de descarga ahogada. El método de E-M puede aplicarse en la estimación del gasto en las compuertas radiales a descarga libre, obteniéndose valores de Q con suficiente precisión y confiabilidad. Sin embargo, para la descarga ahogada las diferencias halladas están dentro de los rangos obtenidos por Wahl *et al.* (2003) y Wahl (2005), pero se debe aplicar el método con especial cuidado porque los errores en la estimación del gasto pueden llegar a $0.013 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, recomendándose usar el método E-M para tener una aproximación del gasto que circula por dicha estructura cuando no se dispone a priori de una calibración.

CONCLUSIONES

El método de energía-momento propuesto por (Clemmens *et al.*, 2003) representa de forma precisa el comportamiento de la relación carga-gasto para la compuerta radial funcionando a descarga libre, modelándose 68% de los casos con errores porcentuales menores a $\pm 2 \%$. Sin embargo, cuando se operó la estructura a descarga ahogada el 50% de los gastos medidos hubo errores porcentuales de $\pm 10 \%$ y el resto osciló entre 2 y 5% . Por tanto, es necesario profundizar más en el ajuste de las ecuaciones empíricas para el factor de corrección de energía y el factor de peso de la profundidad del flujo.

energy correction factor in the radial gate under submerged discharge conditions. The estimated values (Figure 6) follow the trend of the measured Q , but the variations among these increased for the gate opening of 0.089 m , with differences up to $-0.013 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; in addition, the model tends to overestimate the flow. The mean square error ranged between 2×10^{-4} and $4 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, and the average absolute deviation was $6.79 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, higher than that obtained by Buyalski (1983) and Wahl *et al.* (2003). It is also 59% higher than the variant using the E_{corr} proposed by Clemmens *et al.* (2003).

On analyzing the flow behavior (Figure 7), it was observed that although the values are distributed around a straight line, there are differences between the measured and estimated Q , which was confirmed with the linear regression analysis: slope of 0.959 , R^2 0.874 and standard error $0.006 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. These statistics show that the model fit is not good, which can have a marked effect on the reliability of the flow estimate for this structure operating with submerged discharge.

The percentage error ranged from -13.07 and 9.03% , with the following distribution: 16% of the Q models are within $\pm 2 \%$ error, 21% within $\pm 5 \%$ error and 63% within $\pm 10 \%$ error. The differences obtained in the ratio of the percentages of the estimated flows for the range of the percentage error evaluated between the models of E_{corr} , occur because the model by Wahl (2005) incorporates the term relative stream thickness (y/H_1) instead of opening of the relative gate (a/H_1). Therefore, it could show better results for the calibration of the flow in the transition zone from free to submerged. However, the tuning of the energy correction factor is a problem to be solved, as indicated by Wahl (2005) and Wahl and Clemmens (2005). Thus, research is recommended to adjust the E_{corr} and reduce errors in the estimation of flow under submerged discharge conditions. The E-M method can be applied in the estimation of flow on the radial gates with free discharge, obtaining Q values with sufficient accuracy and reliability. However, for submerged discharge the differences found are within the ranges obtained by Wahl *et al.* (2003) and Wahl (2005), but the method should be applied with great care because errors in the flow estimation can reach $0.013 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; thus, the recommendation is to use the E-M method in order to have an approximation of the flow running through that structure when there is no a priori calibration.

El modelo empírico para la determinación del factor de corrección de la energía (Clemmens *et al.*, 2003) cuando la compuerta funciona a descarga ahogada produjo menores desviaciones absolutas en la estimación del gasto, con un 59 % inferior al modelo de Wahl (2003), debido a que utiliza el término de espesor del chorro relativo que describe mejor el fenómeno que ocurre en la compuerta cuando no se opera en la zona de transición de descarga libre a ahogada o viceversa.

LITERATURA CITADA

- Buyalski, C. P. 1983. Discharge algorithms for canal radial gates. Research Report REC-ERC-83-9. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Denver, Colorado. 207 p.
- Clemmens, A. J., T. S. Strelkoff, and J. A. Replogle. 2003. Calibration of submerged radial gates. *J. Irrigation and Drainage Eng.* 129: 680-687.
- De León, B., V. Prado, B. Robles, y J. Ramirez. 2006. Delimitación del uso de compuertas como estructuras de aforo en canales de riego. *Ing. Hidráulica Méx.* XXI: 95-103.
- García, E. 1992. Diagnóstico del estado actual del laboratorio de hidráulica, mejoramiento y automatización. Universidad Autónoma Chapingo. México. 80 p.
- López, G., B. De León, V. Prado, V. Ruíz, y E. Romantchik. 2009. Aplicación del método de energía-momento en la calibración de una compuerta plana vertical. *Ing. Hidráulica Méx.* XXIV: 109-114.
- Lozano, D., L. Mateos, G. Merkle, and A. Clemmens. 2009. Field calibration of submerged sluice gates in irrigation canals. *J. Irrigation and Drainage Eng.* 135(6): 763-772.
- Martínez, R. 1994. Sensores de nivel continuos y discretos. Manual técnico. ISPJAE. Ciudad Habana, Cuba. pp: 3-20
- Montes, J. S. 1997. Irrotational flow and real fluid affects under planar sluice gates. *J. Hydraulic Eng.* 123: 219-232.
- Pastor, L., y E. Arteaga. 1998. Modelación dinámica y esquemas para el control de un canal Rehbock. *Ing. Hidráulica Méx.* XIII: 5-13.
- Spaan, B., Van Nooyen, R., De Grass, J., and R. Brouwer. 2003. Discharge formulas of crump-de gruyter gate-weir for computer simulation. *J. Irrigation and Drainage Eng.* 129: 270-277.

CONCLUSIONS

The energy-momentum method proposed by Clemmens *et al.*, 2003 represents accurately the behavior of the load-flow relationship for the radial gate operating at free discharge, recording 68 % of cases with errors less than ± 2 %. However, when the structure was operated with submerged discharge, in 50 % of the flows measured there were percentage errors of ± 10 % and the rest ranged between 2 and 5 %. It is therefore necessary to go deeper into the adjustment of empirical equations for the energy correction factor and the weight factor of the flow depth.

The empirical model to determine the energy correction factor (Clemmens *et al.*, 2003) when the gate operated with submerged discharge produced lower absolute deviations in the flow estimation, with 59 % less than the model by Wahl (2003). This is because it uses the term relative stream thickness that best describes the phenomenon occurring at the gate when it does not take place in the transition zone of free or submerged discharge or vice versa.

—End of the English version—



- Wahl, T. L. 2005. Refined energy correction for calibration of submerged radial gates. *J. Hydraulic Eng.* 131: 457-466.
- Wahl, T. L., and A. J. Clemmens. 2005. Applying the energy – momentum method to radial gate discharge calibration. *In: World Water & Environmental Resources Congress.* Alaska. pp: 1-10.
- Wahl, T. L., A. J. Clemmens, and J. A. Replogle. 2003. The energy correction for calibration of submerged radial gates. *In: 2nd Int. Conf. on Irrigation and Drainage.* ASCE. USA. pp: 1-10.